

Ensayo Expositivo

Celdas de combustible microbiano como alternativa para el tratamiento de aguas residuales

Recibido: 10-03-2021 Aceptado: 12-01-2022 (Artículo Arbitrado)

Resumen

Las celdas de combustible microbiano (CCM) son una tecnología en desarrollo que constituye una herramienta eficiente para el tratamiento de aguas residuales industriales y urbanas contaminadas, con una simultánea producción de energía. La concentración de los contaminantes se reduce durante el proceso del metabolismo microbiano que genera a la vez electricidad, siendo las CCM consideradas una fuente de energía limpia. En el presente trabajo se realizó una revisión de las CCM, que incluyó los principios de su operación, componentes principales y diseños, los microorganismos comúnmente usados y su clasificación de acuerdo con sus mecanismos característicos de producción de energía y transferencia de electrones. Se analizaron los parámetros aplicados para el tratamiento de diferentes tipos de contaminantes, su eficiencia en la remoción de los mismos, así como la correspondiente producción de energía. En conclusión, se resaltan las ventajas de las CCM como una estrategia eficaz para reducir la contaminación, al ser una herramienta verde alternativa que puede contribuir al desarrollo de nuevos modelos económicos.

Abstract

Microbial fuel cells (MFCs) are a developing technology that constitutes an efficient tool for the treatment of polluted industrial and urban wastewater, which a simultaneous production of energy. The concentration of pollutants is reduced during the process of microbial that generates electricity at the same time, being MFCs considered a source of clean energy. In the present work, a review of the MFCs was carried out, which included the principles of their operation, main components and designs, commonly used microorganisms and their classification according to their characteristic mechanisms of energy production and electron transfer. The parameters applied for the treatment of different types of pollutants, their efficiency in their removal, as well as the corresponding energy production were analyzed. In conclusion, the advantages of MFCs as an effective strategy to reduce pollution are highlighted, as it is an alternative green tool that can contribute to the development of new economic models.

Résumé

Les piles à combustible microbiennes (CCM) sont une technologie en développement qui constitue un outil efficace pour le traitement des eaux usées industrielles et urbaines polluées, avec une production simultanée d'énergie. La concentration de polluants est réduite au cours du processus de métabolisme microbien qui génère en même temps de l'électricité, les CCM étant considérées comme une source d'énergie propre. Dans le présent travail, une revue des CCM a été réalisée, qui comprenait les principes de leur fonctionnement, leurs principaux composants et conceptions, les micro-organismes couramment utilisés et leur classification en fonction de leurs mécanismes caractéristiques de production d'énergie et de transfert d'électrons. Les paramètres appliqués pour le traitement des différents types de polluants, leur efficacité dans leur élimination, ainsi que la production d'énergie correspondante ont été analysés. En conclusion, les avantages des CCM sont mis en évidence comme une stratégie efficace pour réduire la pollution, étant un outil vert alternatif pouvant contribuer au développement de nouveaux modèles économiques.

Arely Cárdenas Robles^{1*}

Carlos Daniel Alvarado Rodríguez²

Emma Guadalupe Pichardo Ramos²

Jesús Daniel Martínez Landín²

Eduardo Camacho Chávez²

Martha Catalina Rodríguez Aguilar²

Víctor Pérez Moreno²

Miguel Ángel Rico Rodríguez²

Palabras clave: Bioelectricidad, aguas residuales, mecanismos de transferencia de electrones.

Keywords: Bioelectricity, wastewater, electron transfer mechanism.

Mots-clés: Bioélectricité, Eaux usées, Mécanismes de transfert d'électrons.

Introducción

Actualmente nos enfrentamos a un desabasto de agua, uno de los factores que afectan es el crecimiento de la población, el cual se vuelve cada vez mayor. La contaminación desmedida del agua y su creciente demanda representan un problema grave. Por ello es necesario tener tecnologías que permitan su tratamiento. Las CCM representan a futuro una alternativa para disminuir los niveles de contaminación o compuestos tóxicos en agua y al mismo tiempo producen energía (Zhou et al., 2012).

