

LAS BACTERIAS TAMBIÉN SON ÚTILES. ¿QUÉ ES UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA?

BACTERIA ARE ALSO USEFUL. ¿WHAT IS A MICROBIAL FUEL CELL?

Ana M. Montiel(1), Erika Méndez(2*), Francisco J. Rodríguez-Valadez(3),
Miguel A. González-Fuentes(2*)

¹Centro de Química-ICUAP, Posgrado en Ciencias Ambientales,

²Facultad de Ciencias Químicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

³Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica S. C., Sanfandila, Pedro Escobedo, Querétaro, México

miguel.gonzalezfuentes@correo.buap.mx

Abstract

Although some can be harmful to humans, causing diseases (pathogenic bacteria), there are also “good” bacteria that help humans; incredible as it may seem, there are many bacteria of this type. In this article, we will talk about an ecological technology based on a type of bacteria called electrogenic. The breathing process of these bacteria is used when they break down the organic matter contained in the wastewater produced by humans, and simultaneously, electrical energy is obtained. This eco-technology is called the Microbial Fuel Cell, and although it was studied for the first time in 1911, it still offers a wide field for the development of scientific research since the development of

a technology that achieves the treatment of residual water and, with it, the obtainment of energy, is considered imperative on the path of development towards a society responsible with the environment.

Keywords: Bacteria, eco-technology, microbial fuel cell, sustainable energy.

Resumen

Las bacterias son microorganismos que habitan en todos los ecosistemas del planeta y las encontramos con tres morfologías, las circulares que son llamadas cocos, las alargadas como bastones llamadas bacilos y las espirales llamadas espiroquetas. Aunque algunas de ellas pueden ser perjudiciales para los seres humanos, provocando enfermedades (bacterias patogénicas), también hay bacterias “buenas” que ayudan a los seres humanos y aunque parezca increíble, existen muchas bacterias de éste tipo. En el presente artículo, hablaremos de una tecnología ecológica que se apoya en un tipo de bacterias llamadas electrogénicas, donde se aprovecha el proceso de respiración de estas bacterias cuando descomponen la materia orgánica contenida en el agua residual producida por los humanos y se obtiene, de forma simultánea, energía eléctrica. Esta eco-tecnología se denomina Celda de Combustible Microbiana, y aunque fue estudiada por primera vez en 1911, sigue ofreciendo un amplio campo para el desarrollo de la investigación científica, ya que el desarrollo de una tecnología que logre el tratamiento del agua residual, y con ello la obtención de energía, se considera imperativo en el camino del desarrollo hacia una sociedad responsable con el medio ambiente.

Palabras clave: Bacterias, eco-tecnología, Celda de Combustible Microbiana, energía sustentable.

Introducción

Las bacterias son organismos unicelulares procariotas (célula sin núcleo ni organelos) con los que se inició la vida en la tierra, y que han evolucionado adaptándose a todos los desastres naturales y eventos catastróficos que han transitado por el planeta, son parte indispensable para el funcionamiento de todos los ecosistemas y además prosperan en condiciones extremas de temperatura y presión (Corrales et al., 2015; NIH, 2022).

Aun cuando la percepción general sobre las bacterias es de organismos carentes de interés, pero con la necesidad de combatirlos debido a que son agentes infecciosos que causan daños a la salud, existen bacterias que han llamado la atención de la comunidad científica, pues al ir comprendiendo mejor sus procesos metabólicos, se han logrado aplicaciones que resultan beneficiosas para la humanidad (Corrales et al., 2015).

Bacterias que pueden ser útiles para el ser humano

Existen bacterias en diferentes ecosistemas que han desarrollado la capacidad de transferir electrones al exterior de sus células mediante el proceso de respiración, ya sea de forma directa (con el contacto directo con el aceptor de electrones) mediante complejos de proteínas conductoras como citocromos tipo C y nanocables o pillis (Figura. 1a) o de manera indirecta con la asistencia de sustancias químicas conocidas como mediadores redox (Figura. 1b), donde dicho mediador entra a la bacteria por su membrana celular oxidándose y ayudado a liberar el electrón, para posteriormente cederlo al aceptor de electrones y reducirse para poder reingresar a la bacteria y continuar el ciclo redox (Cornejo, 2017; Sinche & Velasquez, 2020; Vishwanathan, 2021).

