

Celdas microbianas de combustible: Fundamentos y aplicaciones.

Acero Páez Laura Andrea¹ Gaviria Arias Duverney².

RESUMEN

En este documento se establecen los aspectos de mayor importancia que incide sobre una celda microbiana de combustible (MFC), tratando temáticas tales como el metabolismo y el proceso de generación de energía por parte de microorganismos electrogénicos, la arquitectura, aplicaciones y limitación de este producto biotecnológico. En el último siglo, estos sistemas bioelectroquímicos han sido de gran interés en la investigación debido a que la bioenergía es una energía renovable que desempeña un papel vital en la creciente demanda energética actual y las MFC pueden utilizar diversos sustratos tanto sólidos (compuestos orgánicos, lodos, sedimentos marinos, subproductos agroindustriales) como líquidos (aguas residuales, orina). La celda microbiana de combustible ofrece la posibilidad de convertir compuestos orgánicos en electricidad mediante el metabolismo de dichos microorganismos al crear subproductos, entre los que están diferentes iones que son liberados hacia el medio extracelular. En estos dispositivos se coloca un electrodo como aceptor final para captar los electrones que liberan los microorganismos al degradar la materia orgánica. Este artículo busca establecer parámetros básicos de lo que son los microorganismos electrogénicos y su aplicación en la creación de baterías de combustible microbiano.

Palabras clave: Bioelectrogénesis, metabolismo, microorganismos, biodegradación, celda de combustible microbiana.

1. Estudiante programa de Microbiología. Facultad de Ciencias de la Salud, Exactas y Naturales. Universidad Libre Pereira. Correo electrónico: lauraa-acerop@unilibre.edu.co
2. Profesor programa de Microbiología. Facultad de Ciencias de la Salud, Exactas y Naturales. Universidad Libre Pereira. Correo electrónico: duverney.gaviria@unilibre.edu.co

Microbial Fuel Cells: Fundamentals and Applications

ABSTRACT

This document establishes the most important aspects that affect a microbial fuel cell (MFC), dealing with topics such as the metabolism and the process of generating energy by electrogenic microorganisms, the architecture, applications and limitations of this product. biotechnological In the last century, these bioelectrochemical systems have been of great interest in research because bioenergy is a renewable energy that plays a vital role in today's growing energy demand and MFCs can use various substrates, both solid (organic compounds, sludge, marine sediments, agroindustrial by-products) and liquids (wastewater, urine). The microbial fuel cell offers the possibility of converting organic compounds into electricity through the metabolism of said microorganisms by creating by-products, among which are different ions that are released into the extracellular medium. In these devices, an electrode is placed as the final acceptor to capture the electrons released by microorganisms when degrading organic matter. This article seeks to establish basic parameters of what electrogenic microorganisms are and their application in the creation of microbial fuel batteries.

Key words: Bioelectrogenesis, metabolism, microorganisms, biodegradation, microbial fuel cell

INTRODUCCIÓN

La energía es uno de los recursos naturales de mayor importancia para la humanidad, ya que es el elemento necesario para el crecimiento económico, uso de tecnologías, desarrollo sostenible, seguridad y para diversos procesos de bienestar. A nivel mundial se busca que haya un acceso a este recurso de manera permanente para lo cual se tiene que tomar en cuenta diversos factores sociales, infraestructurales, tecnológicos, sus fuentes limitadas, la eficiencia y la economía (1). La crisis energética es la escasez de manera repentina de cualquier suministro energético en donde hay un alza en los valores de este, generando así, un receso económico a nivel mundial. Para la mayoría de los países, la principal expectativa en materia de energía es reducir la dependencia externa para el suministro de energía, aumentar el porcentaje de fuentes de energía renovables en la producción, proteger los ecosistemas y ahorrar costos, teniendo en cuenta sus condiciones geográficas y estratégicas; creando así una perceptiva global en donde se estimule la identificación de alternativas energéticas estratégicas (2).

En el 2020 se determinó que en Latinoamérica se habían establecido más de 3000 plantas de energía alternativa renovable las cuales fueron principalmente: eólica en México; generación de biomasa en Uruguay; eólica terrestre en Argentina; solar fotovoltaica y termosolar en Chile, solar fotovoltaica, eólica marina, costa afuera y terrestre en Brasil (3). En Colombia

se están estableciendo nuevos proyectos energéticos como hidroelectricidad, gasificación, licuación de carbones (4) y de igual manera se está invirtiendo recursos para la investigación de potenciales energéticos renovables.

Una de las estrategias evaluadas son las celdas microbianas de combustible (MFCs), las cuales corresponden a un producto biotecnológico emergente el cual podría contribuir a solucionar uno de los problemas más críticos que afronta la sociedad actual, la crisis energética. Las MFCs son dispositivos compuestos de dos electrodos, un ánodo y un cátodo, en donde los microorganismos se alimentan de una fuente de carbono orgánica convirtiendo esta energía química en energía eléctrica (microorganismos electrogénicos). Esta energía es transferida a electrodos donde es ella es recolectada y utilizada. Se han identificado de igual manera que este tipo de dispositivos pueden ser usadas para procesos de biorremediación donde los microorganismos reducen ciertos compuestos y los vuelven más amigables con el ambiente mientras producen energía eléctrica (5).

