

Celdas de combustible microbianas: una evolución sustentable en la producción de bioelectricidad

Oscar Guadarrama-Pérez^{1*} , Víctor Hugo Guadarrama-Pérez² , Alexa Carolina Guevara-Pérez¹, Rosa Angélica Guillén-Garcés¹ , Luis Gerardo Treviño-Quintanilla¹ 

¹Dirección de Ingeniería en Tecnología Ambiental y Biotecnología, Universidad Politécnica del Estado de Morelos, Boulevard Cuauhnáhuac 566, Lomas del Texcal, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550, México. ²Dirección de Posgrado en Ciencias en Biotecnología, Universidad Politécnica del Estado de Morelos, Boulevard Cuauhnáhuac 566, Lomas del Texcal, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550, México.

Email de autor para correspondencia: *ogadarrama@upemor.edu.mx

Recibido: 17 abril 2025. **Aceptado:** 21 agosto 2025

RESUMEN

Las celdas de combustible microbianas (CCM) son dispositivos electroquímicos que utilizan microorganismos para la producción de bioelectricidad de manera sustentable. Desde sus orígenes, esta tecnología ha sido empleada principalmente como prototipo de estudio para el tratamiento de contaminantes en aguas residuales, destacando su potencial como fuente de energía renovable. El principio de funcionamiento de este sistema, consiste en utilizar la actividad metabólica de las bacterias para degradar residuos con alto potencial energético. La energía liberada en forma de electrones es captada por un ánodo y un cátodo interconectado. El flujo de electrones a través de estos materiales genera una corriente eléctrica, la cual puede suministrar electricidad a dispositivos electrónicos de bajo consumo energético. Algunas bacterias de los géneros: *Geobacter*, *Shewanella*, *Bacillus* y *Pseudomonas* han sido ampliamente investigadas debido a su alta capacidad de donar electrones para la producción de bioelectricidad en CCM. En este artículo se describen las características de esta innovadora tecnología, así como sus aplicaciones prácticas, bases biotecnológicas y áreas de investigación. Asimismo, se presentan algunos de los avances más relevantes que están impulsando su potencial industrial. Es importante señalar la necesidad de crear tecnologías vanguardistas que mitiguen los efectos adversos generados por las tecnologías convencionales que utilizan combustibles fósiles en el sector energético. Las celdas de combustible microbianas podrían contribuir al desarrollo de una sociedad energéticamente sustentable.

Palabras clave: Celdas de combustible microbianas; bioelectricidad; aguas residuales.

ABSTRACT

Microbial fuel cells (MFC) are chemical devices that use microorganisms to produce bioelectricity. Since its origins, this technology has been used as a prototype for treating pollutants present in wastewater as a renewable energy source. The operating principle of this system consists of using the metabolic activity of bacteria to degrade waste with high energy potential. An interconnected anode and cathode capture the energy released in the form of electrons. The flow of electrons through these materials generates an electric current, which can supply electricity to low-energy electronic devices. Some bacteria of the genera: *Geobacter*, *Shewanella*, *Bacillus* and *Pseudomonas* have been widely investigated due to their high capacity to donate electrons for the production of bioelectricity in MFC. This article describes the characteristics of this innovative technology, as well as its practical applications, biotechnological bases, and research areas. Likewise, some of the most relevant advances that are boosting its industrial potential are presented. It is important to highlight the need to create cutting-edge technologies that mitigate the adverse effects of conventional technologies that use fossil fuels in the energy sector. Microbial fuel cells could contribute to the development of an energetically sustainable society.

Keywords: Microbial fuel cells; bioelectricity; wastewater.

INTRODUCCIÓN

El origen del concepto de las celdas de combustible microbianas (CCM) surge a partir del descubrimiento de bacterias productoras de bioelectricidad [1]. Estas bacterias poseen la capacidad de expulsar electrones fuera de su membrana celular como resultado de su metabolismo, particularmente al consumir sustratos con alto contenido energético, principalmente carbohidratos [2]. Al metabolizar estos compuestos, inicia una serie de reacciones enzimáticas que los degradan, generando productos como electrones (e^-), protones (H^+) y dióxido de carbono (CO_2) [3]. Las CCM tienen una configuración que le

permiten captar la energía liberada (electrones) por las bacterias. En un extremo cuentan con un ánodo, donde habitan las bacterias productoras de bioelectricidad [4]. Este electrodo colecta la energía generada y es conducida por un circuito eléctrico externo dirigido hacia el otro extremo de la CCM, donde se encuentra instalado un cátodo. Los protones se adhieren a este electrodo, generando una corriente eléctrica constante. Para que este fenómeno biológico ocurra es necesario controlar las condiciones de operación, principalmente los niveles de oxígeno [5]. En la sección del ánodo debe prevalecer la ausencia de oxígeno, esto debido a que el oxígeno interfiere en la transferencia de

electrones, el cual actúa como un aceptor final [6]. En el caso contrario, en la sección del cátodo debe prevalecer la presencia de oxígeno, ya que este reacciona con los electrones del circuito externo y los protones adheridos para la formación de agua [7]. A través de esta reacción se crea un diferencial de potencial generando bioelectricidad (Figura 1). Diversas investigaciones han demostrado que las CCM son una herramienta prometedora para el tratamiento de aguas residuales, utilizando los residuos orgánicos como sustrato [8]. Las CCM pretenden emplearse a gran escala como un sistema de pretratamiento de aguas residuales domésticas. El agua residual es considerada como una fuente de recuperación de energía con alto potencial energético, esta podría generar hasta $2.2 \text{ kW/h} \cdot \text{m}^3$ considerando una concentración de materia orgánica de 500 mg/L . La energía química contenida en las aguas residuales podría cubrir hasta el 7% de la energía consumida por los hogares [9]. Actualmente, la producción de electricidad en todo el mundo depende en gran medida de la quema de combustibles fósiles, por lo que el consumo de petróleo crudo, gas natural y los biocombustibles se incrementarán en los próximos años, debido al rápido crecimiento económico y demográfico [10]. Dada esta problemática, la tecnología de CCM busca contribuir a la mitigación de las adversidades ocasionadas por las tecnologías convencionales, principalmente las relacionadas con el cambio climático [11]. Es momento de pensar en optar por nuevas fuentes de energía, con el fin de producir electricidad

dentro de un ambiente libre de contaminación como lo hacen las CCM. Otras de las ventajas destacables de esta tecnología es que se pueden emplear en el tratamiento de aguas industriales [12]. De acuerdo con la investigación actual, se han reportado altas eficiencias en la remoción de colorantes, xenobióticos y metales pesados [13]. Desafortunadamente, las CCM también presentan algunas desventajas. La baja generación de potencia eléctrica es el factor principal que limita el escalamiento de su industrialización [14].