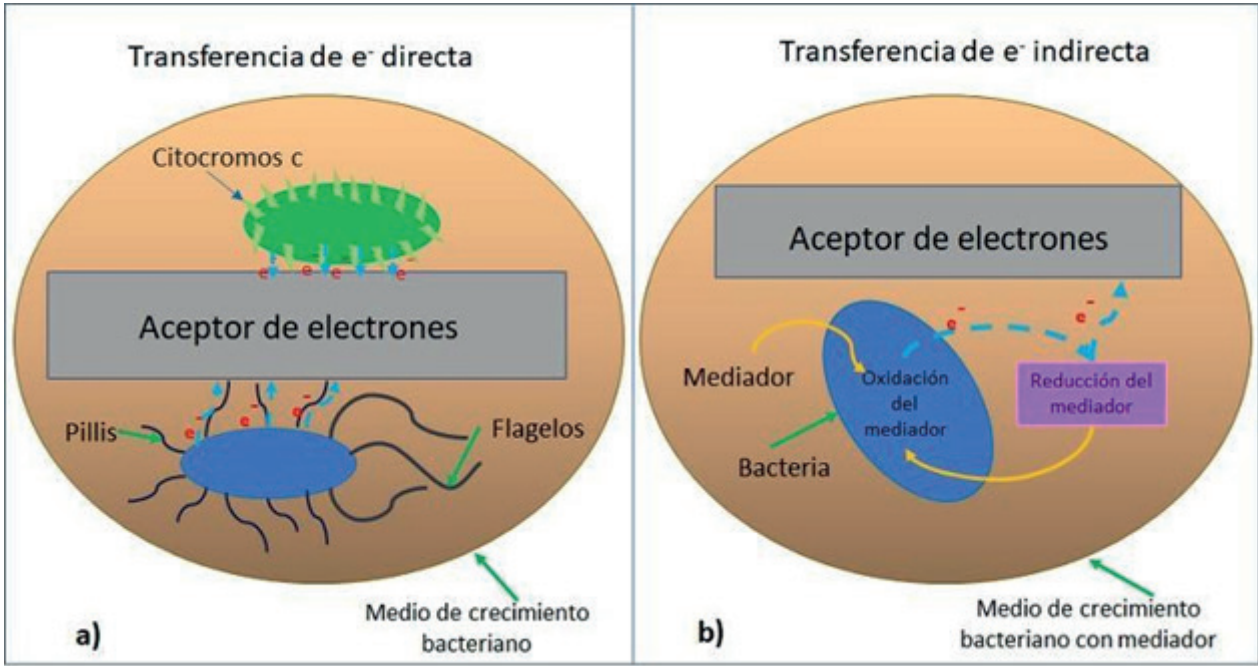


Figura 1. Mecanismos de transferencia de electrones en las bacterias electrogénicas, elaboración propia. a) Transferencia directa mediante citocromos tipo c o filamentos (pilis); b) Transferencia indirecta de electrones mediante el uso de mediadores redox.

Estas bacterias forman una parte importante de los ciclos de intercambio que se dan entre los elementos químicos, los seres vivos y el ambiente, donde se reciclan los elementos del medio ambiente hacia los organismos, y luego a la inversa mediante procesos químicos, conocidos como ciclos biogeoquímicos, como los ciclos del agua, del nitrógeno e incluso el de las rocas, así como de los procesos de biocorrosión, biorremediación y en los procesos bioelectroquímicos, lo que demuestra la importancia de su investigación para diversas aplicaciones útiles al ser humano (Cornejo, 2017; Sinche & Velasquez, 2020; Vishwanathan, 2021).

Las bacterias que transfieren electrones directamente (sin la necesidad de mediadores) se conocen como bacterias electrogénicas, las cuales se enlistan en la Tabla 1 junto con su taxonomía. Entre ellas, *Shewanella putrefaciens* y *Geobacter sulfurreducens* son las más comúnmente empleadas en Celdas de Combustible Microbianas (CCM's) y se puede apreciar su morfología microscópica en la Figura 2 (Esteve-Núñez, 2008; Franks & Nevin, 2010; Sinche & Velasquez, 2020; Yang et al., 2021).

Tabla 1. Tipos de bacterias electrogénicas, taxonomía y respuesta a la tinción de Gram.