¹Catedrática CONACYT

^{1,2}Facultad de Química (CEACA)

Universidad Autónoma de Querétaro

Correspondencia:

*cardenas.arely.i@gmail.com

Los orígenes de esta tecnología se remontan a inicios del siglo pasado, cuando en 1911 Michael C. Potter al emplear electrodos sumergidos en cultivos de bacterias en una configuración tipo batería descubrió el fenómeno de la transferencia de electrones generando una fuerza electromotriz. Pero fue hasta 1963 cuando la NASA retomó la idea, como una oportunidad para producir electricidad a partir de desechos humanos durante los vuelos espaciales (Schröder, 2007). Sin embargo, los rápidos avances en otras tecnologías energéticas dejaron de lado el interés en las CCM. A finales de siglo XX fueron reconsideradas, debido a la problemática ocasionada por la producción de energía de fuentes no renovables y la generación de grandes volúmenes de aguas contaminadas.

Las aplicaciones de las CCM son muy diversas, por ejemplo, se han utilizado para la eliminación de contaminantes en diferentes fuentes naturales, como lagos, sedimentos marinos (Erable et al., 2010), efluentes provenientes de aguas residuales domésticas (Liu et al., 2004; Logan et al., 2019) o industriales (Velasquez-Orta et al., 2011) por lo que son una tecnología versátil, con gran capacidad para operar en diferentes ambientes, presentan ventajas funcionales y operacionales sobre otras tecnologías.

Aguas residuales urbanas

El panorama actual y futuro del agua no es muy alentador, debido a que las diferentes actividades humanas incrementan considerablemente su contaminación. Las aguas residuales se originan mediante actividades domésticas, industriales, agrícolas y pecuarias; provocando la contaminación de los cuerpos receptores de agua, como ríos o lagos; disminuyendo su calidad, poniendo en riesgo la salud de la población y la integridad de los ecosistemas (CONAGUA, 2014).

Las descargas de aguas residuales de origen urbano contienen principalmente nitrógeno y fósforo, compuestos orgánicos, parásitos, coliformes fecales, materia orgánica, entre muchos otros (CONAGUA, 2014; Jimenez Cisneros et al., 2010). Por ello se han diseñado y aplicado tratamientos de aguas, con la finalidad de mejorar la calidad del agua disminuyendo los contaminantes presentes.

Existen distintos tipos de tratamiento de aguas residuales, los cuales se adaptan al tipo de agua, con el objetivo de remover contaminantes y reutilizar o reintegrarla a los cuerpos receptores de agua. En México

se generan alrededor de 250 m³/s de aguas residuales urbanas, de esta cantidad se trata solamente cerca del 25 %. Los principales procesos de tratamiento de agua residual urbana utilizados son lodos activados, lagunas de estabilización, lagunas aireadas, filtros biológicos y reactores anaerobios (CONAGUA, 2017).

Una alternativa a estos tratamientos son las celdas de combustible microbianas las cuales oxidan los contaminantes presentes (Zang et al., 2012). Sin embargo, para realizar el tratamiento de aguas, es necesario considerar diferentes factores para su diseño y funcionamiento adecuado obteniendo eficiencias en la remoción de contaminantes y producción de energía.

Celdas de combustible microbiana

Las CCM son eficaces cuando el agua presenta altas concentraciones de materia orgánica. La importancia radica en que obtiene la energía de los compuestos degradados mediante el metabolismo microbiano, convirtiendo así los desechos en energía (Shankar et al., 2013; Xu et al., 2017).

Su principio de funcionamiento es simple, los microorganismos electroquímicamente activos se adhieren en el electrodo llamado ánodo, estos microorganismos degradan la materia orgánica o los contaminantes presente en las aguas residuales y transfieren electrones a dicho electrodo. Los electrones viajan del ánodo al cátodo (otro electrodo), a través de un circuito eléctrico produciendo de esta forma un flujo de electrones que recorre el circuito, generando energía eléctrica tal como se muestra en la Figura 1.

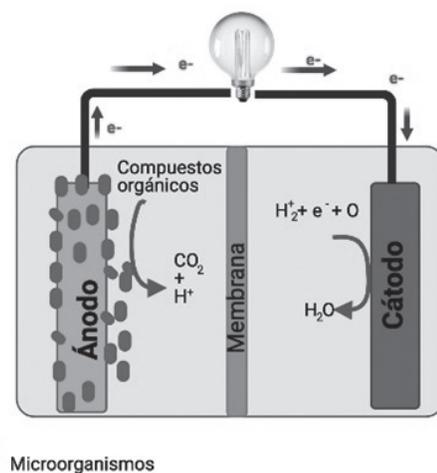


Figura 1. Celda de combustible microbiana.
Fuente: Adaptada de Pant et al., (2010)

Además, los microorganismos liberan al mismo tiempo protons (partículas que forman parte de los átomos con carga eléctrica positiva), estos migran de la cámara anódica a la cámara catódica, pasando a través de una membrana selectiva. Finalmente, en la cámara catódica, los electrones, protones y el oxígeno se combinan para formar agua, estas celdas se pueden clasificar de acuerdo con su configuración y la división entre los electrodos como celdas de una o dos cámaras (Palanisamy et al., 2019).