El rendimiento electroquímico de las CCM depende, en gran medida, de la capacidad de las bacterias para transferir los electrones a un aceptor anódico [15]. Algunas cepas bacterianas, como *Shewanella oneidensis*, presentan mecanismos de transporte exoelectrógenos que permiten la transferencia directa de electrones. La actividad electrocatalítica de esta bacteria se ha evaluado en sistemas electroquímicos bajo condiciones anaeróbicas. Desafortunadamente, su rendimiento se ve afectado por la presencia de oxígeno y nitrato, que actúan como aceptores de electrones [16]. Otras especies bacterianas, como *Clostridium ljungdahlii*, *Acetobacterium woodii* y *Sporomusa ovata*, también han reportado altos niveles de actividad electroquímica. Sin embargo, estas bacterias no transportan electrones directamente sobre los ánodos de las CCM, para ello requieren de la ayuda de mediadores redox [17]. Por el contrario, *Geobacter sulfurreducens*, es una bacteria que tolera bajas concentraciones de oxígeno y no requiere mediadores redox para

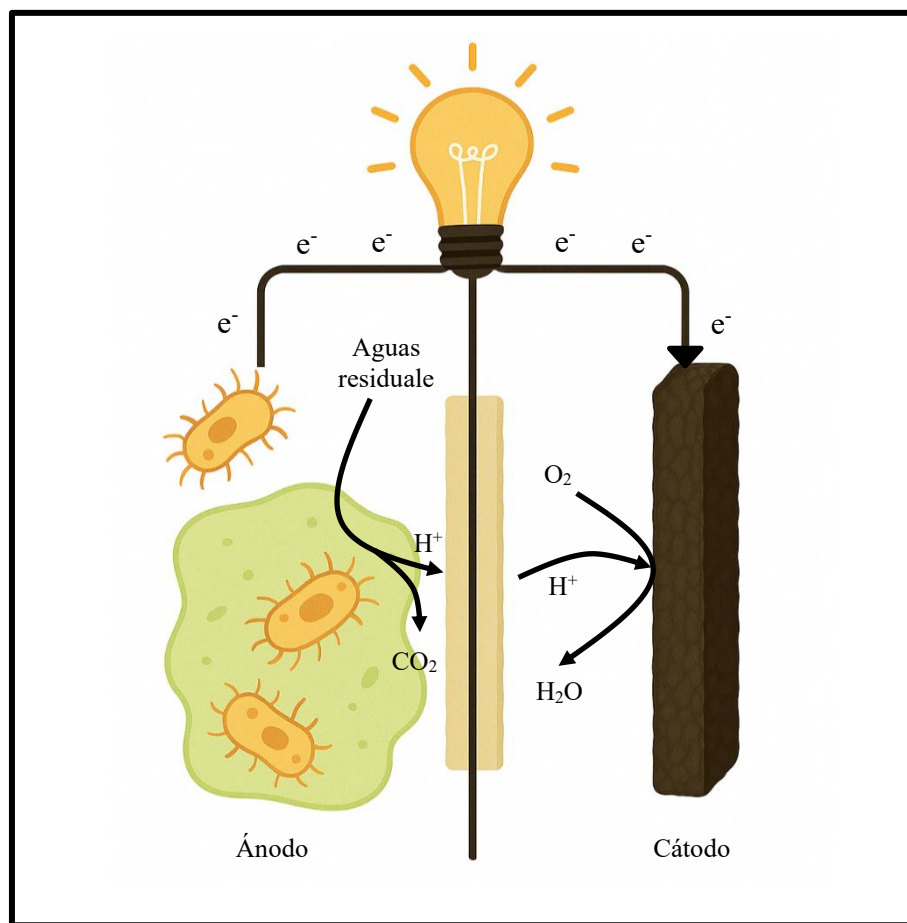


Figura 1. Representación esquemática de una CCM.

transferir electrones al ánodo, esta posee una capacidad metabólica superior que contribuye a su supervivencia y crecimiento en ambientes tóxicos [18]. Al igual que la bacteria *Shewanella oneidensis*, *Geobacter sulfurreducens* también pertenece a las bacterias electrogénicas. Los pili (elongaciones proteicas) en este tipo de bacterias son los que determinan la capacidad de transferir electrones entre la membrana celular y el electrodo del ánodo mediante una conexión física directa, esta conexión disminuye la competencia por electrones de otros aceptores, lo cual varía de acuerdo a las condiciones ambientales

presentes en las CCM y a la disponibilidad de aceptores [19]. *Geobacter sulfurreducens* exhibe una forma única de generar bioelectricidad en una CCM, en comparación con otras bacterias. Por lo que esta bacteria ha llamado la atención en el área de la ingeniería biotecnológica, donde a partir de su estudio se pretende elevar el rendimiento electroquímico.

Este artículo tiene como objetivo brindar información concisa sobre el estado del arte de las CCM, donde se presenta una recapitulación sobre los aspectos importantes del desarrollo de esta tecnología, como producción de bioelectricidad, configuraciones, modos de

operación, materiales, tratamiento de aguas residuales, desafíos y perspectivas futuras. Este sistema es una tecnología prometedora en el sector de la sustentabilidad, no solo para la producción de bioenergía sino también para mantener un ambiente limpio, ya que durante su construcción y operación no se forman subproductos tóxicos.

Ramas de la investigación con celdas de combustible microbianas

Las CCM han enfocado áreas multidisciplinarias de investigación para mejorar su rendimiento de operación, principalmente en las áreas de ingeniería química, ambiental y biotecnología [20]. En la ingeniería química se han desarrollado estudios relacionados con catalizadores abióticos que incrementan la generación de bioelectricidad al ser depositados sobre los electrodos. Materiales como el plomo, platino, grafeno, titanio, iridio, latón, cobre y acero inoxidable son comúnmente utilizados para mejorar el rendimiento [21]. Estos materiales aceleran la transferencia de los electrones que fluyen al cátodo, ya que funcionan como colectores que incrementan la corriente eléctrica a través del circuito externo [22]. Adicionalmente, se han realizado investigaciones orientadas a la modificación superficial de los electrodos mediante tratamientos de catálisis abiótica, con el objetivo de aumentar su porosidad y área de contacto con las bacterias electroactivas, lo que resultada en una producción mejorada de bioelectricidad [23]. Dentro de la ingeniería

ambiental, los estudios se han enfocado al tratamiento de diferentes residuos. Las CCM se han empleado para tratar aguas de las industrias porcícolas, farmacéuticas, textiles, cerveceras, papeleras, alimentarias y petroquímicas a escala laboratorio, demostrando remociones de los contaminantes de más del 90% [24]. Debido al alto contenido de materia orgánica de los sistemas sanitarios e industrias, esta tecnología pretende emplearse como pretratamiento en trenes de aguas residuales, captando la bioelectricidad de los contaminantes. A través de los años, los estudios con la ingeniería ambiental han mostrado un incremento en la bioelectricidad generada por las CCM, incrementando el rendimiento de decenas de mW/m^2 a miles de mW/m^2 [25]. Esta rama de la investigación promete seguir mejorando su rendimiento, aunque por el momento, se pretende que esta tecnología sea empleada para satisfacer dispositivos de bajo consumo energético [26]. La ingeniería biotecnológica también presenta un amplio campo de investigación, principalmente en el estudio de bacterias e identificación de mecanismos de transporte de electrones [27]. Un sistema electroquímico implica la transferencia de electrones entre componentes bióticos y abióticos, donde las bacterias electroactivas catalizan el proceso de intercambio [28]. Muchos artículos de investigación explican algunos de los mecanismos de transferencia de electrones entre bacterias y materiales conductores [29]. En el ánodo es donde se realiza la transferencia de electrones a partir de las bacterias electrógenas [30]. Se han