- **Microorganismos electrogénicos:**

La primera descripción de microorganismos electrogénicos se realizó en 1911 por el botánico Michael Cresse Potter el cual realizó los primeros experimentos en donde se empleó *Saccharomyces cerevisiae* para la fabricación de una celda microbiana de

combustible (MFC) allí se identificó que los compuestos orgánicos se descomponían mediante la actividad fermentativa de esta levadura. Se estableció, finalmente, que la desintegración de los compuestos orgánicos por parte de los microorganismos se ve acompañada por la liberación de energía eléctrica, donde los efectos eléctricos son una expresión de la actividad de los microorganismos y están influidos por la temperatura, la concentración del medio nutritivo, las condiciones favorables a la actividad protoplásmica y el número de organismos activos (6).

En la actualidad el modelo bacteriano de microorganismo electrogénico corresponde a la bacteria Gram negativa y anaerobia *Geobacter metallireducens*, este es el primer microorganismo del que se tiene constancia que produce electricidad, reconociéndose como el más eficaz en la generación de tal reacción, en esta el microorganismo es capaz de utilizar como sustrato oxidativo, ácidos grasos, alcoholes y compuestos monoaromáticos y usa óxidos de hierro como aceptor de electrones; adicionalmente, se ha identificado que esta reacción es de gran importancia en el ciclo del carbono y ha sido utilizada muchas ocasiones en procesos de biorremediación (7).

Otros de los microorganismos, identificados, con alto poder electrogénico encontramos las bacterias *Shewanella loihica* y *Shewanella oneidensis* las cuales se encuentran principalmente en aguas

hidrotermales, lagos, ríos, profundidades del océano, sedimentos y suelos bajo condiciones de temperaturas entre los 0°C y los 42°C. Estos microorganismos reducen hierro, plata, uranio, manganeso, Cr(VI), el NO_3^- , Cloroetenos, 2-clorofenol y ClO_4^- (8). Se ha identificado que el mecanismo de transporte de electrones es a lo largo de los nanocables y el pili donde hay una combinación de salto de electrones y difusión de citocromos (9). El citocromo durante la respiración anaerobia de $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ y el metabolismo de materia orgánica, principalmente lactato, cuando el óxido de Fe_{3+} (agente oxidante) se encuentra en solución coloidal producen altas corrientes eléctricas que son excretadas por esta estructura celular (10).

Sin embargo, no son los únicos microorganismos con estas actividades, los 4 filos mayormente presentes son Proteobacterias, Actinobacteria, Firmicutes y Bacteroidetes; por ejemplo, se han descubierto bacterias anaerobias facultativas de los géneros *Aeromonas*, *Acinetobacter*, *Azospirillum*, *Arcobacter*, *Alcaligenes*, *Brevundimonas*, *Comamonas*, *Dysgonomonas*, *Enterococcus*, *Firmicutes*, *Fluviicola*, *Hydrogenophaga*, *Ochrobactrum*, *Papillibacter*, *Pseudochrobactrum*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas alcaliphila*, *Rhodococcus*, *Rhodoferax ferrireducens*, *Shinella*, *Stenotrophomonas*, *Trichococcus pasteurii* y *Xanthomonadaceae* (11), que también realizan el proceso de electrogénesis (12).

En 2018 se identificó que en el intestino de los vertebrados de sangre caliente se encuentran comunidades microbianas que producen altas cantidades de energía a través de un sistema que usa el mononucleótido de flavina (9). Este sistema ha sido también reportado en microorganismos patógenos como *Listeria*, *Clostridium* (13), *Enterococcus*, *Streptococcus* y en microorganismos probióticos como *Lactobacilos*, todos microorganismos han encontrado una forma de sobrevivir basados en este método, transfiriendo así electrones al exterior (14). Por ejemplo, se ha descrito que *Escherichia coli* entero hemorrágica presenta una proteína denominada EspP la cual actúa como enterotoxina e impulsa el transporte electrogénico de iones (15). En 2021 se usó un co-cultivo definido de *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa* para mejorar la generación de energía en las pilas de combustible, al cultivo se le evaluaron parámetros como: consumo de sustrato, la formación de biopelículas y la actividad de transferencia microbiana de electrones, posteriormente se inoculó con el alga fotosintética *Chlorella vulgaris* en la cámara catódica estos cultivos mejoraron la densidad de potencia media de 175 mW m² a 248 mW m², aumentando un 41,7 % (16).