Celdas de una cámara

Las CCM de una cámara están estructuradas por un solo compartimento en donde se colocan el ánodo y cátodo, como se muestra en la Figura 2, los cuales se encuentran generalmente separados por una membrana de intercambio de protones. En este tipo de celdas al estar cerca sus componentes se reduce la resistencia óhmica y se incrementa la densidad de potencia (Sengodan y Hays, 2012).

Celdas de dos cámaras

Las CCM de doble cámara están constituidas por dos compartimientos la cámara anódica y catódica, con sus respectivos electrodos separados normalmente por una membrana intercambiadora de protones, como se muestra en las Figuras 1 y 2b, en estas celdas, generalmente la solución de la cámara anódica contiene el sustrato (Shankar et al., 2013). La celda de dos cámaras presentada en la Figura 1 generalmente son operadas por lote; mientras que la celda de la Figura 2b corresponde a la representación de un reactor de flujo ascendente; que permite la recirculación, estas últimas celdas son fáciles de escalar y los materiales y dimensiones pueden variar de acuerdo con las necesidades del proceso.

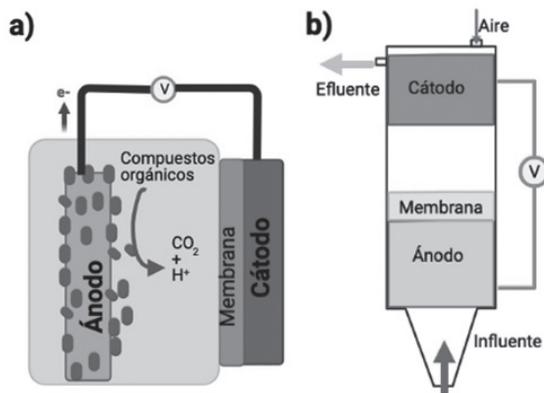


Figura 2. Configuración de celdas de combustible microbianas, a) una cámara y b) flujo ascendente
Fuente: Adaptada de Du et al., (2007).

Diversos estudios han presentado mejores resultados de operación para celdas de una cámara. Un factor importante en el rendimiento en la producción de energía y de remoción de contaminantes son parámetros de diseño de la celda, tipo de electrodo, separación de electrodos y el tipo de microorganismos usados en la celda de combustible, debido a que existe una gran variedad de estos, y son la base de su funcionamiento.

Partes importantes de las CCM

Para construir las CCM se han utilizado distintos tipos de materiales de electrodo, para mejorar las condiciones y eficiencias en los procesos de producción de energía y de remoción de contaminantes. En el ánodo se han usado materiales porosos, principalmente de carbón, por ejemplo: cepillo de fibra de grafito, tela de carbón, varilla de grafito, papel carbón, carbón vítreo reticulado y fieltro de carbón. Estos materiales son utilizados por su estabilidad en cultivos microbianos, alta conductividad eléctrica y gran superficie. En el cátodo, los materiales más comunes son: papel carbón, fieltro de carbón, escobilla de carbón, fibra de carbón, grafito de varios tipos, platino, cobre, aleaciones de cobre-oro, carburo de tungsteno, grafito granular, carbón vítreo reticulado (Rahimnejad et al., 2015).

Además, del material del electrodo otro componente importante es la membrana, siendo el más usado el nafi[®], ya que sus propiedades son las que mejor se acoplan a los requerimientos de una membrana capaz de intercambiar protones. Sin embargo, debido al alto costo del material, se han investigado algunos otros materiales que sustituyan las membranas de nafi[®]; por ejemplo, membranas de ultrafiltración, microfiltración, poliéter, éter sulfonado, intercambio catiónico, bipolares, y de ósmosis inversa (Hernández-Flores et al., 2015); sin embargo, el uso de membranas de filtración ultrafiltración o de intercambio al estar diseñadas para otra función, no poseen una alta selectividad al paso de protones y la consecuencia es un rendimiento menor en la producción de electricidad (Nakhate et al., 2017).