Dominio	Reino	Phylum	Familia	Genero	Especie	Gram
Bacteria	Bacteria	Proteobacteria	Comamonadaceae	Rhodoferax	ferriduicens	-
			Shewanellaceae	Shewanella	oneodensis	-
					putrefaciens	-
			Pseudomonadaceae	Pseudomonas	aeruginosa	-
			Aeromonadaceae	Aeromonas	hydrophyla	-
			Geobacteraceae	Geobacter	sulfurreducens	-
		Enterobacteriaceae	Escherichia	coli	-	
		Firmicutes	Clostridiaceae	Clostridium	perfringens	-
					butyricum	-
		Acidobacteriota	Acidobacteriota	Geothrix	fermentans	-
		Bacillota	Bacillaceae	Lysinibacillus	varians	+
Enterococcaceae	Enterococcus		gallinarum	-		
Thermodesulfobacteriota	Geopsychrobacteraceae	Geopsychrobacter	electrodiphilus	-		
Eukarya	Fungi	Ascomycota	Saccharomycetaceae	Saccharomyces	cerevisiae	+/-
				Hansenula	anomala	+/-

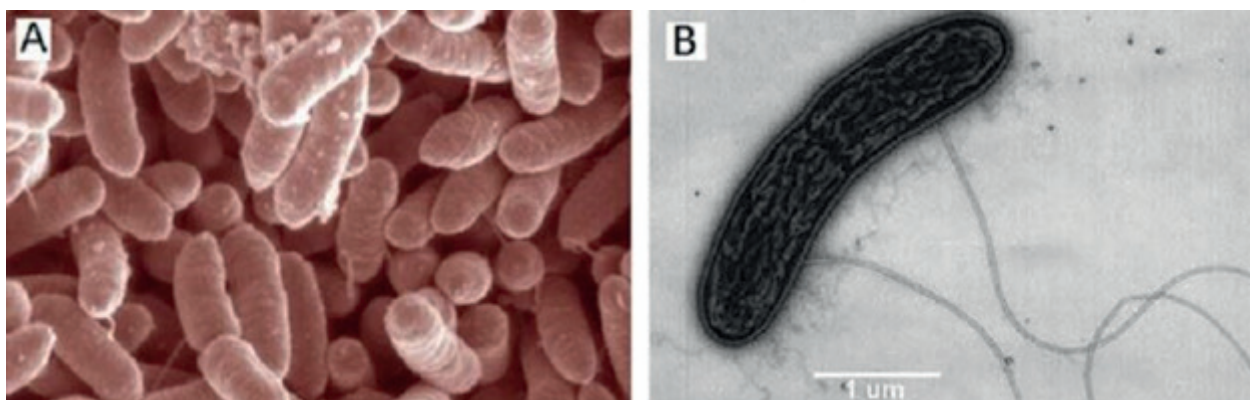


Figura 2. Imágenes de bacterias electrogénicas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). A) *Shewanella putrefaciens*, B) *Geobacter sulfurreducens*. Imágenes tomadas de H. Patil, 2022; y N. Patil, 2022.

Celdas de Combustible Microbianas (CCM)

El conocer cómo algunos microorganismos (como las bacterias electrogénicas) tienen la capacidad de transportar electrones es de utilidad para desarrollar y mejorar bioprocesos electroquímicos en los llamados sistemas bioelectroquímicos, como las Celdas de Combustible Microbianas (CCM's), en las cuales se necesita que los microorganismos transfieran sus electrones a un material conductor (conocido como ánodo) en un compartimento libre de oxígeno para que posteriormente se pueda obtener energía eléctrica (Cornejo, 2017; Sinche & Velasquez, 2020).

La CCM es una biotecnología híbrida compleja, que tiene la capacidad de obtener energía a partir de varios sustratos orgánicos e inorgánicos como los que se encuentran en las aguas residuales, mediante la adaptación de bacterias electrogénicas (BE) que descomponen la materia orgánica y los contaminantes presentes en el medio (Gul et al., 2021; Tan et al., 2021; Yaqoob et al., 2021). Así, la energía química almacenada en las sustancias orgánicas biodegradables del agua residual se convierte directamente en electricidad, por lo que la tecnología de CCM se considera como una fuente

renovable de energía. Se ha demostrado que esta eco-tecnología funciona con una amplia gama de aguas residuales debido al alto contenido de materia orgánica y que es capaz de lograr la eliminación de compuestos orgánicos persistentes, metales pesados y nutrientes de diferentes efluentes residuales (Abdallah et al., 2019; Gul et al., 2021; Tabassum et al., 2021).

