

Aplicaciones de las celdas de combustible microbiano

Marcos Vega González

Graduado en Biología. mvegago3@estudiantes.unileon.es

Introducción

Uno de los mayores problemas al que nos enfrentamos en la actualidad es la contaminación medioambiental provocada principalmente por la actividad humana, incluyendo sus actividades industriales, el transporte y las prácticas de eliminación de desechos. En respuesta a este problema, está creciendo el interés por encontrar fuentes de energía renovables y combustibles biológicos respetuosos con el medio ambiente que puedan suplir las necesidades globales. Una solución prometedora es el uso de Celdas de Combustible Microbiano o “Microbial Fuel Cells” (MFC) y de bacterias electrogénicas. Se trata de una tecnología emergente y en constante evolución cuyo uso ofrece una serie de ventajas sobre las fuentes de energía tradicionales.

Por un lado, son limpias, sostenibles y producen una cantidad mínima de emisiones contaminantes. También son escalables, con adecuación para su aplicabilidad en una variedad de entornos, desde hogares y empresas hasta macroestructuras como centrales eléctricas o plantas de tratamiento de aguas residuales. Por otro lado, todavía hay desafíos que abordar antes de que MFCs y bacterias electrogénicas puedan ser empleadas de manera amplia y sostenible para, de esta forma, competir con las fuentes de energía tradicionales.

Celdas de combustible microbiano

Una MFC es un dispositivo que genera energía eléctrica útil a partir de una conversión electroquímica que sufre un combustible biodegradable debido al metabolismo de las bacterias electrogénicas de la celda. Esto ocurre cuando, bajo unas condiciones concretas, principalmente dependientes del microorganismo, los electrones producidos durante la degradación de materia orgánica son transferidos a un electrodo denominado ánodo en lugar del aceptor natural.

Los componentes de una MFC incluyen (Lee *et al.*, 2017 y Kim *et al.*, 2018) (**Figura 1**):

- **Ánodo:** *El ánodo es el electrodo donde residen los microorganismos y donde tiene lugar la oxidación de la materia orgánica. El ánodo generalmente se constituye a base de carbono y sirve como sitio para la adhesión microbiana y la transferencia de electrones.*
- **Cátodo:** *El cátodo es el electrodo donde se produce la reducción de oxígeno. Llegan los electrones que fluyen del ánodo creando una corriente eléctrica. El cátodo suele estar fabricado a partir de un material con-*

ductor como platino o carbono, aunque también es posible que en él actúen microorganismos aceptores de electrones, en este caso se denominan biocátodos.

- **Membrana:** La membrana separa los compartimentos del ánodo y el cátodo y evita la mezcla directa del anolito y el catolito. Por lo general, está hecho de una membrana de intercambio de protones que permite que solo pasen los protones. La membrana puede no estar presente si se construye un reactor de una única cámara.
- **Electrolito:** El electrolito es un líquido que actúa como medio de transferencia de iones entre el ánodo y el cátodo. También ayuda a mantener un pH neutro en la MFC.
- **Microorganismos:** Los microorganismos en una MFC pueden incluir bacterias, levaduras o algas. Son los encargados de oxidar la materia orgánica y generar electrones, que luego son transferidos al ánodo.