planteado diferentes mecanismos para explicar cómo los microorganismos liberan los electrones al electrodo. El primero es por *oxidación de productos por el metabolismo bacteriano*. Los primeros estudios con CCM enfocados a biopelículas anódicas, mostraron que es posible producir bioelectricidad a través de la oxidación de los productos que se generan durante la síntesis enzimática en el metabolismo microbiano (hidrógeno, alcoholes, amonio y sulfuro de hidrógeno). Por ejemplo, el hidrógeno producido en la degradación de la glucosa puede oxidarse abióticamente, las bacterias sulfato-reductoras reducen el sulfuro a monóxido de azufre, extrayendo los electrones generados. Este proceso ocurre sobre la superficie del ánodo [31]. Otro tipo de transferencia de electrones es por *mediadores redox*. Las bacterias no fermentativas pueden usar el electrodo anódico como aceptor de electrones para poder realizar la transferencia de electrones deseados. Para ello es necesario el uso de mediadores electroquímicos. Estas sustancias contienen moléculas que pueden ser oxidadas o reducidas y reciclarse sucesivamente. En su forma oxidada estos compuestos atraviesan la membrana celular aceptando electrones de al menos un donante de electrones dentro de la célula bacteriana y luego son transferidos a través de la célula en su forma reducida para, finalmente oxidar y transferir los electrones en el ánodo [32]. Los mediadores que se han utilizado son: la tionina, sufranina, rojo neutro, 2-hidroxi-1,4-naftoquinona y algunos compuestos derivados de la fenanzina. Muchos

inconvenientes desalentaron el uso de estas sustancias. En primer lugar, no se ha demostrado que los microorganismos sean capaces de mantener su crecimiento en presencia de estas sustancias, es decir que se consideran tóxicas para la biopelícula. En segundo lugar, las CCM son operadas en modo de flujo continuo, requiriendo el suministro permanente de mediadores. Esta acción aumenta el costo de sus aplicaciones. Por último, los mediadores electroquímicos son a menudo tóxicos y no pueden ser liberados en el ambiente sin tratamiento alguno [33]. Algunas bacterias como *Pseudomonas* sp, *Shewanella putrefaciens* y *Geothrix fermentans* son capaces de generar sus propios mediadores para incrementar la transferencia extracelular.

En la *transferencia directa de electrones* ciertas bacterias tienen la capacidad de transferir electrones desde un donante soluble (sustrato orgánico) hacia un aceptor, por lo que la transferencia directa se realiza a través del contacto físico de la membrana celular o a través de un organelo de la membrana con el ánodo de la CCM [34]. Para que ocurra una transferencia directa, las bacterias deben poseer rieles proteicos que transfieran los electrones del interior de la célula hacia su exterior a través de la cadena transportadora de electrones [35]. Algunas bacterias son capaces de transferir de forma directa los electrones, destacando algunos géneros como: *Geobacter*, *Shewanella* y *Rhodospirillum rubrum* [36]. Estas bacterias realizan la transferencia mediante citocromos tipo C de la membrana externa de la célula a través de un contacto físico por adherencia de la célula

bacteriana del citocromo al ánodo. Cepas del género *Geobacter* utilizan los pili para alcanzar y utilizar receptores de electrones más distantes, esto gracias a redes de pili interconectados y a una matriz extracelular conductora que transfiere los electrones desde las capas interiores hasta las capas exteriores de la biopelícula [37]. Los pili también permiten a las bacterias utilizar un electrodo que no está en contacto celular directo como su único aceptor de electrones, por lo que las mayores densidades de potencia en CCM fueron reportadas con este tipo de bacterias, en especial con *Geobacter Sulfureducens*. Esta bacteria tiene un pili tipo IV, el cual transporta electrones directamente de la membrana interna a un aceptor externo. Otro tipo de citocromo es el Z, este contribuye a la transferencia extracelular de la membrana externa. Otro tipo de citocromos son los periplásmicos, estos pueden servir como portadores de electrones intermedios entre la membrana externa y donadores de electrones (por ejemplo, el acetato) metabolizados en el citoplasma [38]. En algunas bacterias *Shewanella*, los electrones que surgen en la membrana interna son transportados por extensiones ricas en citocromos Cyma tipo C hacia la membrana externa, posteriormente pueden ser transferidos hacia un aceptor de electrones por proteínas de reducción de metales, donde se utilizan las flavinas como lanzaderas electrónicas para completar la transferencia de electrones en las múltiples capas de la biopelícula [39]. Cuando los electrones han sido captados por el ánodo, estos son dirigidos hacia el cátodo por un

circuito externo. Dado que las CCM funcionan como una batería, se crea un diferencial de potencial entre los electrodos mediante el flujo de electrones, los cuales reaccionan con el oxígeno ($O_2 + e^- + H_2 \rightarrow H_2O$) para producir la bioelectricidad [40].

La oxidación de sustratos en una CCM se realiza principalmente a través de cuatro rutas metabólicas; la glucólisis, la oxidación del piruvato (ciclo del acetyl-CoA), el ciclo del ácido tricarboxílico (ciclo de Krebs) y la β -oxidación. Esta serie de procesos internos permite la conversión química de los sustratos orgánicos en dióxido de carbono, agua y energía en forma de adenosín trifosfato (ATP). Los microorganismos pueden producir sustancias electroquímicamente activas a través de la fermentación y/o hidrólisis de los sustratos orgánicos. Para realizar este proceso, la materia orgánica es hidrolizada y fermentada en el ánodo de la CCM, donde se produce la bioelectricidad [41]. La ruta de glucólisis es la vía metabólica más común en todo tipo de organismos, incluyendo hongos filamentosos, levaduras y muchos tipos de bacterias que oxidan la glucosa para obtener energía celular. Esta ruta puede funcionar tanto en condiciones aerobias como en anaerobias y se lleva a cabo por una serie de 10 enzimas citoplásmicas. La mayoría de los pasos de la ruta son reversibles, aunque hay tres (los catalizados por las enzimas *hexoquinasa*, *fosfofructoquinasa* y *piruvato quinasa*) que son irreversibles. En los procesos anabólicos hay desvíos metabólicos que evitan estos pasos irreversibles. Como resultado de esta ruta se obtiene una pequeña cantidad de