Partes que componen una CCM

Cámara anódica

La cámara anódica es donde se encuentran el sustrato (como el agua residual), las bacterias electrogénicas, el ánodo y, en algunos casos, el mediador que facilita la transferencia electrónica. Esta cámara debe ser anaerobia, es decir, sin la presencia de oxígeno. El ánodo, es el elemento de la CCM que sirve como soporte y superficie de desarrollo para el crecimiento de las bacterias electrogénicas, que crean una cobertura denominada biopelícula, la cual hace posible la descomposición del sustrato por un proceso conocido como oxidación (transferencia de electrones hacia el ánodo), dando como resultado el tratamiento al agua residual y la obtención de energía eléctrica por medios naturales, conocida como bioelectricidad (Do et al., 2018; Siddiqui et al., 2021; Song et al., 2020; Yaqoob et al., 2021).

El ánodo debe ser de un material biocompatible (capacidad de un material para permitir que un componente biológico reaccione adecuadamente), para favorecer la transferencia de electrones con las bacterias electrogénicas (Do et al., 2018).

Las reacciones de oxidación que ocurren en el ánodo, y que son las responsables de la descomposición de la materia orgánica, liberan protones (H⁺), los cuales son transportados dentro de la CCM hacia la cámara catódica. De forma simultánea, los electrones que se transfieren al ánodo son transportados también hacia la cámara catódica pero éstos lo hacen mediante un circuito externo que conecta al ánodo con el cátodo (Gretel et al., 2019; Kumar et al., 2016; Pandit et al., 2020; Sravan et al., 2021).

Cámara catódica

La cámara catódica se denomina así porque es la que contiene al cátodo, el cual es un material en donde se llevan a cabo procesos de reducción (liberación de electrones hacia el medio), esta cámara es aerobia (existe presencia de oxígeno) ya que el oxígeno es considerado como el aceptor terminal de electrones más adecuado y es el más utilizado en las CCM's ya que se considera como un elemento renovable. En esta cámara se combinan los protones y los electrones provenientes de la cámara anódica con el oxígeno (que es un aceptor de electrones) para formar agua. El oxígeno, contenido en el aire, se puede suministrar de forma activa, es decir mediante un sistema de aireación artificial, o de forma pasiva, mediante el uso del oxígeno atmosférico presente en el aire natural. También es posible que se utilicen sustancias que modifiquen la velocidad del proceso de reducción del oxígeno llamadas catalizadores (Lawson et al., 2020; Siddiqui et al., 2021; Vishwanathan, 2021; Yaqoob et al., 2021).

Membrana de Intercambio Protónico (MIP) y separadores

La función principal de la MIP es evitar la mezcla de las cámaras anódica y catódica, así como prevenir el paso de oxígeno hacia la cámara anódica, permitiendo el intercambio de protones entre ellas. Sin embargo, no es indispensable, ya que el intercambio de protones se puede llevar a cabo en la fase líquida. El funcionamiento de la CCM que utiliza membrana puede verse afectado y reducir considerablemente su eficiencia, debido a que puede provocar altas temperaturas, incremento en la resistencia interna del sistema, diferencias de pH, bio-incrustación, alta difusión del oxígeno y dilución del

sustrato. Así también, se debe de considerar el alto costo de la MIP, ya que este factor puede influir en su aplicación y escalamiento (Bermudes & Bernal, 2018; Flimban et al., 2020; Gonzalez, 2015; Pandit et al., 2021; Sánchez et al., 2021; Yousefi et al., 2017).

También se puede utilizar como separador, cualquier material que permita el intercambio iónico y convenga la transferencia de protones entre ambas cámaras. El uso de material cerámico como MIP o separador en la CCM se ha mostrado efectivo en varios aspectos, como bajo costo, estabilidad química, térmica y mecánica, lavado simple, no selectividad de iones, su fácil disponibilidad, así como el hecho de que su síntesis se puede realizar por varios métodos y que en aplicaciones en proyectos a gran escala desarrollados a largo plazo, permiten el ahorro del 60% del costo del material de la CCM (Gajda et al., 2015, 2020; Yousefi et al., 2017).

En la Figura 3, se muestra el funcionamiento general de una celda de combustible microbiana de una cámara con aireación pasiva, sin mediador y sin membrana de intercambio protónico.