Se ha identificado que los microorganismos que llevan a cabo este proceso de electrogénesis o quimiósmosis requiere un medio el cual sea anaerobio, de igual manera que exista una alta concentración de material orgánica donde se realice una

descomposición de los compuestos de carbono orgánico o inorgánico a partir de un proceso catabólico de fermentación mediado por el citocromo C presentes en la membrana celular, generando como subproductos CO₂, H₂O y electrones (17)(18). En la medida que estas cargas adicionales interfieren con algunos procesos metabólicos, el microorganismo no puede conservar o retener cierta cantidad de electrones dentro de su membrana (19). El manejo de este exceso de electrones es llevado a cabo con sistemas de transferencia de electrones como enzimas y compuestos redox, los cuales transfieren los electrones, sin embargo, este proceso requiere la presencia de un aceptor de electrones, como Fe⁺² o un electrodo que se encarga de tomar los electrones producidos por el microorganismo generando así corrientes eléctricas los cuales se mueven desde el ánodo a un cátodo separado físicamente (7) (9).

- **Celdas microbianas de combustible (MFCs):**

La celda de combustible o MFC, pila de combustible microbiana (PCM), fuel cell o celdas de energía microbiana, es un producto biotecnológico el cual corresponde a un biorreactor, el cual alberga la oxidación de un combustible orgánico catalizado por microorganismos electrogénicos (20), lo que genera como producto final energía, H₂O y CO₂; en estas se utilizan una fuente externa principalmente hidrógeno, oxígeno o metanol (21) (22).

Estas celdas están conformadas por dos compartimientos un ánodo y un cátodo; los cuales están separados físicamente o por una membrana semipermeable para los iones con carga positiva (23). En el ánodo se aloja un electrodo, allí se encuentra la materia orgánica (compuestos orgánicos, aguas residuales, lodos, orina, sedimentos marinos, subproductos agroindustriales, etc.) la cual es descompuesta por los microorganismos electrogénicos (cultivo puro o sociedad) y estos generan electrones y protones en condiciones de anaerobiosis, este medio se enriquece con diversos monosacáridos o medios de cultivo principalmente agar nutritivo (24). Para el electrodo que se encuentra en el cátodo se ha empleado principalmente el oxígeno como oxidante debido a su abundancia y alto potencial de reducción, el cual presenta una posibilidad de utilizar oxidantes metálicos (U, Cd, Cr, Cu) que pueden reducirse a un estado de oxidación menos tóxico (25); de igual manera el cátodo debe estar dentro de una solución química como un tampón fosfato principalmente compuesto por H₂O y NaCl allí es en donde se produce la reducción de un aceptor de electrones donde los electrones producidos son transferidos mediante un circuito electrónico externo y los protones atraviesan la membrana hacia el otro compartimiento (12), estas cargas eléctricas se consumen en conjunto con el oxígeno presente en el cátodo y forman H₂O, en este compartimiento se debe tener un control del pH (26); tal como se representa en la figura 1.

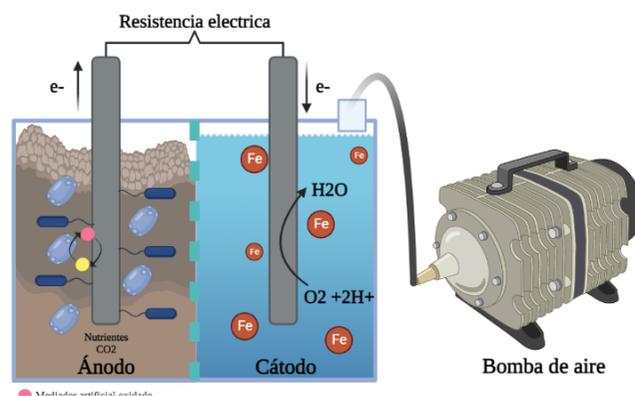


Figura 1: Estructura de una celda microbiana de combustible a partir de sedimentos. Fuente: Propia creado con BioRender.com

MATERIALES DE LOS ELECTRODOS

Los materiales estructurales de la MFC juegan un papel fundamental en su aplicación, ya que la arquitectura, los materiales elegidos y la geometría del equipo afectan significativamente rendimiento y en el coste por unidad. Se busca poder establecer una combinación óptima entre multifuncionalidad, alto rendimiento y bajo costo (17). Los mediadores del transporte de electrones deben poseer una cinética rápida, penetrar fácilmente en la membrana celular, ser químicamente estables, no interferir con otras vías metabólicas, ser solubles en la solución en la que está inmerso el electrodo y no ser tóxicos. Para el electrodo que se van a utilizar tanto en la parte del cátodo como del ánodo se debe tener en cuenta la capacidad que tienen ciertos materiales conductores para estimular el intercambio de electrones entre microorganismos y su entorno, y como tal consiste en un dispositivo lleno

de partículas biocompatibles y conductoras de la electricidad. Estas partículas actúan como soporte para el crecimiento de la biopelícula electroactivo. Este “lecho” mejora las reacciones de oxidación microbiana, aumentando la capacidad de los microorganismos para transferir los electrones generados durante estas reacciones a un aceptor final de electrones (27).