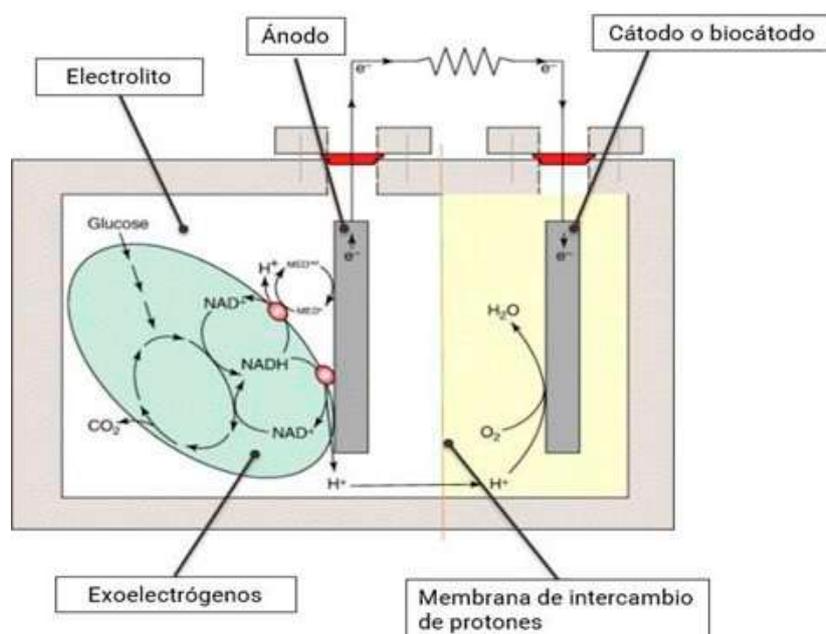


Figura 1. Representación general de la estructura y componentes de las MFC (imagen derivada de Kumar *et al.*, 2015).

Las MFCs junto con las MECs (Microbial Electrolisis Cells, celdas de electrolisis microbianas) constituyen los sistemas bioelectroquímicos (**Figura 2**). La diferencia entre ambas es que las MFCs generan un excedente de energía que se puede utilizar para otro fin y las MECs necesitan un aporte externo de energía, dado que la MFC por si sola es incapaz de cumplir el propósito de esta. Realmente, las MECs son MFCs modificadas. Estos sistemas pueden ser combinados, es decir, se pueden usar MFCs como energía renovable con el fin de alimentar una MEC y cumplir los propósitos que la MFC en solitario es incapaz (Puig *et al.*, 2017).

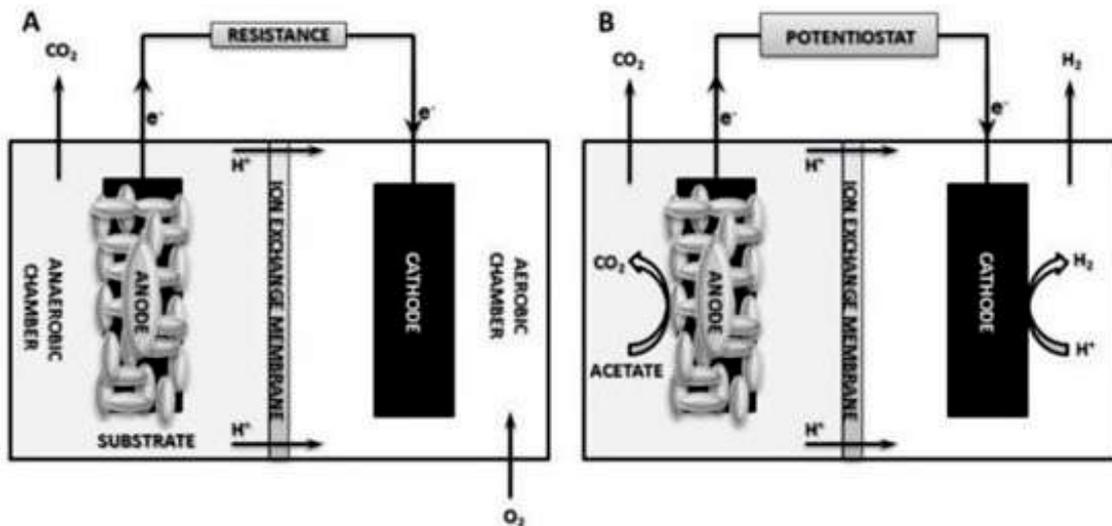


Figura 2. Diagrama esquemático de los sistemas bioelectroquímicos típicos; **A:** celda de combustible microbiano. **B:** celda de electrolisis microbiana (Sobieszuk *et al.*, 2012).

Existe una gran variedad de tipos de MFCs que se diferencian en la disposición geométrica de sus componentes (**Figura 3**). Cada configuración tiene sus ventajas e inconvenientes, los cuales hay que tener en cuenta según la finalidad de estas.