Tipos de microorganismos

Para lograr un mejor rendimiento de una CCM, es necesario analizar la comunidad bacteriana y las especies dominantes que contribuyen a la transferencia de electrones en la capa formada por microorganismos

Tabla 1. Clasificación de microorganismos electroactivos de acuerdo con la intensidad de corriente producida.

Exoelectrógenos débiles	Energía producida (mW/m ²)	Exoelectrógenos fuertes	Energía producida (mW/m ²)
<i>Shewanella oneidensis</i>	4.5	<i>Tolomonas osonensis</i>	509.0
<i>Enterobacter cloacae</i>	5.4	<i>Rhodospseudomonas palustris</i>	2720.0
<i>Bacillus subtilis</i>	10.5	<i>Escherichia coli DH50α</i>	3800.0
<i>Gluconobacter roseus</i>	11.0	<i>Geobacter sulfurreducens</i>	3900.0
<i>Rhodoferax ferrireducens</i>	33.0	<i>Shewanella putrefaciens</i>	4400.0

Fuente: Elaboración propia, basado en Logan et al., (2019).

Tabla 2. Eficiencia de remoción y densidad de potencia en CCM empleadas en el tratamiento de agua residual.

Contaminante / Sustrato	Densidad de potencia	Eficiencia remoción (%)	Contaminante monitoreado	Referencia
Materia orgánica	408 mW/m ²	71	COT	Buitrón y Pérez, (2011)
Acetato	64 mW/m ²	72*		Chae et al., (2009)
Desechos alimenticios prefermentados	530 mA/m ² 361 mA/m ²	70	DQO	Kannaiah Goud y Venkata Mohan, (2011)
Industria alimentos marinos	570 mW/m ²	90	DQO	Jamal et al., (2020)
Industria de papel	95 mW/m ²	66	DQO	Chen et al., (2020)
Aguas municipales	25 mW/m ²	47	DQO	Yang et al., (2020)

* Eficiencia Coulombica

adheridos a la superficie de los electrodos, llamada biopelícula. Esta biopelícula adherida a la superficie la cual puede ser biótica o abiótica, el formar estas matrices biopoliméricas mejora la eficiencia en la producción de energía; así como los diversos aceptores de electrones que se pueden utilizar para que los microorganismos lleven a cabo las reacciones necesarias.

En las tecnologías electroquímicas, los microorganismos que transfieren electrones a un electrodo son llamados exoelectrógenos, y los mecanismos por los cuales realizan la transferencia de electrones al ánodo son diferentes. Estos microorganismos se pueden clasificar como exoelectrógenos débiles o fuertes dependiendo de la intensidad de corriente generada en la celda de combustible, la energía producida esta asociada a sus funciones vitales, algunos ejemplos son presentados en la Tabla 1 (Logan et al., 2019).

La bacteria *Geobacter sulfurreducens* clasificada como exoelectrógena fuerte, es una de las más utilizadas en CCM y sus condiciones de cultivo son a un pH neutro (Logan et al., 2019). Esta bacteria tiene la capacidad de transferir electrones a los electrodos empleando citocromos que son proteínas redox, eléctricamente conductoras, esta estructura se encuentra en la membrana celular. Otra característica estudiada de este microorganismo es su capacidad de oxidar completamente un compuesto orgánico y así contribuir a la producción de energía.

Los microorganismos presentes en las CCM sólo generan electricidad si está presente un sustrato que puedan consumir. Esto significa que, si hay un contaminante en la CCM este es usado como sustrato y los microorganismos generan electricidad (Cornejo et al., 2018). El uso del sustrato modifica la densidad de potencia generada y generalmente cuando el sustrato utilizado es agua residual el parámetro monitoreado para la eficiencia de remoción es la Demanda Química de Oxígeno (DQO) o el Carbón Orgánico Total (COT), las eficiencias en la remoción de contaminantes alcanzan el 90 %, algunos ejemplos son presentados en la Tabla 2.

Mecanismo de transferencia de electrones

Existen diferentes mecanismos que permiten la transferencia de electrones para la generación de energía en las CCM. El proceso de transporte de electrones inicia con el metabolismo microbiano donde los electrones son obtenidos a través de los sustratos orgánicos o inorgánicos; para que estos electrones puedan interactuar con el electrodo necesitan pasar a través de la membrana celular de forma selectiva, este fenómeno es llamado transferencia de electrones extracelular, las bacterias exoelectrógenas son capaces de realizar este proceso. Los procesos para la transferencia de electrones a la superficie del electrodo son diversos; sin embargo, se han elucidado dos principales el primero consiste en la transferencia directa,

mientras que en el segundo caso es mediante el uso de mediadores redox, los mecanismos se representan en la Figura 3 (Aiyer, 2020).