energía (dos moles de ATP por mol de glucosa) por procesos de fosforilación. En este proceso la glucosa puede ser degradada hasta piruvato y posteriormente es convertida a acetil-CoA [42]. Los procesos de fermentación microbiológica se generan directamente en la cámara anódica de la celda. En este caso, los subproductos de la fermentación de la glucosa como el hidrógeno, metabolitos activos de especies de sulfuros, ácido fórmico, ácido acético y ácido láctico son usados como combustibles y pueden contribuir a la generación de energía [43]. Mientras más complejo sea el sustrato o el carbohidrato a degradar, se requiere una mayor actividad de la glucólisis antes de entrar al ciclo de Krebs. Estos tendrán que ser degradados a azúcares más simples como glucosa y/o fructuosa, además deberán pasar por la misma ruta para formar acetil-CoA y posteriormente el dinucleótido de nicotinamida y adenina en su estado reducido (NADH) servirá como donador de electrones para los diferentes mecanismos de transporte de electrones, donde el aceptor final de electrones será el ánodo. El NADH, la nicotinamida adenina dinucleótido fosfato (NADPH) y el flavín adenín dinucleótido (abreviado FAD en su forma oxidada y FADH₂ en su forma reducida) son generados en el ciclo de Krebs [44]. Estas son moléculas reducidas que representan el donador primario de electrones en la cadena de transporte de electrones a través de una serie de acarreadores que se encuentran entre el citoplasma y el periplasma de la célula. Estos acarreadores incluyen flavoproteínas, proteínas fierro-azufre, “pool” de quinonas y una serie de

citocromos. La cadena de transporte de electrones tiene dos funciones: (1) aceptar los electrones de un donador de electrones y transferir estos electrones al siguiente aceptor y (2) conservar la energía liberada durante la transferencia de electrones para la síntesis del ATP [45]. Las vías a partir de la degradación de ácidos orgánicos de cadena corta (C1-C5) pueden pasar a formar acetil-CoA a través de las actividades de algunas enzimas *deshidrogenasa*. Como ejemplo, aquellas de la última fase de la degradación de ácidos grasos (beta oxidación). Una vez formado el acetil-CoA, este entra en el ciclo Krebs, vía donde se genera el NADH, el cual funciona como reservorio para el exporte extracelular de electrones vía citocromo tipo C. El electrón abandona el centro de reacción y pasa a otra quinona perteneciente al “pool” de quinonas que se encuentra libre en la bicapa lipídica. Esta quinona, una vez reducida forma un quinol, el cual es un buen reductor (donador de electrones). El electrón pasa de la cadena de transporte de electrones al periplasma mediante los citocromos. El citocromo tipo C es de localización periplásmica e inyecta los electrones al ánodo. El funcionamiento de esta cadena transportadora de electrones provoca una translocación de protones fuera de la membrana, o sea, un potencial electroquímico de protones, cuya disipación a favor de las *ATP-sintasas* se traduce en producción de ATP celular. Se asume que tres protones son necesarios para producir una molécula de ATP, aunque recientes investigaciones sugieren que los protones pueden variar entre 3 y 5 átomos

de hidrógeno por cada mol de ATP producida [42]. Estos átomos de hidrógeno removidos de los acarreadores de electrones como el NADH son separados de los electrones. Mientras los electrones son acarreados y transferidos al siguiente aceptor, los átomos de hidrógeno son liberados fuera de la célula o hacia el periplasma. Esta liberación genera una fuerza móvil de protones a través de la membrana celular, en el cual se liberan aproximadamente 10 protones por cada par de electrones derivado del NADH [41].

Con base en estudios realizados con las bacterias *Geobacter sulfurreducens* y *Shewanella oneidensis* se han descrito los mecanismos para el exporte de electrones a partir de NADH. El proceso inicia a partir de una reserva de electrones contenidos en estas moléculas. La enzima reductasa de NADH lo oxida (NAD⁺) para ganar electrones, luego las proteínas transportadoras trasladan los electrones a través de la membrana interna hasta entrar en contacto con la proteína periplásmica tipo citocromo A PpcA-E. Los electrones son transferidos y transportados hacia la membrana externa por MacA, otra proteína transportadora. Después los complejos OmaB/C, OmbB/C y OmcB/C exportan los electrones hacia el exterior de la membrana donde son recibidos por las proteínas de citocromo tipo C (OmcE) en la superficie de membrana y los OmcS son adheridos en los pili. Finalmente, los electrones son transferidos hacia el ánodo por estas proteínas. Los mecanismos de exporte de electrones de *Shewanella oneidensis*, a diferencia de

Geobacter sulfurreducens, involucran a la proteína citocromo C CymA, que recibe los electrones desde el reservorio de quinonas y los direcciona al complejo Mtr A, B y C donde son expulsados hacia el exterior de la membrana externa hasta las proteínas OmcA. Una vez ahí, los electrones pueden transferirse directamente al ánodo o por medio de mediadores endógenos como las flavinas [46]. Como se ha descrito anteriormente, la biotecnología describe de forma contundente los fenómenos que se llevan a cabo en los microorganismos dentro de los dispositivos de CCM, principalmente la producción y disposición de los electrones [47]. En otro aspecto, el estudio de las variables de operación como la temperatura, pH, oxígeno, salinidad, sustrato, toxicidad, entre otras, también ha sido fundamental para conocer el ambiente que necesitan los microorganismos para producir bioelectricidad [48]. En conjunto, estas líneas de investigación contribuyen significativamente a la comprensión del funcionamiento complejo de esta tecnología (Figura 2).

Arquitectura y materiales empleados en celdas de combustible microbianas

Existen diversas configuraciones, tipos de flujo y formas de operación empleados en el estudio de las CCM. Su configuración es relativamente simple, esta consta principalmente de contenedores cilíndricos y rectangulares fabricados con materiales como acrílico, plástico o fibra de vidrio [49]. Los tipos de flujo que se utilizan son de tipo ascendente, descen-