Entre los diversos materiales de electrodos empleados los de grafeno demuestran un rendimiento superior en una celda microbiana de combustible gracias a la gran superficie para la colonización bacteriana, a su alta conductividad eléctrica, alta resistencia mecánica, alta conductividad térmica y buena elasticidad, una mayor capacidad de almacenamiento de carga y una menor resistencia a la transferencia de carga en la interfaz (28), también los electrodos conformados por el fieltro de fibra de carbono activado (ACFF) proporciona más superficie para el crecimiento de microorganismos y una

alta conductividad. El uso de ACFF como ánodo muestra un buen resultado en la generación de energía con una densidad de potencia de $74,5 = 7,5 \text{ mWm}^{-2}$ que se debe a que el material ACFF adsorbe fácilmente más microorganismos (29),(30).

ÁNODO

Los materiales a base de carbón y metal son los principales tipos de electrodos ad optados debido a que presenta las siguientes condiciones que son ideales para el medio en el que este se encuentre, las condiciones buscadas para su empleo son la conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión, alta resistencia mecánica, superficie desarrollada, biocompatibilidad, respeto al medioambiente y de bajo costo. Los materiales que se han utilizado han sido los que se encuentran en la tabla 1.

Material	Caracterización
Base de Carbón	
Carbón activado granular	Biocompatibilidad, alta porosidad, conductividad eléctrica es bastante baja y bajo coste.
Carbón vítreo reticulado	Buen conductor, frágil, costo económico elevado, gran porosidad que permite al biofilm penetrar a través de toda la estructura y colonizar todo el electrodo.
Cartón carbonizado	Rígido, bajo costo, alta conductividad eléctrica y alta porosidad.
Cepillo de carbono	Superficie alta con una relación óptima entre área y volumen, alta conductividad eléctrica y costo económico elevado.

Filtro de carbono	Alta conductividad eléctrica, resistencia mecánica alta, costo asequible y alta porosidad permitiendo que las bacterias accedan y colonicen todos los sitios disponibles del material.
Grafito granular	Alta conductividad eléctrica.
Malla de carbono	Costo bajo, porosidad baja, flexible, la resistencia mecánica que podría conducir a una baja durabilidad a condiciones de alto flujo y su conductividad eléctrica menor.
Papel de carbono	Plano, relativamente poroso, costo económico elevado y frágil.
Placa de grafito	Alta conductividad eléctrica, alta resistencia mecánica y un coste relativamente bajo.
Tela de carbono	Alta superficie, porosidad relativamente alta, alta conductividad eléctrica, flexibilidad, resistencia mecánica en la formación de estructuras 3D más complejas y costo económico elevado.
Varilla de carbono	Colectores de corriente, costo asequible y una baja superficie entre área y volumen.
Velo de carbono	Alta conductividad eléctrica y alta porosidad permitiendo que las bacterias accedan y colonicen todos los sitios disponibles del material.
Metal	
Hoja de cobre o níquel	Los iones de estos metales pueden ser venenosos para los microorganismos, niveles de rendimiento elevados y estables.
Lavador, malla o placa de acero inoxidable	Alto conductor, robusto y coste económico bajo.

Tabla 1. Materiales registrados utilizados en el electrodo del ánodo (31)

Los materiales de carbono, como la tela de carbono, el papel de carbono, el grafito y el filtro de grafito son ampliamente explorados como ánodo en la MFC, pero tienen inconvenientes inherentes al tener una baja área superficial, conductividad, porosidad y biocompatibilidad. El grafeno está disponible en estructuras bidimensionales y estructuras tridimensionales con

gran robustez mecánica, alta superficie ($2600\text{m}^2\text{g}^{-1}$), alta movilidad de electrones ($2,30,000\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$), una conductividad térmica excepcionalmente alta ($3.000\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), estructura electrónica de Dirac sin masa, rigidez (1 TPa) resistencia y biocompatibilidad adecuada (28).

CÁTODO

El electrodo utilizado en el cátodo es en donde se realiza el proceso de reacción

de reducción de los electrones este puede con ser presencia/ausencia de platino o la presencia/ausencia de metales abundantes en la tierra de la siguiente manera: basados en el platino con un mecanismo de transferencia de 4 electrones, basados en el carbono con un mecanismo de transferencia 2 electrones identificado o basados en platino con un mecanismo de transferencia de electrones más complejo. Los materiales mencionados en la tabla 1 también son usados en su gran mayoría como colectores de la corriente catódica.