En el primer caso, es necesario un contacto directo entre el electrodo y la membrana celular de la bacteria. La transferencia es posible debido a diferentes estructuras presentes en las bacterias; por ejemplo, apéndices, pili o los citocromos tipo C de la membrana externa de las bacterias. Entre las especies que tienen esta capacidad se encuentran *Shewanella spp.* y *Geobacter spp.* los cuales tienen filamentos micro-métricos formados por proteínas; mientras que los citocromos C se han encontrado en abundancia en *G. sulfurreducens* (Aiyer, 2020; Slate et al., 2019).

Para la transferencia mediada o indirecta, es necesario un intermediario; esto debido a que no existe la estructura adecuada en la bacteria o a que no está en contacto con la superficie del electrodo. Este proceso de mediación puede ocurrir a través de un mediador redox, este puede ser un metabolito secundario cuya función es la transferencia de los electrones al ánodo que toma previamente de los microorganismos. Otro tipo de mediación ocurre mediante metabolitos secretados por los microorganismos y posteriormente se transfieren al ánodo (Aiyer, 2020; Slate et al., 2019).

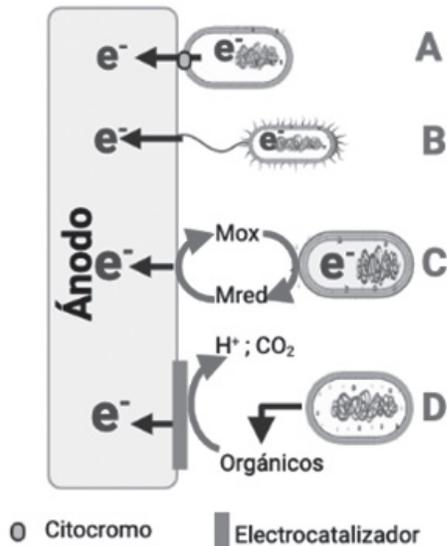


Figura 3. Esquema representativo de los mecanismos de transferencia de electrones hacia el ánodo. Transferencia directa: A, citocromos; B, pili o flagelos. Transferencia indirecta o mediada: C, mediador redox y D, Metabolitos reducidos.

Fuente: Adaptada de Aiyer, (2020).

Parámetros determinantes en el rendimiento de remoción de contaminantes

El rendimiento en la remoción de contaminantes de una CCM depende de diferentes parámetros de operación, como pH, temperatura, sustratos y el tipo microorganismos (Wang et al., 2010). Además, de las variables técnicas como el diseño de las CCM, es importante considerar las rutas metabólicas y los mecanismos de producción de energía, los cuales determinan los rendimientos en la producción de energía y la remoción de la carga orgánica (Schröder, 2007).

El sustrato influye en la composición de la comunidad bacteriana adherida a la superficie del electrodo, conocida como biopelícula; también, en el rendimiento de CCM incluida la eficiencia coulombica. Es decir, la fracción de energía eléctrica que se generará a partir de un sustrato determinado. En general las CCM han sido utilizadas para producir electricidad a partir de sustratos como la glucosa, el acetato y el lactato; pero se ha ampliado a sustratos más complejos. Por ejemplo, Liu et al., (2008) demostraron que es posible obtener electricidad en una CCM a partir de aguas residuales domésticas y no sólo a partir de sustratos puros.

La adición de sustratos y cosustratos para la alimentación microbiana es uno de los parámetros importantes a considerar para aumentar la producción de energía y hacer más eficiente la eliminación de contaminantes. En la Tabla 3 se presentan los resultados de Chae et al., (2009) quienes compararon la eficiencia coulombica de una CCM empleando diferentes sustratos.

Además del sustrato, es importante considerar el diseño de la CCM, la optimización de su configuración o arquitectura, porque mediante la reducción de la resistencia interna, es probable aumentar la remoción de contaminantes e incrementar la producción de energía. Por otro lado, Buitrón et al., (2011) evaluaron la distancia entre electrodos en una celda de una

Tabla 3. Eficiencia coulombica generada utilizando diferentes sustratos una celda con ánodo de tela de carbono y cátodo de titanio.