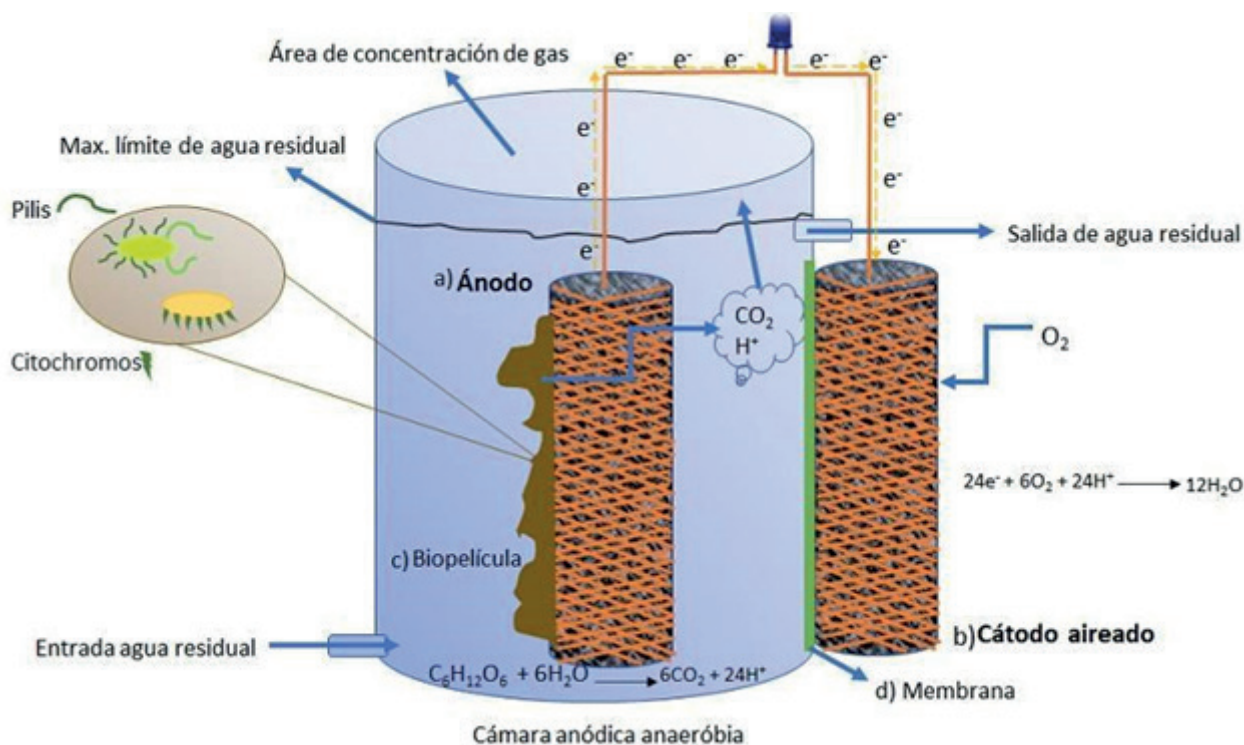


Figura 3. Funcionamiento de una celda de combustible microbiana de una cámara con cátodo aireado de forma pasiva. Elaboración propia con adaptaciones de Cornejo, 2017; Sánchez et al., 2021; y Sinche & Velasquez, 2020.

Configuraciones y beneficios de las CCM's

Configuraciones de CCM's

Existen varias configuraciones de CCM, principalmente para las pruebas a escala laboratorio, donde se investigan las condiciones óptimas para desarrollar su futuro escalamiento y aplicación. Éstas varían en el número de compartimentos, tipos de mediador o bien sin mediador, con o sin membrana de intercambio protónico (MIP), con aireación activa o pasiva, así como diferentes materiales y arreglos de electrodo. Algunos ejemplos se muestran en la Tabla 2 (Lumba & Porras, 2020; Sánchez et al., 2021).

Tabla 2. Configuraciones disponibles de las Celdas de Combustible Microbianas

Configuración de CCM	Características principales
De cámara única	Consiste en una cámara anódica conectada con un cátodo expuesto al aire para que mediante éste se transfieran los protones y electrones. Se recomienda para el tratamiento de carga orgánica en bajas concentraciones, permite reproducir bioprocesos y ejecutar etapas de pulido
De cámara doble	Formada por un compartimiento anódico y uno catódico, con aireación activa
De celdas apiladas	Conformadas por varias celdas conectadas en serie o en paralelo, donde el flujo del sustrato avanza de una celda a la siguiente hasta concluir el sistema de tratamiento
Celda de múltiples ánodos y cátodos	En una sola celda, con la ventaja de permitir una mayor conversión de energía, menor costo y menor superficie requerida

En algunas CCM's de una cámara se emplea MIP, sin embargo, se ha determinado que en ausencia de MIP, la obtención de energía eléctrica puede aumentar en magnitudes como la densidad de potencia (potencia por unidad de área, W/m²), además de tener un bajo costo de operación, ya que el cátodo no necesita aireación activa, pues el oxígeno presente en el aire actúa como aceptor final de electrones (Bermudes & Bernal, 2018; Ccora, 2019).