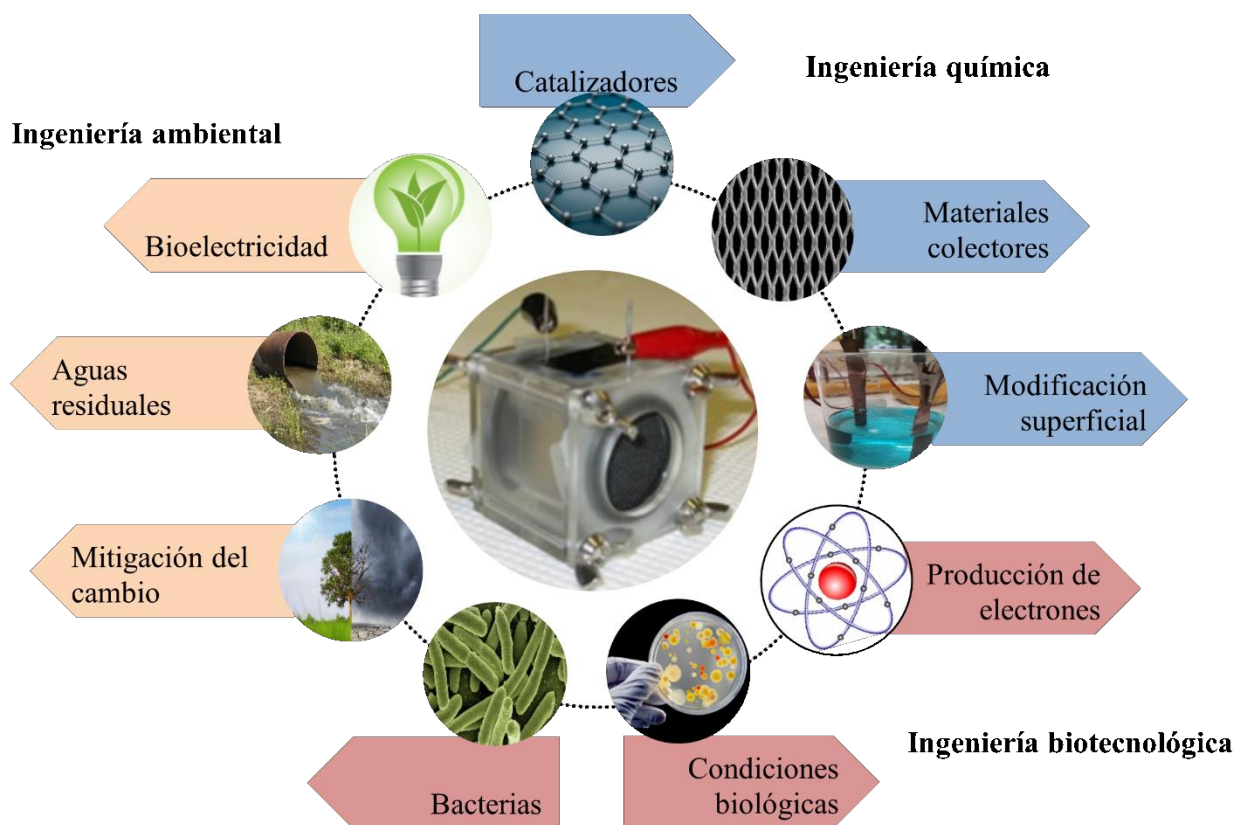


Figura 2. Ramas de la investigación enfocadas al estudio de las CCM.

dente, superficial y mezclado [50]. La forma de operación se clasifica de acuerdo con el sistema de alimentación, de estos existen los tipos continuo e intermitente. El tipo continuo consiste en tener un aporte de materia orgánica constante como sustrato. El tipo intermitente se refiere a alimentar las CCM por un tiempo determinado. Una vez que el sustrato es consumido completamente por las bacterias, las CCM son nuevamente alimentadas [51]. Para que los diseños de una CCM sean rentables, deben considerarse factores como: el funcionamiento a largo plazo, facilidad de manejo y respeto al entorno ambiental [52]. Aún falta realizar diseños de configuraciones que resuelvan algunos problemas que enfrenta

esta tecnología, principalmente el aumento de la resistencia interna, que se refiere a la pérdida de electrones en el circuito eléctrico [53]. Se utiliza una gran variedad de electrodos en las CCM, entre muchos materiales se destacan los electrodos de carbón, por ejemplo: la tela de carbón, escobilla de carbón, barra de carbón, malla de carbón, velo de carbón, papel carbón, fieltro de carbón, carbón activado granular, grafito granular, placa de grafito y carbón vítreo [54]. Dentro de los electrodos metálicos se ha utilizado: placa de acero inoxidable, malla de acero inoxidable, lámina de plata, lámina de níquel, lámina de cobre, lámina de oro, lámina de latón y placa de titanio. La tela de carbón es un material que se utiliza con mucha frecuencia

como ánodo. Este electrodo garantiza una amplia área de superficie con porosidad relativamente alta, cuenta con elevada conductividad eléctrica, así como flexibilidad y resistencia mecánica [55]. El fieltro de carbón es quizá el material más utilizado. Igualmente cuenta con una alta porosidad y conductividad eléctrica, el tamaño de los poros grandes permite una mayor área de contacto con las bacterias. El costo es relativamente bajo y la resistencia química-mecánica es alta dependiendo del grosor del material [56]. Conocer las interacciones entre bacteria-ánodo es fundamental para optimizar las arquitecturas del ánodo. Algunos factores que pueden afectar estas interacciones son: la rugosidad superficial, la química superficial, el tipo de material, la porosidad y la hidrofobicidad [57]. El carbón es un material muy utilizado por su compatibilidad, durabilidad y conductividad prolongada, además exhibe varias morfologías y estructuras para el diseño de electrodos eficientes. Con este tipo de materiales se desea promover una mejor unión con las bacterias, lo que proporciona una mejor vía conductiva para el transporte de los electrones [58].

Aplicaciones prácticas de las celdas de combustible microbianas

La implementación de las CCM en el ámbito industrial resulta ser atractivo, ya que los residuos orgánicos pueden convertirse en bioelectricidad, reduciendo los costos del tratamiento de residuos y una parte de la energía utilizada [59]. Los intentos por implementar las

CCM a escala industrial han tenido un éxito moderado, ya que su rendimiento y sus altos costos siguen siendo un desafío por superar [60]. Las principales aplicaciones de las CCM pueden ser de diagnóstico, tratamiento y recuperación de energía. En el primer caso, existe una gran cantidad de evidencia experimental que demuestra la efectividad de las CCM para identificar contaminantes recalcitrantes como los fármacos, o algunos metales sumamente tóxicos como el arsénico, que en su forma inorgánica representa un gran problema de salud mundial debido a la utilización de agua contaminada para beber, preparación alimentos y riego de cultivos [61]. Para el caso de la remoción, muchos estudios con CCM han demostrado altas eficiencias en la remoción de contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos [62]. En el último caso, algunos estudios de factibilidad han considerado la implementación de las CCM para la reducción en el consumo de energía en plantas de tratamiento de aguas residuales, ya que algunas configuraciones como el apilamiento o la interconexión en serie pueden incrementar considerablemente el rendimiento bioenergético [63].

Actualmente, la producción de bioelectricidad es la aplicación más investigada, debido a la baja potencia eléctrica que se produce, pero la investigación no debe limitarse únicamente a dos aspectos (la generación de bioelectricidad y el tratamiento de aguas residuales) [64]. Con el rendimiento actual, las CCM se pueden utilizar en sistemas de bajo consumo de energía, como los biosensores, los cuales son herramientas

electrónicas utilizadas para la medición de parámetros biológicos [65]. Otra de las posibles aplicaciones, es que las CCM pueden producir bioelectricidad a partir de cuerpos de aguas naturales por la actividad fotosintética, por lo tanto, estas podrían implementarse en jardines acuáticos [66]. Las CCM también presentan otras aplicaciones prácticas como la producción de biocombustibles (biohidrógeno y biometano), bioproductos (bioetanol), la

desalinización del agua y la recuperación de metales (Figura 3). Con la creciente demanda energética en los últimos años, el proceso de electrificación progresa de manera acelerada y la tecnología de CCM podría convertirse en un pilar de la economía dentro del campo de la sustentabilidad si el sector industrial apuesta por la inversión para el mejoramiento de estos dispositivos y sus aplicaciones [67]. Para la