PROCESO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

Los microorganismos electro génicos requieren de material orgánico para oxidarlo en condiciones de anaerobiosis en donde reducen iones metálicos, producen CO₂, protones y electrones debido al citocromo C presente en la membrana celular (32). A través de este último se lleva a cabo el proceso de eliminación del exceso de electrones generados a partir de la liberación de energía en un proceso catabólico, esto se debe a que estos organismos generan altas cantidades de energía la cual no pueden ser almacenadas en dentro de su membrana, ya que si lo hacen se inhiben su proceso metabólico; debido a ello buscan un aceptor de electrones que se encarga de tomarlos (33). Los microorganismos al descomponer el carbono orgánico o inorgánico del sustrato realizan un proceso denominado electro génesis microbiana donde el organismo usa

proteínas electroquímicamente activas en sus membranas externas donde se generan corrientes eléctricas. Los electrones liberados por el microbio son transferidos por enzimas biocatalítica o compuestos redox de la célula al ánodo en presencia de una fuente de carbono viable, transfiriendo directamente estos electrones a materiales conductores de electricidad, produciendo electricidad que puede ser cosechada porque se crea una corriente eléctrica a medida que los electrones se mueven desde el ánodo a un cátodo separado físicamente.

La transferencia de electrones de los microorganismos al ánodo se da cuando ocurre un diferencial de potencial que da origen a la intensidad de corriente eléctrica, debido al movimiento de electrones que van de un punto a otro, esto se da debido a que los iones que provienen de donadores como acetato o glucosa una vez que están libres la célula pone en función cadenas de transporte de electrones que actúan como agentes oxidantes o reductores, donde se liberan fuera de la célula gracias a proteínas y filamentos presentes en la membrana de la bacteria. Los electrones son atraídos por el ánodo y de ahí viajan por un circuito externo que los conduce a través de una resistencia de valor conocido colocada externamente para después llegar al cátodo, donde entran en contacto con los protones que migraron de la cámara anódica a la catódica a través de una barrera que permite el intercambio catiónico (15). Existen microorganismos que transfieren electrones a los óxidos insolubles de Fe(III) insolubles

generalmente implican la combinación de citocromos C multihémicos (MHCs) y porinas presentes en la membrana externa las cuales transfieren electrones a través del periplasma y la membrana externa a los óxidos de hierro extracelular (9).

La transferencia de electrones se puede dar de 2 maneras:

- Directa este se da por contacto directo entre las proteínas de la membrana del citocromo C junto con la membrana celular del microorganismo y la superficie del electrodo. También a través de conexiones conductoras extracelulares denominadas pili conductor o nano cables bacterianos en donde se ha identificado que se realiza este procedimiento.
- Indirecta donde la gran mayoría de los microorganismos electrogénicos pueden producir sus mediadores redox, por ejemplo, *Pseudomonas aeruginosa* produce piocianina y *Shewanella oneidensis* genera una quinona (2-amino-3-dicarboxi-1,4 naftoquinona) la cual aumenta en un factor de 2 la densidad de potencia de una MFC.

APLICACIONES

El aprovechamiento de estas los microorganismos electrogénicos en las MFCs puede conducir al desarrollo de procesos tales como: Tecnologías

electroquímicas donde hay una producción de bioenergía a partir de residuos alimentarios, gastrobots los cuales utilizan la energía generada por las MFC para su locomoción (34), producción de hidrógeno (células de electrolisis microbiana, MEC), generadores bentónicos (BUGs) (35), tratamiento de compuestos tóxicos orgánicos y generación de energía a partir de ellos, sistemas bioelectroquímicos (BESs) (21), degradación de compuestos orgánicos en sedimentos de lagos u océanos contaminados, biorremediación aeróbica de aguas residuales con lodos activados o algas como *Chlorella vulgaris* (36), celdas microbianas de combustible de sedimentos (SMFC) (24) o el método de digestión anaeróbica mediante la fermentación del metano para el tratamiento de sustancias contaminantes como nitratos, sulfuros y sulfatos. Las MFCs se están empezando a emplear para el tratamiento de aguas residuales debido a que no hay que hacer posteriormente un tratamiento de gases, ya que el principal gas que producen los microorganismos electrogénicos es CO₂, este es un proceso limpio y de alto rendimiento energético. Los elementos que eliminan estos dispositivos son: nutrientes coloidales, trazas de materias, compuestos orgánicos sintéticos y partículas coloidales las cuales se convierten en un compuesto más degradable o disuelto, formando finalmente flóculos o biopelículas (12). Entre algunos de los modelos desarrollados para este tipo de aplicaciones, encontramos:

- Los generadores desatendidos bentónicos, Benthic Unattended Generators o BUGs son una de las grandes apuestas investigativas en el área de las MFCs debido a que estos sistemas pueden producir energía a partir de sedimentos acuáticos logrando así que dispositivos electrónicos se puedan alimentar de dicha energía sin necesidad de un dispositivo energético externo, siendo de gran utilidad para bioprospección en expediciones en las profundidades de algún ecosistema acuático. Este equipo funciona un poco diferente a la MFCs debido a que el electrodo se encuentra conectado a un cátodo el cual queda suspendido en el agua para oxigenarse, el ánodo es enterrado bajo los sedimentos anaerobios y los microorganismos presentes en este oxidan la materia orgánica y liberan electrones los cuales son transferidos al ánodo (25).
- Los sistemas bioelectroquímicos o BESs extraen la energía química de sustratos orgánicos complejos y la convierten en electricidad útil también generan productos útiles como hidrógeno, formiato, acetato, metano o desalinización el agua (32). Los sistemas bioelectroquímicos se pueden establecer de tres formas: como la célula microbiana de captura de carbono (MCC), la pila de combustible vegetal-microbiana (P-MFC) y la célula de electrosíntesis microbiana (MES); en estas en la