Beneficios de CCM's

Algunos de los beneficios de operación que se presentan en la aplicación de la eco-tecnología de celdas de combustible microbiana son (Gonzalez, 2015; Lumba & Porras, 2020; Ore & Pompa, 2020; Romero, 2018; Sánchez et al., 2021):

- a) Se obtiene energía directa desde el sustrato (bioelectricidad), lo que las hace una tecnología viable
- b) Se brinda un tratamiento al recurso hídrico residual
- c) Operan eficientemente a temperatura ambiente e incluso a temperaturas bajas, desde 10°C hasta 25°C
- d) Los gases que emiten no requieren tratamiento, pues están enriquecidos con CO₂ de fuentes no fósiles
- e) Comparadas con las tecnologías actualmente usadas para la obtención de energía emiten menor cantidad de CO₂ (aproximadamente un 50% menos)
- f) Son silenciosas
- g) No requieren del suministro de energía para su funcionamiento mientras se use el aireamiento pasivo o un cátodo con recubrimiento biológico (llamado biocátodo)
- h) Se obtiene energía limpia a partir de aguas residuales, que conforman un sustrato de fácil obtención y manipulación
- i) Se tienen grandes expectativas científicas, debido a la efectividad demostrada en investigaciones anteriores
- j) Reducen la producción de sólidos y lodos

Aunque son muchas las ventajas que presenta el uso de bacterias electrogénicas en esta eco-tecnología, las investigaciones continúan para lograr su escalamiento y posible aplicación, lo mismo que ocurre con otras tecnologías emergentes que buscan el aprovechamiento de los residuos en busca de la obtención de energía, ya que todas éstas tecnologías tiene grandes diferencias entre las configuraciones realizadas en el laboratorio y las pruebas de escalamiento y aplicación en escenarios reales (Jadhav et al., 2021)

Conclusiones

Gracias al desarrollo del conocimiento de los procesos metabólicos que realizan las bacterias, se ha mejorado la percepción de la comunidad científica sobre las mismas. En la búsqueda de aplicaciones enfocadas al cuidado del ambiente y de la sociedad actual y futura, las bacterias electrogénicas en especial, resultan de amplio interés, ya que permiten el desarrollo de tecnologías bioelectroquímicas como las CCM's, que pueden ser consideradas como una alternativa ambiental y social adecuada y prometedora, para solucionar de forma eficiente e integral, la problemática relacionada con la obtención de energía eléctrica y la limpieza de los efluentes urbanos.

De lograrse un escalamiento de las CCM's para su aplicación en zonas rurales, se obtendría una descarga de aguas residuales en mejores condiciones hacia los cuerpos receptores, con lo cual mejorarían las condiciones de salud por el uso de aguas negras para riego, así como, la obtención de energía eléctrica utilizable probablemente en sistemas de iluminación. Por su parte, la aplicación de las CCM's en zonas urbanas crearía un mayor impacto, ya que el volumen es considerablemente superior. En este sentido, sería posible el uso de las aguas tratadas para riego de jardines y camellones, mientras que la energía eléctrica obtenida podría ser empleada para la recarga de dispositivos móviles o sistemas de iluminación de bajo consumo energético.

Es así como el estudio y una mayor comprensión de las bacterias, han permitido reconocer la utilidad de varias de ellas, dejando de lado las creencias de que todas la bacterias son dañinas, y que por el contrario, muchas poseen la capacidad de convertirse en grandes aliadas en el desarrollo de una sociedad socialmente responsable, con mejores condiciones de salud y calidad de vida, aprovechando de mejor manera los recursos que nos da el planeta tierra, e incluso los residuos que los propios humanos generamos.

Agradecimientos

Agradezco a la benemérita universidad autónoma de Puebla (BUAP) por fomentar y difundir el interés en la ciencia, y por la oportunidad de desarrollar conocimientos de utilidad para la sociedad, así como a los posgrados de ciencias ambientales y ciencias químicas (BUAP) y al Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica S. C. (CIDETEQ), en los cuales he encontrado el apoyo y guía para la realización de este artículo.

Declaración de privacidad

Los nombres y las direcciones de correo electrónico introducidos en esta revista se usarán exclusivamente para los fines establecidos en ella y no se proporcionarán a terceros o para su uso con otros fines.