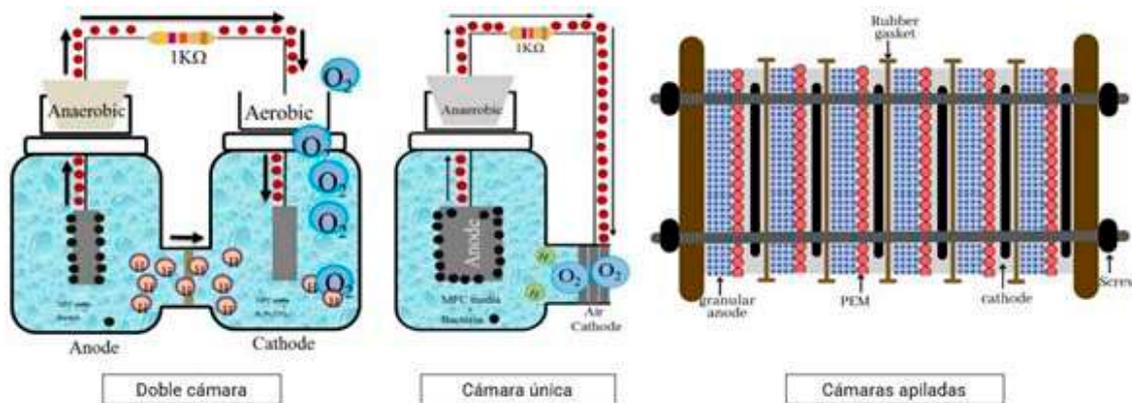


Figura 3. Esquemas de los principales diseños de las celdas de combustible microbianas.

De la misma manera, también hay muchos factores que van a condicionar el funcionamiento y el rendimiento de la celda, como el material utilizado para construir los electrodos, pH, temperatura, salinidad, sustrato y la presencia o ausencia de oxígeno. El mayor condicionante es la comunidad microbiana, ya que alrededor de esta van a variar casi todas las condiciones anteriores.

Bacterias electrogénicas y *biofilms*

Las bacterias electrogénicas son un grupo especial de microorganismos que son capaces de liberar de forma extracelular los electrones generados durante

el metabolismo a través de la membrana enviándolos a unos aceptores terminales. Esta transferencia es un paso esencial para realizar sus funciones vitales e incluso para interactuar con el entorno (Kotloski y Gralnick, 2013). Lo más interesante de esto es utilizar estas bacterias, no sólo para la generación de energía, sino también para la biorremediación o la limpieza de entornos mediante el uso de bacterias que utilicen los propios agentes contaminantes para la producción de energía (Lovley, 2006).

Podemos encontrar una enorme diversidad de microorganismos que participan en el proceso de generación de una corriente eléctrica. Diferenciamos las bacterias que liberan electrones, exoelectrógenas y aquellas que los aceptan, electrótrofas (Kumar *et al.*, 2016). Diversos análisis sobre *biofilms* en los electrodos de la MFC demuestran que no existe un microorganismo principal en las comunidades bacterianas que se generan en el ánodo. Si bien es cierto que no todos tienen la misma capacidad de generación de electricidad, los cultivos mixtos son más eficientes que los puros debido a las interacciones sinérgicas que ocurren entre ellos. Los cultivos puros son más usados en la investigación que en la práctica.

Los *biofilms* son comunidades de microorganismos que se adhieren entre sí mediante una matriz extracelular, moléculas de adhesión y pilis producidos por las bacterias como consecuencia del mecanismo de *quorum sensing*, un proceso de comunicación entre las bacterias mediante el aumento de concentraciones locales la molécula señal Acil-Homoserina-Lactona (AHL) en bacterias gram-negativas, y de oligopéptidos en gram-positivas (Dichschat *et al.*, 2010). Éstas activan la síntesis de segundos mensajeros intracelulares (como c-di-GMP en *P. aeruginosa*) que inician las vías de expresión para la formación de componentes de unión del *biofilm* conocidos como sustancias poliméricas extracelulares.