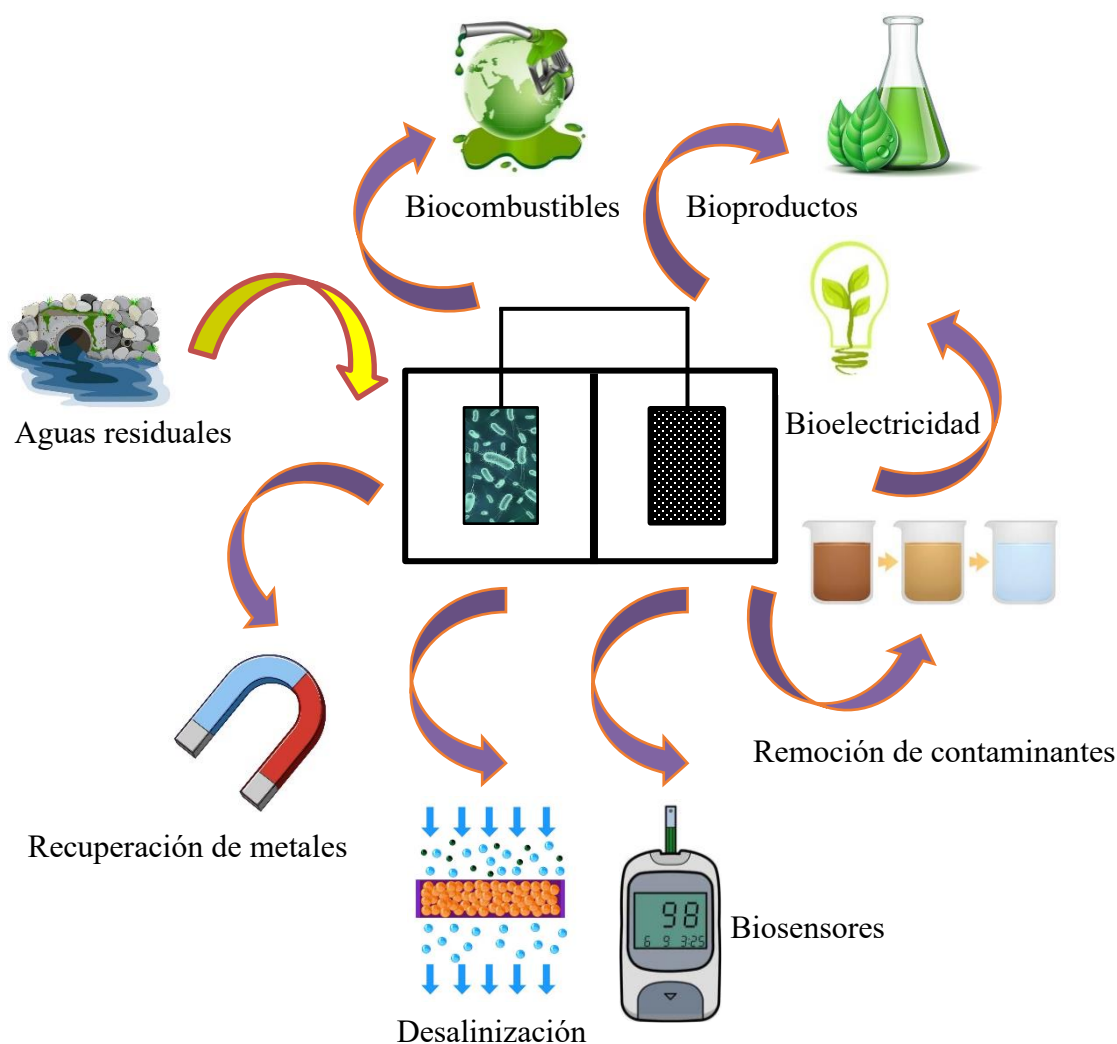


Figura 3. Aplicaciones prácticas de la tecnología de CCM.

comercialización industrial, se requiere de la invención de nuevos materiales que proporcionen una opción prometedora para la generación de bioelectricidad rentable [68]. Se puede ver que varias unidades y procesos asociados con las CCM están siendo sometidos a una investigación intensiva para mejorar su rendimiento, con el objetivo final de llevar esta tecnología al mercado para su implementación y comercialización real, esto debido al enorme alcance de esta tecnología y al amplio mercado potencial que tiene [69].

CONCLUSIONES

Las CCM presentan propiedades y características con un alto potencial de aplicación industrial, y no solo eso, también es una tecnología que podría contribuir en gran medida a disminuir las afectaciones ambientales de contaminación energética. Los avances científicos muestran indicios un amplio panorama de desarrollo tecnológico a partir de recursos inagotables, promoviendo la sustentabilidad energética. La investigación actual debe centrarse en la producción de materiales que disminuyan los costos de fabricación y en la evaluación de las condiciones biológicas en el ánodo para obtener un mayor rendimiento electroquímico por parte de las bacterias electroactivas. Actualmente continúan los estudios de la ingeniería química, ambiental y biotecnológica, los cuales prometen incrementar la bioelectricidad generada. Además de los aspectos mencionados, esta tecnología ha incursionado

en el tratamiento de contaminantes recalcitrantes, cuyos estudios esperan mejorar las eficiencias de remoción. En cuanto se resuelvan estas problemáticas, las CCM podrían posicionarse en el mercado de la energía limpia y la biorremediación como una tecnología de innovación biotecnológica.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran la ausencia de conflicto de interés.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) y a la Universidad Politécnica del Estado de Morelos (Upemor).

REFERENCIAS

- [1]. Apollon W. An overview of microbial fuel cell technology for sustainable electricity production. *Membranes*. 2023; 13(11): 884. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/membranes13110884>
- [2]. Cao Y, Mu H, Liu W, Zhang R, Guo J, Xian M, *et al*. Electricigens in the anode of microbial fuel cells: pure cultures versus mixed communities. *Microb. Cell Fact.* 2019; 18: 1-14. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s12934-019-1087-z>
- [3]. Naha A, Debroy R, Sharma D, Shah MP, Nath S. Microbial fuel cell: A state-of-the-art and revolutionizing technology for efficient

energy recovery. CLCB. 2023; 5: 100050. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2023.100050>

[4]. Wang H, Park JD, Ren ZJ. Practical energy harvesting for microbial fuel cells: a review. Environ. Sci. Technol. 2015; 49(6): 3267-3277. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/es5047765>

[5]. Xu L, Zhao Y, Doherty L, Hu Y, Hao X. The integrated processes for wastewater treatment based on the principle of microbial fuel cells: a review. Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 2016; 46(1): 60-91. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1061884>

[6]. Dincer I. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. Renew. Sustain. Energy Rev. 2000; 4(2): 157-175. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00011-8)

[7]. Rahimnejad M, Ghoreyshi AA, Najafpour GD, Younesi H, Shakeri M. A novel microbial fuel cell stack for continuous production of clean energy. Int. J. Hydrogen Energy. 2012; 37(7): 5992-6000. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.154>

[8]. Nie J, Sun Y, Zhou Y, Kumar M, Usman M, Li J, *et al*. Bioremediation of water containing pesticides by microalgae: Mechanisms, methods, and prospects for future research. Sci. Total Environ. 2020; 707: 136080. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136080>

[9]. Viridis B, Read ST, Rabaey K, Rozendal

RA, Yuan Z, Keller J. Biofilm stratification during simultaneous nitrification and denitrification (SND) at a biocathode. Bioresour. Technol. 2011; 102(1): 334-341. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.155>