cámara anódica el sustrato presente en las aguas residuales es oxidada por microorganismos denominados exoelectrogénicos degradando así los compuestos orgánicos y produciendo protones electrones y CO_2 , mientras los microorganismos fotosintéticos presentes en la cámara catódica convierte CO_2 tanto de la cámara anódica como del aire atmosférico en biomasa con iluminación de luz y libera oxígeno, que actúa como aceptor de electrones para apoyar la reacción de reducción de oxígeno (21).

- Las celdas microbianas de combustible de sedimentos (SMFC), un tipo de MFC, comprenden un ánodo incrustado en el sedimento y un cátodo situado en el agua suprayacente, donde los microorganismos presentes en los sedimentos degradan la materia orgánica, liberando electrones al que se transfieren al cátodo a través de circuitos externos, provocando así una reacción de reducción con el oxígeno del agua suprayacente (24).

Este tipo de sistemas se proponen para la biorremediación de nutrientes y contaminantes como los nitratos, fosfatos, metales, pesticidas o hidrocarburos poliaromáticos los cuales se acumulan en los sedimentos costeros por precipitación endógena y adsorción en las partículas del sedimento generando así que estos ecosistemas sea eutrofizados y desequilibrados con altas tasas de consumo

de oxígeno, las tecnologías electroquímicas pueden manipular el potencial redox en el sedimento para favorecer la electromigración y la movilización de contaminantes en lugares de baja permeabilidad y/o producir entornos oxidativos mediante tecnologías electro-Fenton (37).

LIMITACIONES

Esta es una tecnología energética reciente a la cual le falta conocer diversos aspectos tales como la manera de aprovechar el sistema de transporte electrónico intracelular (38), el transporte de los electrones desde los receptores naturales fuera de la célula hasta el ánodo, la separación del producto de la solución la baja cinética de reacción, el diseño de la MFC, la reacción de óxido reducción del oxígeno debido a los altos sobre potenciales y a la baja cinética en la que se encuentran. En condiciones reales se presentan algunas limitantes, por ejemplo, varios tipos de residuos orgánicos se han utilizado como combustible para ánodos microbianos, pero la cinética de las bacterias electroactivas sigue siendo limitada (32); las MFC de una sola cámara, no presentan una frontera entre el ánodo y el cátodo, por lo que la difusión del oxígeno disuelto tiene un efecto contrario a la respiración anódica y esto conduce a la inhibición de la transferencia directa de electrones de la biopelícula a la superficie anódica y la interacción entre el electrodo (22), la reducción de las pérdidas de energía lo que aumenta la capacidad electrogénica microbiana hacia la conversión efectiva del

sustrato orgánico en bioelectricidad y los microorganismos aún no se ha entendido del todo. Además, la interacción o coexistencia en los mecanismos de electrones entre las bacterias y los electrodos sólidos no están bien descritos, especialmente en entornos complejos en los que una multitud de especies microbianas (electrogénicas o no) pueden encontrarse en los electrodos.

Por último, la atracción de las células microbianas hacia los electrodos, la formación y el desarrollo de biopelículas en superficie del ánodo, la interacción y la cooperación entre especies, así como la influencia de los parámetros ambientales en la colonización microbiana, siguen siendo desconocidos debido a la dificultad de acoplar los complicados procesos de la electroquímica microbiana y la tecnología de imagen existente. Hasta cierto punto, la interacción de las bacterias con las superficies de los electrodos se ha estudiado variando la morfología y la química de la superficie. A pesar de estas dificultades, los resultados son bastante alentadores y requieren de más investigaciones (31).

PERSPECTIVA

El uso de esta herramienta de producción de energía alternativa a partir del metabolismo de microorganismos electrogénicos es de gran ayuda porque es un sistema autosostenible, se produce energía neta de energía positiva mientras los contaminantes presentes en el material orgánico se eliminan, se mantienen las redes tróficas en los ecosistemas, las condiciones

ambientales no generan grandes impactos ambientales debido a que las reacciones se realizan a temperatura y presión ambiental, los catalizadores son económicos (28), el combustible orgánico puede ir desde una solución compuesta de glucosa hasta aguas

residuales o subproductos agroindustriales (31). De igual manera, pueden considerarse como las tecnologías plausibles para abordar el problema cada vez mayor del problema del calentamiento global y el aumento de la concentración de CO₂.