Sustrato	Eficiencia coulombica (%)
Acetato	72.3
Butirato	43.0
Propionato	36.0
Glucosa	15.0

Fuente: Elaboración propia con base en Chae et al., (2009)

cámara y concluyeron que a medida que aumentaba la separación entre electrodos la energía producida disminuye, pero también determinaron que fue más significativa la cantidad de agua procesada. Por lo que, para aplicaciones prácticas, al aumentar el volumen de agua residual a tratar es importante considerar la distancia entre electrodos. Entre los ejemplos que ayudan a disminuir estos son los diseños concéntricos, por ejemplo, Rabaey et al, (2005), evaluaron el desempeño de una CCM tubular obteniendo eficiencias coulombicas del orden de 96%, para aguas residuales, un porcentaje alto en comparación con celdas convencionales.

Sin embargo, los estudios revelan que, al aumentar las dimensiones de la celda, la densidad de potencia disminuye debido a la resistencia eléctrica volumétrica y al volumen del reactor inactivo. Por lo que la modularización, es decir, la conexión en serie o en paralelo de varias celdas individuales, en combinación con las conexiones hidráulicas y eléctricas es una buena opción en el escalamiento. Son muchos los parámetros a considerar para el diseño de estas celdas; sin embargo, los costos de la energía, equipo y operación son clave en el escalamiento y para aplicaciones reales (Ge et al., 2014).

Las CCM como parte de la economía circular

Actualmente, se buscan alternativas de tecnologías verdes al uso de combustibles fósiles, cuyo consumo ha predominado como el principal recurso energético representando casi el 80 % de la producción total de energía a nivel mundial en 2017 (Davidson, 2019). Conociendo que su uso ocasiona altas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), más allá de la capacidad total de la tierra para mitigar el nivel de GEI, lo que resulta en el calentamiento global y el cambio climático, la búsqueda de implementación de tecnologías verdes y la aplicación de la economía circular se ha convertido en una prioridad (Woodard et al., 2019).

El objetivo del modelo de economía circular es eliminar el actual modelo lineal, que está basado en “extraer-producir-desechar”, y cambiarlo por una cultura de “cero residuos”. Debido a que su excesiva generación resulta en la incineración y el vertido de materiales de desecho en vertederos y aguas residuales (Pescod, 1992).

Los modelos bioeconómicos circulares pueden ser formas alternativas de mejorar el reciclaje y la reutilización de los desechos actuales derivados de la biomasa para la producción de nuevos productos químicos y energía, utilizando las técnicas menos dañinas para nosotros. Además, estos modelos apuntan a mantener un crecimiento continuo de la economía y la calidad de vida controlando el consumo de recursos finitos (Venkata Mohan et al., 2016).

Dado que las CCM son capaces de producir energía y productos químicos, mediante la eliminación de aguas residuales y sin emisiones de GEI, estos sistemas se consideran plataformas químicas y de conversión de residuos en energía sostenibles prometedoras y partes de la bioeconomía circular (Jung et al., 2020).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales generalmente involucran pretratamiento, tratamientos primarios, secundarios y terciarios. El tratamiento primario retiene temporalmente las aguas residuales en un depósito fijo para depositar los sólidos pesados en el fondo y hacer que floten sólidos más ligeros y líquidos insolubles como los aceites.

Estos desechos sólidos se recogen directamente del depósito para su incineración y otras materias orgánicas e inorgánicas hacia la siguiente etapa de tratamiento. Durante el tratamiento secundario, las materias orgánicas disueltas o suspendidas se eliminan mediante reacciones microbianas en hábitats controlados, es aquí donde se emplean las CCM. En el tratamiento terciario, se emplean tratamientos químicos y físicos específicos para obtener agua lo suficientemente limpia para ser descargada en los ambientes circundantes (Pescod, 1992).

Los biorreactores basados en la generación de energía en CCM representan un enfoque completamente nuevo para el tratamiento de aguas residuales. Si se aumenta la generación de energía en estos sistemas, la tecnología CCM proporcionaría un nuevo método para compensar los costos operativos de la planta de tratamiento de aguas residuales, haciendo que el tratamiento de aguas residuales en etapas secundarias sea más asequible tanto para las naciones en desarrollo como para las industrializadas (Liu et al., 2004).