[10]. Yu J, Seon J, Park Y, Cho S, Lee T. Electricity generation and microbial community in a submerged-exchangeable microbial fuel cell system for low-strength domestic wastewater treatment. Bioresour. Technol. 2012; 117: 172-179. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.078>

[11]. Zhuang L, Zheng Y, Zhou S, Yuan Y, Yuan H, Chen Y. Scalable microbial fuel cell (MFC) stack for continuous real wastewater treatment. Bioresour. Technol. 2012; 106: 82-88. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.019>

[12]. Zhuang L, Yuan Y, Wang Y, Zhou S. Long-term evaluation of a 10-liter serpentine-type microbial fuel cell stack treating brewery wastewater. Bioresour. Technol. 2012; 123: 406-412. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.038>

[13]. Guadarrama-Pérez O, Gutiérrez-Macías T, García-Sánchez L, Guadarrama-Pérez VH, Estrada-Arriaga EB. Recent advances in constructed wetland-microbial fuel cells for simultaneous bioelectricity production and wastewater treatment: a review. Int. J. Energy Res. 2019; 43(10): 5106-5127. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/er.4496>

[14]. Ge Z, Wu L, Zhang F, He Z. Energy extraction from a large-scale microbial fuel cell

system treating municipal wastewater. J. Power Sources. 2015; 297: 260-264. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.07.105>

[15]. O'Brien JP, Malvankar NS. A simple and low-cost procedure for growing *Geobacter sulfurreducens* cell cultures and biofilms in bioelectrochemical systems. Curr. Protoc. Microbiol. 2016; 43: 1-27. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/cpmc.20>

[16]. Kracke F, Vassilev I, Kromer JO. Microbial electron transport and energy conservation - the foundation for optimizing bioelectrochemical systems. Front. Microbiol. 2015; 6: 1-18. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00575>

[17]. Sydow A, Krieg T, Mayer F, Schrader J, Holtmann D. Electroactive bacteria-molecular mechanisms and genetic tools. Appl. Microbiol. Biotechnol. 2014; 98: 8481-8495. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00253-014-6005-z>

[18]. Thapa BS, Kim T, Pandit S, Song YE, Afsharian YP, Rahimnejad M, *et al*. Overview of electroactive microorganisms and electron transfer mechanisms in microbial electrochemistry. Bioresour. Technol. 2022; 347: 126579. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126579>

[19]. Bond DR, Lovley DR. Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes. Appl. Environ. Microbiol. 2003; 69: 1548-1555. Disponible en: <https://doi.org/10.1128/AEM.69.3.1548-1555.2003>

[20]. Meehan A, Gao H, Lewandowski Z. Energy harvesting with microbial fuel cell and power management system. IEEE Trans. Power Electron. 2011; 26(1): 176-181. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2054114>

[21]. Santoro C, Arbizzani C, Erable B, Ieropoulos I. Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. J. Power Sources. 2017; 356: 225-244. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.109>

[22]. Guo K, PrévotEAU A, Patil SA, Rabaey K. Engineering electrodes for microbial electrocatalysis. Curr. Opin. Biotechnol. 2015; 33: 149-156. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2015.02.014>

[23]. Rinaldi A, Mecheri B, Garavaglia V, Licoccia S, Di Nardo P, Traversa E. Engineering materials and biology to boost performance of microbial fuel cells: a critical review. Energy Environ. Sci. 2008; 1(4): 417-429. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/B806498A>

[24]. Ren S, Xia X, Yuan L, Liang P, Huang X. Enhancing charge harvest from microbial fuel cells by controlling the charging and discharging frequency of capacitors. Bioresour. Technol. 2013; 146: 812-815. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.055>

[25]. Logan BE, Rossi R, Ragab AA, Saikaly PE. Electroactive microorganisms in bioelectrochemical systems. Nat. Rev. Microbiol. 2019; 17(5): 307-319. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0173-x>

- [26]. Wang H, Ren ZJ. A comprehensive review of microbial electrochemical systems as a platform technology. *Biotechnol. Adv.* 2013; 31(8): 1796-1807. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.10.001>
- [27]. Logan BE. Scaling up microbial fuel cells and other bioelectrochemical systems. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2010; 85(6): 1665-1671. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2378-9>
- [28]. Selim HM, Kamal AM, Ali DM, Hassan RY. Bioelectrochemical systems for measuring microbial cellular functions. *Electroanalysis.* 2017; 29(6): 1498-1505. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/elan.201700110>
- [29]. Lovley DR. Bug juice: harvesting electricity with microorganisms. *Nat. Rev. Microbiol.* 2006; 4(7): 497-508. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/nrmicro1442>
- [30]. Song HL, Zhu Y, Li J. Electron transfer mechanisms, characteristics and applications of biological cathode microbial fuel cells—A mini review. *Arab. J. Chem.* 2015; 12(8): 2236-2243. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.01.008>
- [31]. Erable B, Lacroix R, Etcheverry L, Féron D, Délia ML, Bergel A. Marine floating microbial fuel cell involving aerobic biofilm on stainless steel cathodes. *Bioresour. Technol.* 2013; 142: 510-516. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.05.063>
- [32]. Kondaveeti SK, Seelam JS, Mohanakrishna G. Anodic electron transfer mechanism in bioelectrochemical systems. *MFC.* 2018; 1: 87-100. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66793-5_5
- [33]. Sawant S, Han T, Cho M. Metal-free carbon-based materials: promising electrocatalysts for oxygen reduction reaction in microbial fuel cells. *Int. J. Mol. Sci.* 2016; 18(1): 25. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijms18010025>
- [34]. Ruiz V, Ilhan ZE, Kang DW, Krajmalnik-Brown R, Buitrón G. The source of inoculum plays a defining role in the development of MEC microbial consortia fed with acetic and propionic acid mixtures. *J. Biotechnol.* 2014; 182: 11-18. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2014.04.016>
- [35]. Schröder U, Harnisch F, Angenent LT. Microbial electrochemistry and technology: terminology and classification. *Energy Environ. Sci.* 2015; 8(2): 513-519. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/C4EE03359K>
- [36]. Chang IS, Moon HS, Bretschger O, Jang JK, Park HI, Neilson KH, Kim BH. Electrochemically active bacteria (EAB) and mediator-less microbial fuel cells. *J. Microbiol. Biotechnol.* 2006; 16(2): 163-177. Disponible en: <https://www.dbpia.co.kr/Journal/articleDetail?nodeId=NODE09075226>
- [37]. Leech D, Kavanagh P, Schuhmann W. Enzymatic fuel cells: Recent progress. *Electrochim. Acta.* 2012; 84: 223-234. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.02.087>
- [38]. Rabaey K, Rodriguez J, Blackall LL, Keller J, Gross P, Batstone D, *et al.* Microbial

ecology meets electrochemistry: electricity-driven and driving communities. ISME. 2007; 1(1): 9-18. Disponible en:

<https://doi.org/10.1038/ismej.2007.4>

[39]. Kumar A, Hsu LHH, Kavanagh P, Barrière F, Lens PN, Lapinonnière L, Leech D. The ins and outs of microorganism–electrode electron transfer reactions. Nat. Rev. Chem. 2017; 1(3): 0024. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41570-017-0024>