Referencias bibliográficas

1. Akçaba S, Eminer F. Evaluation of strategic energy alternatives determined for Northern Cyprus with SWOT based MCDM integrated approach. Energy Reports [Internet]. 2022;8:11022–38. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.08.227>
2. International Energy Agency. Real-world policy packages for sustainable energy transitions. Int Energy Agency [Internet]. 2017; Available from: <https://www.iea.org/reports/real-world-policy-packages-for-sustainable-energy-transitions>
3. Bnamericas. Los 10 principales proyectos latinoamericanos de energía renovable [Internet]. 2017. Available from: <https://www.bnamericas.com/es/noticias/jueves-los-10-principales-proyectos-latinoamericanos--de-energia-renovable>
4. López JH. La crisis energética mundial: Una oportunidad para Colombia. Dyna [Internet]. 2005;72(147):103–16. Available from: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49614712>
5. Revelo DM, Hurtado NH, Ruiz JO. Celdas de combustible microbianas (CCMs): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica. Inf Tecnol [Internet]. 2013;24(6):17–28. Available from: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642013000600004
6. Potter MC. Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. Proc R Soc London Ser B, Contain Pap a Biol Character [Internet]. 1911;84(571):260–76. Available from: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspb.1911.007>

7. Andrés G, Gómez H, Alejandro M, Olvera S. La plurifuncionalidad de las bacterias electrogénicas. *Univ potosinos*. 2017;211:4–10.
8. Revelo Romo DM, Hurtado Gutiérrez NH, Ruiz Pazos JO, Pabón Figueroa LV, Ordóñez Ordóñez LA. Bacterial diversity in the Cr(VI) reducing biocathode of a Microbial Fuel Cell with salt bridge. *Rev Argent Microbiol* [Internet]. 2019;51(2):110–8. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0325754118300610>
9. Zhang L, Zeng Q, Liu X, Chen P, Guo X, Ma LZ, et al. Iron reduction by diverse actinobacteria under oxic and pH-neutral conditions and the formation of secondary minerals. *Chem Geol* [Internet]. 2019;525(January):390–9. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.07.038>
10. Sanchez JL, Laberty-Robert C. A novel microbial fuel cell electrode design: Prototyping a self-standing one-step bacteria-encapsulating bioanode with electrospinning. *J Mater Chem B* [Internet]. 2021;9(21):4309–18. Available from: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/tb/d1tb00680k>
11. Pepè Sciarria T, Arioli S, Gargari G, Mora D, Adani F. Monitoring microbial communities' dynamics during the start-up of microbial fuel cells by high-throughput screening techniques. *Biotechnol Reports* [Internet]. 2019;21(2018):e00310. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00310>
12. Chung K, Okabe S. Continuous power generation and microbial community structure of the anode biofilms in a three-stage microbial fuel cell system. *Appl Microbiol Biotechnol* [Internet]. 2009;83(5):965–77. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19404637/>
13. Mancílio LBK, Ribeiro GA, Lopes EM, Kishi LT, Martins-Santana L, de Siqueira GMV, et al. Unusual microbial community and impact of iron and sulfate on microbial fuel cell ecology and performance. *Curr Res Biotechnol* [Internet]. 2020;2:64–73. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259026282030006X>
14. Majid B. Electrogenic bacteria — How much have we really known? *Students corner Lett to Ed* [Internet]. 2019;(April):1110. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31201413/>
15. Serment Guerrero JH, Lara Rivera EA, Becerril Varela K, Suárez Contreras S, Ramírez Durán N. Detección y aislamiento de microorganismos exoelectrógenos a partir de lodos del río Lerma, Estado de México, México. *Rev Int Contam Ambient* [Internet]. 2017;33(4):617–28. Available from: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992017000400617&lng=es&nrm=iso

16. Aiyer KS. Synergistic effects in a microbial fuel cell between co-cultures and a photosynthetic alga *Chlorella vulgaris* improve performance. *Heliyon* [Internet]. 2021;7(1):e05935. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05935>
17. Romero Mejía AA, Vásquez JA, Lugo González A. Bacterias, fuente de energía para el futuro. *Rev Tecnura* [Internet]. 2012;16(32):117. Available from: <http://www.scielo.org.co/pdf/tecn/v16n32/v16n32a11.pdf>
18. Schoffeniels E, Margineanu D. Cell Membranes and Bioelectrogenesis. In 1990. p. 30–53. Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-94-009-2143-6_2
19. Sacco NJ, Bonetto MC, Cortón E. Isolation and Characterization of a Novel Electrogenic Bacterium, *Dietzia* sp. RNV-4. Yang S, editor. *PLoS One* [Internet]. 2017 Feb 13;12(2):e0169955. Available from: <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0169955>
20. Vega L autonoma de barcelona. Microorganismos bioelectrogenicos : ¿Qué son y cómo se utilizan? [Internet]. Barcelona; 2008. Available from: https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2015/143673/TFG_lissetdelavegacorrea.pdf
21. Das S, Das S, Das I, Ghangrekar MM. Application of bioelectrochemical systems for carbon dioxide sequestration and concomitant valuable recovery: A review. *Mater Sci Energy Technol* [Internet]. 2019;2(3):687–96. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.08.003>
22. Khater DZ, El-Khatib KM, Hassan RYA. Effect of vitamins and cell constructions on the activity of microbial fuel cell battery. *J Genet Eng Biotechnol* [Internet]. 2018;16(2):369–73. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2018.02.011>
23. Lateef HA, Bright TE, Peterman D, Colgan CJ, Benton LA. From Waste to Wealth : Making Millivolts from Microbes! *J Emerg Investig* [Internet]. 2021;4(6):1–5. Available from: <https://emerginginvestigators.org/articles/from-waste-to-wealth-making-millivolts-from-microbes>
24. Liu SH, Su YH, Chen CC, Lin CW, Huang WJ. Simultaneous enhancement of copper removal and power production using a sediment microbial fuel cell with oxygen separation membranes. *Environ Technol Innov* [Internet]. 2022;26:102369. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102369>
25. Álvarez, Ortiz; Moreno, L; Jumenez L. Bacterias eléctricas. *Dialnet* [Internet]. 2011;4:74–7. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3837978>