La formación de este *biofilm* electroactivo sobre el ánodo es fundamental para la funcionalidad de la MFC y la generación de electricidad de manera eficiente. Sin la colonización microbiana de los electrodos, no se generaría suficiente poder eléctrico para hacer funcionar la celda. Para ello, es importante la rápida formación de este *biofilm* permitiendo el funcionamiento temprano de la MFC, principalmente para optimizar la rentabilidad del proceso (Cui *et al.*, 2016). Para permitir la transferencia de electrones desde las capas externas del *biofilm*, las bacterias hacen uso de unas estructuras similares a los pili denominadas nanotubos (*nanowires*) que les permiten interactuar a distancia con otras bacterias o con el ánodo directamente.

Aun así, la formación de una película muy gruesa puede dificultar el rendimiento de trabajo debido a que la ruta de transferencia de electrones es más larga y, a su vez, se concentran más metabolitos secundarios en la biopelícula que pueden interferir en el proceso. Eso también conlleva la deposición de un exceso de sustancias poliméricas extracelulares adhesivas que tienen cierto efecto aislante, interfiriendo en la transferencia extracelular de electrones.

Transferencia extracelular de electrones

La característica diferenciadora de los exoelectrógenos respecto al resto de microorganismos es la capacidad de liberar los electrones generados durante el metabolismo hacia el exterior de la célula (**Figura 4**).

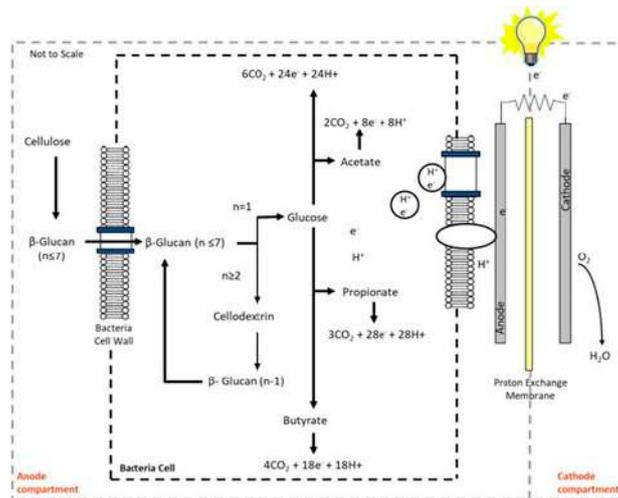


Figura 4. Mecanismo de liberación de electrones del sustrato por parte de los microorganismos y su transferencia al ánodo.

Los microorganismos extienden su circuito redox interno a través de la membrana celular. Los electrones pasan por las proteínas de la membrana para la descarga en el aceptor terminal de electrones, el ánodo, mientras que los protones salen de la cámara a través de una membrana. A este fenómeno se le conoce como transferencia extracelular de electrones (**Figura 5**). Las proteínas de membrana tienen que ser estructuras especiales que permitan la transferencia selectiva de electrones fuera de ella. Los mecanismos de transferencia de electrones son esencialmente los mismos para electrógenos y electrotrófos (Reguera, 2018).

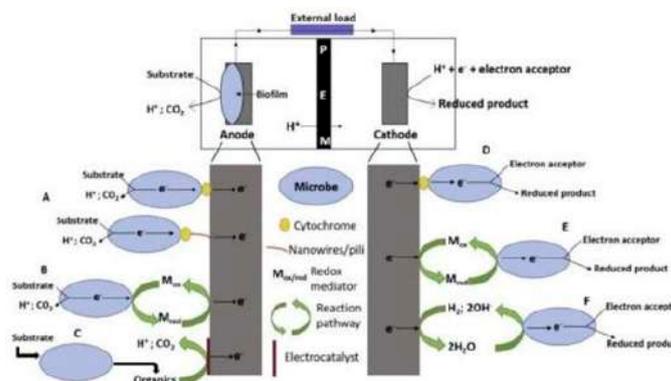


Figura 5. Diagrama esquemático que ilustra la transferencia electrónica extracelular en el ánodo y cátodo de una celda de combustible microbiana. **(A)** transferencia directa del microbio al ánodo; **(B)** transferencia electrónica desde el ánodo a través de mediador redox; **(C)** transferencia electrónica mediada vía metabolitos reducidos; **(D)** transferencia directa del microbio al cátodo; **(E)** transferencia indirecta desde el cátodo a través de un mediador redox; **(F)** transferencia electrónica del cátodo al microorganismo vía oxidación del hidrógeno (Aiyer, 2020).