[40]. Torres CI, Marcus AK, Lee HS, Parameswaran P, Krajmalnik-Brown R, Rittmann BE. A kinetic perspective on extracellular electron transfer by anode-respiring bacteria. FEMS Microbiol. Rev. 2010; 34(1): 3-17. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2009.00191.x>

[41]. Lovley DR. The microbe electric: conversion of organic matter to electricity. Curr. Opin. Biotechnol. 2008; 19(6): 564-571. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2008.10.005>

[42]. Liu D, Zeng RJ, Angelidaki I. Hydrogen and methane production from household solid waste in the two-stage fermentation process. Water Res. 2006; 40(11): 2230-2236. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.03.029>

[43]. Argun H, Kargi F, Kapdan IK. Microbial culture selection for bio-hydrogen production from waste ground wheat by dark fermentation. Int. J. Hydrogen Energy. 2009; 34(5): 2195-2200. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.12.066>

[44]. Ntaikou I, Antonopoulou G, Lyberatos G. Biohydrogen production from biomass and wastes via dark fermentation: a review. Waste Biomass Valorization. 2010; 1(1): 21-39. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12649-009-9001-2>

[45]. Nakanishi-Matsui M, Futai M. Stochastic rotational catalysis of proton pumping F-ATPase. Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci. 2008; 363(1500): 2135-2142. Disponible en: <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.2266>

[46]. Fan B, Carvalhais LC, Becker A, Fedoseyenko D, Wirén N, Borriß R. Transcriptomic profiling of *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42 in response to maize root exudates. BMC Microbiol. 2012; 12(1): 116. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/1471-2180-12-116>

[47]. Wang H, Ren Z. Bioelectrochemical metal recovery from wastewater: A review. Water Res. 2014; 66: 219-232. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.013>

[48]. Hamelers HVM, Heijne AT, Sleutels THJA, Jeremiasse AW, Strik DPBTB, Buisman CJN. New applications and performance of bioelectrochemical systems. Appl. Microbiol. Biotechnol. 2010; 85(6): 1673-1685. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2357-1>

[49]. Borja-Maldonado F, Zavala MAL. Contribution of configurations, electrode and membrane materials, electron transfer mechanisms, and cost of components on the current and future development of microbial fuel cells. Heliyon. 2022; 8(7): e09849.

Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09849>

[50]. Leong JX, Daud WRW, Ghasemi M, Liew KB, Ismail M. Ion exchange membranes as separators in microbial fuel cells for bioenergy conversion: a comprehensive review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013; 28: 575-587. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.052>

[51]. Rossi R, Evans PJ, Logan BE. Impact of flow recirculation and anode dimensions on performance of a large scale microbial fuel cell. *J. Power Sources.* 2019; 412: 294-300. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.11.054>

[52]. Rahimnejad M, Ghoreyshi AA, Najafpour G, Jafary T. Power generation from organic substrate in batch and continuous flow microbial fuel cell operations. *Appl. Energy.* 2011; 88(11): 3999-4004. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.017>

[53]. Du Z, Li H, Gu T. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnol. Adv.* 2007; 25(5): 464-482. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.05.004>

[54]. Logan BE, Hamelers B, Rozendal R, Schröder U, Keller J, Freguia S, *et al*. Microbial fuel cells: Methodology and technology. *Environ. Sci. Technol.* 2006; 40(17): 5181-5192. Disponible en:
<https://doi.org/10.1021/es0605016>

[55]. Rimboud M, Pocaznoi D, Erable B, Bergel A. Electroanalysis of microbial anodes for bioelectrochemical systems: basics, progress and perspectives. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2014; 16(31): 16349-16366. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/C4CP01698J>

[56]. Mustakeem M. Electrode materials for microbial fuel cells: nanomaterial approach. *Mater. Renew. Sustain. Energy.* 2015; 4: 1-11. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s40243-015-0063-8>

[57]. Epifanio M, Inguva S, Kitching M, Mosnier JP, Marsili E. Effects of atmospheric air plasma treatment of graphite and carbon felt electrodes on the anodic current from *Shewanella* attached cells. *Bioelectrochemistry.* 2015; 106: 186-193. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2015.03.011>

[58]. Ren Z, Yan H, Wang W, Mench MM, Regan JM. Characterization of microbial fuel cells at microbially and electrochemically meaningful time scales. *Environ. Sci. Technol.* 2011; 45(6): 2435-2441. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/es103115a>

[59]. Degrenne N, Buret F, Allard B, Bevilacqua P. Electrical energy generation from a large number of microbial fuel cells operating at maximum power point electrical load. *J. Power Sources.* 2012; 205: 188-193. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.01.082>

[60]. Deeke A, Sleutels TH, Hamelers HVM,

Buisman CJN. Capacitive bioanodes enable renewable energy storage in microbial fuel cells. *Environ. Sci. Technol.* 2012; 46(6): 3554-3560. Disponible en:

<https://doi.org/10.1021/es204126r>

[61]. Roy H, Rahman TU, Tasnim N, Arju J, Rafid MM, Islam MR, Islam MS. Microbial fuel cell construction features and application for sustainable wastewater treatment. *Membranes.* 2023; 13(5): 490. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/membranes13050490>

[62]. Boas JV, Oliveira VB, Simões M, Pinto AM. Review on microbial fuel cells applications, developments and costs. *J. Environ. Manage.* 2022; 307: 114525. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114525>

[63]. Nawaz A, Ul Haq I, Qaisar K, Gunes B, Raja SI, Mohyuddin K, *et al*. Microbial fuel cells: Insight into simultaneous wastewater treatment and bioelectricity generation. *Process Saf. Environ. Prot.* 2022; 161: 357-373. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.03.039>

[64]. Guo Y, Wang J, Shinde S, Wang X, Li Y, Dai Y, *et al*. Simultaneous wastewater treatment and energy harvesting in microbial fuel cells: an update on the biocatalysts. *RSC Adv.* 2020; 10: 25874–25887. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/D0RA05234E>

[65]. Fan Y, Hu H, Liu H. Enhanced coulombic efficiency and power density of air-cathode microbial fuel cells with an improved cell configuration. *J. Power Sources.* 2007; 171(2): 348-354. Disponible en:

<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.06.220>

[66]. Rozendal RA, Hamelers HV, Rabaey K, Keller J, Buisman CJ. Towards practical implementation of bioelectrochemical wastewater treatment. *Trends Biotechnol.* 2008; 26(8): 450-459. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2008.04.008>

[67]. Greenman J, Thorn R, Willey N, Ieropoulos I. Energy harvesting from plants using hybrid microbial fuel cells; potential applications and future exploitation. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2024; 12: 1276176. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1276176>

[68]. Jadhav DA, Mungray AK, Arkatkar A, Kumar SS. Recent advancement in scaling-up applications of microbial fuel cells: From reality to practicability. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2021; 45: 101226. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101226>

[69]. Wang J, Ren K, Zhu Y, Huang J, Liu S. A review of recent advances in microbial fuel cells: preparation, operation, and application. *BioTech.* 2022; 11(4): 44. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/biotech11040044>