Conflicto de Interés

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

Referencias

Abdallah, M., Feroz, S., Alani, S., Sayed, E. T., & Shanableh, A. (2019). Continuous and scalable applications of microbial fuel cells: a critical review. In *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* (Vol. 18, Issue 3). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s11157-019-09508-x>

Bermudes, M., & Bernal, E. (2018). Implementación de una celda de combustible microbiana a escala laboratorio para generación de energía eléctrica. Fundación Universidad de America.

Ccora, B. (2019). Generación de Energía Eléctrica y Tratamiento de Aguas Residuales Municipales Utilizando Celdas De Combustible Microbiano (MfFC) en la Ciudad de Huancavelica” [Universidad Nacional de Huancavelica]. In *Repositorio Institucional - UNH*. <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/2877>

Cornejo, A. (2017). Estudio del microbioma presente en celdas de combustible microbianas. Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica, S.C.

Corrales, L. C., Antolinez Romero, D. M., Bohórquez Macías, J. A., & Corredor Vargas, A. M. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, 13(24), 55. <https://doi.org/10.22490/24629448.1717>

Do, M. H., Ngo, H. H., Guo, W. S., Liu, Y., Chang, S. W., Nguyen, D. D., Nghiem, L. D., & Ni, B. J. (2018). Challenges in the application of microbial fuel cells to wastewater treatment and energy production: A mini review. *Science of the Total Environment*, 639, 910–920. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.136>

Esteve-Núñez, A. (2008). Bacterias productoras de electricidad. Del subsuelo a la pila de combustible. *Temas de Actualidad*, 45, 34–39. www.genomatica.com

Flimban, S., Hassan, S., Rahman, M., & Oh, S. (2020). The effect of Nafion membrane fouling on the power generation of a microbial fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(25), 13643–13651. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.02.097>

Franks, A. E., & Nevin, K. P. (2010). Microbial fuel cells, a current review. *Energies*, 3(5), 899–919. <https://doi.org/10.3390/en3050899>

Gajda, I., Obata, O., Salar-Garcia, M., Greenman, J., & Ieropoulos, I. (2020). Long-term bio-power of ceramic microbial fuel cell in individual and stacked configurations. *Bioelectrochemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2020.107459>

Gajda, I., Stinchcombe, A., Greenman, J., Melhuish, C., & Ieropoulos, I. (2015). Ceramic MFCs with internal cathode producing sufficient power for practical applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(42), 14627–14631. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.039>

Gonzalez, A. (2015). Araceli González del Campo García-Villarrubia. Universidad de Castilla-La Mancha.

Gretel, N., Bacame-Valenzuela, J., Pérez, J., Espejel, F., & Reyes-Vidal, Y. (2019). Las aguas residuales como alternativa para la producción de energía usando sistemas bioelectroquímicos. *Revista Latinoamericana El Ambiente y Las Ciencias*, 1(1), 22–44. [http://jurnalmahasiswa.stiesia.ac.id/index.php/jira/article/download/200/204%0Ahttps://www.oecd.org/dac/accountable-effective-institutions/Governance Notebook 2.6 Smoke.pdf%0Ahttp://www.wiley.com/go/permissions%0Ahttp://journal.feb.unmul.ac.id](http://jurnalmahasiswa.stiesia.ac.id/index.php/jira/article/download/200/204%0Ahttps://www.oecd.org/dac/accountable-effective-institutions/Governance%20Notebook%202.6%20Smoke.pdf%0Ahttp://www.wiley.com/go/permissions%0Ahttp://journal.feb.unmul.ac.id)

Gul, H., Raza, W., Lee, J., Azam, M., Ashraf, M., & Kim, K. H. (2021). Progress in microbial fuel cell technology for wastewater treatment and energy harvesting. *Chemosphere*, 281(May), 130828. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130828>

Jadhav, D. A., Mungray, A. K., Arkatkar, A., & Kumar, S. S. (2021). Recent advancement in scaling-up applications of microbial fuel cells: From reality to practicability. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45(March), 101226. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101226>

Kumar, R., Singh, L., & Zularisam, A. (2016). Exoelectrogens: Recent advances in molecular drivers involved in extracellular electron transfer and strategies used to improve it for microbial fuel cell applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1322–1336. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.029>

Lawson, K., Rossi, R., Regan, J. M., & Logan, B. E. (2020). Impact of cathodic electron acceptor on microbial fuel cell internal resistance. *Bioresource Technology*, 316(July), 123919. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123919>