Conclusiones

Las tecnologías innovadoras son una gran alternativa para disminuir el impacto ambiental. Una de ellas son las CCM, aún cuando se conocen desde hace aproximadamente un siglo, recientemente ha incrementado el interés en continuar su desarrollo. En esta tecnología se usan microorganismos, las especies o consorcios son muy variados, siendo un recurso para la producción de energía eléctrica y el tratamiento de aguas residuales. En esta revisión, hemos informado de manera íntegra los principales microorganismos involucrados en las CCM, las partes e importancia de cada una de ellas y como repercuten estos factores en su funcionamiento, así como la rentabilidad de esta tecnología dentro de la economía circular. Sin embargo, se encontraron pocos estudios que evaluaran a nivel escala la práctica de esta herramienta, por lo que se requiere mayor desarrollo en esta tecnología para su aplicabilidad y perfeccionamiento.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Mónica Herzig Z la traducción del resumen al idioma inglés.

Bibliografía

- Acevedo Ávila, J. (2018). Los pueblos negros de México: su Aiyer, K. S. (2020). How does electron transfer occur in microbial fuel cells? *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 36(2): 1–9.
- Buitrón, G., Pérez, J. (2011). Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: Efecto de la distancia entre electrodos. *TIP Rev Esp Cienc Quim Biol*. 14(1): 5–11.
- Chae, K. J., Choi, M. J., Lee, J. W., Kim, K. Y., Kim, I. S. (2009). Effect of different substrates on the performance, bacterial diversity, and bacterial viability in microbial fuel cells. *Bioresource Technology*. 100(14): 3518–3525.
- Chen, F., Zeng, S., Luo, Z., Ma, J., Zhu, Q., Zhang, S. (2020). A novel MBBR–MFC integrated system for high-strength pulp/paper wastewater treatment and bioelectricity generation. *Separation Science and Technology*. 55(14): 2490–2499.
- CONAGUA (2014). *Atlas del Agua en México 2013*. Recuperado el 14 de enero de 2022, de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/ATLAS-DIGITAL.pdf>
- CONAGUA. (2017). *Estadísticas del agua en México 2017*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado el 14 de enero de 2021, de https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf.
- Cornejo Martell, A., Hernández Eligio, A. J., Juárez López, K. (2019). Limpiando el ambiente y generando energía. Biotecnología en Movimiento. *Revista de divulgación del Instituto de Biotecnología de la UNAM*. 17: 9–11.
- Davidson, D. J. (2019). Exnovating for a renewable energy transition. *Nature Energy*. 4: 254–256.
- Du, Z., Li, H., & Gu, T. (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances*. 25(5): 464–482.
- Erable, B., Duteanu, N.M., Ghangrekar, M.M., Dumas, C., Scott, K. (2010). Application of electro-active biofilms. *Biofouling*. 26(1): 57–71.
- Ge, Z., Li, J., Xiao, L., Tong, Y., He, Z. (2014). Recovery of Electrical Energy in Microbial Fuel Cells. *Environmental Science and Technology Letters*. 1(2): 137–141.
- Hernández-Flores, G., Poggi-Varaldo, H. M., Solorza-Feria, O., Ponce-Noyola, M. T., Romero-Castañón, T., Rinderknecht-Seijas, N., Galíndez-Mayer, J. (2015). Characteristics of a single chamber microbial fuel cell equipped with a low cost membrane. *International Journal of Hydrogen Energy*. 40(48): 17380–17387.
- Jamal, M. T., Pugazhendhi, A., Jeyakumar, R. B. (2020). Application of halophiles in air cathode MFC for seafood industrial wastewater treatment and energy production under high saline condition. *Environmental Technology and Innovation*. 20, 101119.
- Jimenez Cisneros, B., Torregosa y Armenta, M. L., Aboites Aguilar, L. (Eds.). (2010). *El agua en México: cauces y encauces*. México: Academia Mexicana de Ciencias.
- Jung, S., Lee, J., Park, Y. K., Kwon, E. E. (2020). Bioelectrochemical systems for a circular bioeconomy. *Bioresource Technology*. 300: 122748.
- Kannaiah Goud, R., Venkata Mohan, S. (2011). Pre-fermentation of waste as a strategy to enhance the performance of single chambered microbial fuel cell (MFC). *International Journal of Hydrogen Energy*. 36(21): 13753–13762.
- Liu, H., Cheng, S., Huang, L., Logan, B. E. (2008). Scale-up of membrane-free single-chamber microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*. 179(1): 274–279.
- Liu, H., Ramnarayanan, R., Logan, B. E. (2004). Production of Electricity during Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell. *Environmental Science and Technology*. 38(7): 2281–2285.
- Logan, B. E., Rossi, R., Ragab, A., Saikaly, P. E. (2019). Electroactive microorganisms in bioelectrochemical systems. *Nature Reviews Microbiology*. 17(5): 307–319.
- Nakhate, P. H., Joshi, N. T., Marathe, K. V. (2017). A critical review of bioelectrochemical membrane reactor (BECMR) as cutting-edge sustainable wastewater treatment. *Reviews in Chemical Engineering*. 33(2): 143–161.
- Palanisamy, G., Jung, H. Y., Sadhasivam, T., Kurkuri, M. D., Kim, S. C., Roh, S. H. (2019). A comprehensive review on microbial fuel cell technologies: Processes, utilization, and advanced developments in electrodes and membranes. *Journal of Cleaner Production*. 221: 598–621.
- Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L., Vanbroekhoven, K. (2010). A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology*. 101(6): 1533–1543.
- Pescod, M. B. (1992). Wastewater treatment and use in agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 47. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