26. Logan BE, Rossi R, Ragab A, Saikaly PE. Electroactive microorganisms in bioelectrochemical systems. *Nat Rev Microbiol* [Internet]. 2019;17(5):307–19. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41579-019-0173-x>
27. Krithika T, Kavitha R, Dinesh M, Angayarkanni J. Assessment of ligninolytic bacterial consortium for the degradation of azo dye with electricity generation in a dual-chambered microbial fuel cell. *Environ Challenges* [Internet]. 2021;4(January):100093. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100093>
28. Pareek A, Shanthi Sravan J, Venkata Mohan S. Exploring chemically reduced graphene oxide electrode for power generation in microbial fuel cell. *Mater Sci Energy Technol* [Internet]. 2019;2(3):600–6. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.06.006>
29. MDK, SMD, Pugazhendi A, Jamal MT, SAK, Kumar G, et al. Generation of Electricity From Anaerobically Treated Leachate Using Up Flow Microbial Fuel Cell. *e-Prime - Adv Electr Eng Electron Energy* [Internet]. 2021;1(October):100011. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772671121000115>
30. Song TS, Tan WM, Wu XY, Zhou CC. Effect of graphite felt and activated carbon fiber felt on performance of freshwater sediment microbial fuel cell. *J Chem Technol Biotechnol*. 2012;87(10):1436–40.
31. Santoro C, Arbizzani C, Erable B, Ieropoulos I. Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. *J Power Sources* [Internet]. 2017;356:225–44. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.109>
32. Redondo J. Microorganismos electrogénicos: células de combustible microbianas. [Internet]. Vol. I, 26/27. 2018. Available from: <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/37227><https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/37227>
33. Carmona AA. Obtención de energía eléctrica directa de una celda de combustible microbiana mediante el tratamiento de lixiviados de la producción fermentativa de H₂ [Internet]. Centro de investigación y de estudios avanzados del instituto politecnico Nacional; 2008. Available from: https://www.researchgate.net/profile/Alessandro-Carmona/publication/313651774_MSc_Thesis_Electricity_production_in_a_microbial_fuel_cell_fed_with_spent_organic_extracts_from_hydrogenogenic_fermentation_of_organic_solid_wastes/links/58a197a5aca272046aae413

34. Hashem A. Microbial Fuel Cell (MFC) Application for Generation of Electricity from Dumping Rubbish and Identification of Potential Electrogenic Bacteria. *Adv Ind Biotechnol* [Internet]. 2019;2(1):1–8. Available from: <https://www.heraldopenaccess.us/openaccess/microbial-fuel-cell-mfc-application-for-generation-of-electricity-from-dumping-rubbish-and-identification-of-potential-electrogenic-bacteria>
35. Umar MF, Rafatullah M, Abbas SZ, Mohamad Ibrahim MN, Ismail N. Advancement in benthic microbial fuel cells toward sustainable bioremediation and renewable energy production. *Int J Environ Res Public Health* [Internet]. 2021;18(7). Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33917378/>
36. Huarachi-Oliviera R, Dueñas-Gonza A, Yapó-Pari U, Vega P, Romero-Ugarte M, Tapia J, et al. Bioelectrogenesis with microbial fuel cells (MFCs) using the microalga *Chlorella vulgaris* and bacterial communities. *Electron J Biotechnol* [Internet]. 2018;31:34–43. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2017.10.013>
37. Sánchez C, Dessì P, Duffy M, Lens PNL. Gauging sediment microbial fuel cells using open-circuit auxiliary electrodes. *J Power Sources* [Internet]. 2022;527(February). Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877532200235X>
38. Pamintuan KRS, Sanchez KM. Power generation in a plant-microbial fuel cell assembly with graphite and stainless steel electrodes growing *Vigna Radiata*. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* [Internet]. 2019;703(1). Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/703/1/012037>