Lumba, N., & Porras, L. (2020). Generación de bioelectricidad a partir de agua residual doméstica por el método celdas de combustible microbiano (CCM): Una Revisión [Universidad Peruana Unión]. In *Facultad De Ingenieria Y Arquitectura (Issue Ccm)*. http://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/UPEU/523/Shirley_Tesis_bachiller_2017.pdf;jsessionid=A9EF38A91D92BA965849348B-5FC028B4?sequence=1

NIH. (2022). Bacteria. National Human Genome Research Institute. <https://www.genome.gov/es/genetics-glossary/Bacteria>

Ore, F., & Pompa, E. (2020). Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica. Universidad Peruana Unión.

Pandit, S., Savla, N., & Jung, S. (2021). Large-scale MFC: potentials and challenges. *Integrated Microbial Fuel Cells for Wastewater Treatment*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817493-7.00016-3>

Pandit, S., Savla, N., & Jung, S. P. (2020). Recent advancements in scaling up microbial fuel cells. In *Integrated Microbial Fuel Cells for Wastewater Treatment*. INC. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817493-7.00016-3>

Patil, H. (2022). *Geobacter sulfurreducens*. Alchetron. <https://alchetron.com/Geobacter-sulfurreducens>

Patil, N. (2022). *Shewanella*. Alchetron. <https://alchetron.com/Shewanella>

Romero, M. (2018). Determinación de la función de transferencia de una celda de combustible microbiana. Universidad Nacional del Comahue.

Sánchez, M., Fernández, L., & Espinoza-Montero, P. (2021). Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales mediante celdas de combustible microbianas. *Novasnergia Revista Digital De Ciencia, Ingeniería Y Tecnología*, 4(1), 164–180. <https://doi.org/10.37135/ns.01.07.10>

Siddiqui, S., Bhatnagar, P., Dhingra, S., Upadhyay, U., & Sreedhar, I. (2021). Wastewater treatment and energy production by microbial fuel cells. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01411-2>

Sinche, M., & Velasquez, A. (2020). Revisión bibliográfica de la generación de electricidad mediante la aplicación de bacterias electrogenicas. Universidad César Vallejo.

Song, R. Bin, Zhou, S., Guo, D., Li, P., Jiang, L. P., Zhang, J. R., Wu, X., & Zhu, J. J. (2020). Core/Satellite Structured Fe₃O₄/Au Nanocomposites Incorporated with Three-Dimensional Macroporous Graphene Foam as a High-Performance Anode for Microbial Fuel Cells. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 8(2), 1311–1318. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b07059>

Sravan, J., Tharak, A., Modestra, J., Chang, I., & Mohan, S. (2021). Emerging trends in microbial fuel cell diversification-Critical analysis. *Bioresource Technology*, 326(January), 124676. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124676>

Tabassum, N., Islam, N., & Ahmed, S. (2021). Progress in microbial fuel cells for sustainable management of industrial effluents. *Process Biochemistry*, 106(March), 20–41. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2021.03.032>

Tan, W. H., Chong, S., Fang, H. W., Pan, K. L., Mohamad, M., Lim, J. W., Tiong, T. J., Chan, Y. J., Huang, C. M., & Yang, T. C. K. (2021). Microbial fuel cell technology—a critical review on scale-up issues. *Processes*, 9(6), 1–13. <https://doi.org/10.3390/pr9060985>

Vishwanathan, A. S. (2021). Microbial fuel cells: a comprehensive review for beginners. *3 Biotech*, 11(5), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02802-y>

Yang, Y., Wang, Z., Gan, C., Klausen, L. H., Bonn e, R., Kong, G., Luo, D., Meert, M., Zhu, C., Sun, G., Guo, J., Ma, Y., Bjerg, J. T., Manca, J., Xu, M., Nielsen, L. P., & Dong, M. (2021). Long-distance electron transfer in a filamentous Gram-positive bacterium. *Nature Communications*, 12(1), 4–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21709-z>

Yaqoob, A. A., Ibrahim, M. N. M., & Guerrero-Barajas, C. (2021). Modern trend of anodes in microbial fuel cells (MFCs): An overview. *Environmental Technology and Innovation*, 23, 101579. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101579>

Yousefi, V., Mohebbi-Kalhari, D., & Samimi, A. (2017). Ceramic-based microbial fuel cells (MFCs): A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(3), 1672–1690. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.054>