- Rabaey, K., Clauwaert, P., Aelterman, P., Verstraete, W. (2005). Tubular microbial fuel cells for efficient electricity generation. *Environmental Science and Technology*. 39(20): 8077–8082.
- Rahimnejad, M., Adhami, A., Darvari, S., Zirepour, A., Oh, S. E. (2015). Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review. *Alexandria Engineering Journal*. 54(3): 745–756.
- Schröder, U. (2007). Anodic electron transfer mechanisms in microbial fuel cells and their energy efficiency. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 9(21): 2619–2629.
- Sengodan, P., Hays, D. B. (2012). *Microbial Fuel Cells, Future Fuel Technologies*, National Petroleum Council (NPC) Study. National Petroleum Council (NPC) Study. Recuperado el 01 de febrero de 2022, de https://www.npc.org/FTF_Topic_papers/13-Microbial_Fuel_Cells.pdf.
- Shankar, R., Mondal, P., Chand, S. (2013). Modelling and simulation of double chamber microbial fuel cell: Cell voltage, power density and temperature variation with process parameters. *Green*. 3(3–4): 181–194.
- Slate, A. J., Whitehead, K. A., Brownson, D. A. C., Banks, C. E. (2019). Microbial fuel cells: An overview of current technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 101: 60–81.
- Velasquez-Orta, S. B., Head, I. M., Curtis, T. P., Scott, K. (2011). Factors affecting current production in microbial fuel cells using different industrial wastewaters. *Bioresource Technology*. 102(8): 5105–5112.
- Venkata Mohan, S., Nikhil, G. N., Chiranjeevi, P., Nagendranatha Reddy, C., Rohit, M. V., Kumar, A. N., Sarkar, O. (2016). Waste biorefinery models towards sustainable circular bioeconomy: Critical review and future perspectives. *Bioresource Technology*. 215: 2–12.
- Wang, A., Liu, W., Ren, N., Zhou, J., Cheng, S. (2010). Key factors affecting microbial anode potential in a microbial electrolysis cell for H₂ production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 35(24): 13481–13487.
- Woodard, D. L., Davis, S. J., Randerson, J. T. (2019). Economic carbon cycle feedbacks may offset additional warming from natural feedbacks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 116(3): 759–764.
- Xu, X., Zhao, Q., Wu, M., Ding, J., Zhang, W. (2017). Biodegradation of organic matter and anodic microbial communities analysis in sediment microbial fuel cells with/without Fe(III) oxide addition. *Bioresource Technology*. 225: 402–408.
- Yang, Y., Zhao, Y., Tang, C., Xu, L., Morgan, D., Liu, R. (2020). Role of macrophyte species in constructed wetland-microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and bioenergy generation. *Chemical Engineering Journal*. (392): 123708.
- Zang, G. L., Sheng, G. P., Li, W. W., Tong, Z. H., Zeng, R. J., Shi, C., Yu, H. Q. (2012). Nutrient removal and energy production in a urine treatment process using magnesium ammonium phosphate precipitation and a microbial fuel cell technique. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 14(6): 1978–1984.
- Zhou, M., Chi, M., Wang, H., Jin, T. (2012). Anode modification by electrochemical oxidation: A new practical method to improve the performance of microbial fuel cells. *Biochemical Engineering Journal*. 60(15): 151–155.