Entre las bacterias electrogénicas se destacan aquellas pertenecientes a los géneros *Geobacter* y *Shewanella*, las cuales han sido históricamente más estudiadas debido a que al inicio del estudio de este tipo de microorganismos se pensaba que únicamente las bacterias reductoras del hierro eran activas en las MFCs. Podemos destacar dos especies modelo del proceso de transferencia extracelular de electrones, *Geobacter sulfurreducens* (Figura 6) y *Shewanella oneidensis* (Figura 7), en las cuales se han detallado los mecanismos de transferencia y las estructuras involucradas en ella. En ambos casos las bacterias poseen un tipo principal de paso de electrones, aunque pueden utilizar también otros mecanismos de forma secundaria y minoritaria.

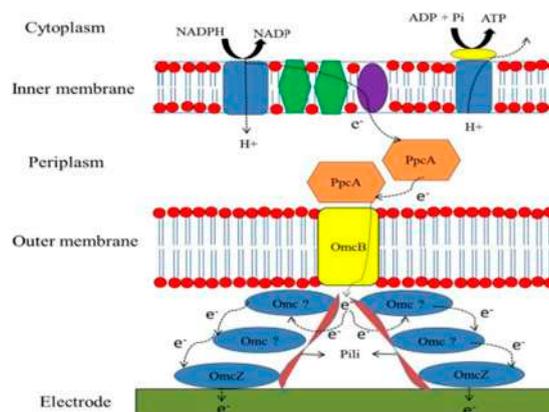


Figura 6. Proteínas involucradas en la transferencia directa de electrones en *G. sulfurreducens*. El organismo posee diferentes citocromos-c para la transferencia, sin embargo, tan solo el papel de OmcB y OmcZ es aceptado actualmente. Las células con contacto directo con el electrodo utilizan los citocromos-c Om para la transferencia, mientras que las células distantes utilizan estos citocromos junto a los *pilis*. Los citocromos PpcA se encuentran en el espacio periplásmico y forman complejos para transportarlos a los citocromos de la membrana externa (Kumar *et al.*, 2016).

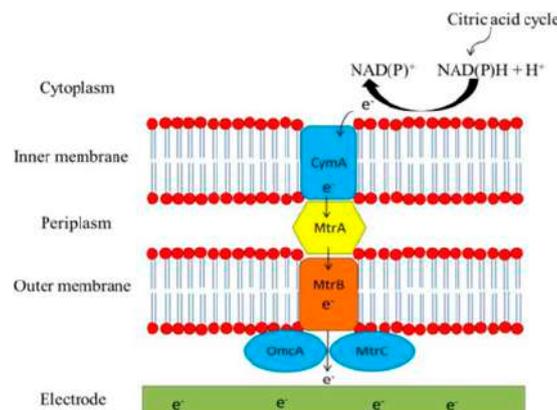


Figura 7. Transferencia de electrones mediada en *Shewanella oneidensis*. Los electrones se transfieren por la membrana interna (celular) a través de CymA y por la membrana externa mediante MtrA y MtrB. Finalmente, el complejo de citocromos-c Om (similar a la transferencia directa), a través de los mediadores de flavina, transfieren los electrones al electrodo (Kumar *et al.*, 2016).

Aplicaciones

Durante los últimos años se han estudiado diversas aplicaciones de estos sistemas, entre las que predominan: la valoración y tratamiento de aguas residuales (donde no solo se eliminan los desechos orgánicos de estas aguas, sino que se puede aprovechar la energía eléctrica generada durante este proceso para producir energía); la biorremediación *in situ* de suelos, sedimentos o acuíferos contaminados; la desalinización de aguas o el uso como biosensores.

Tratamiento y valoración de aguas residuales

Las MFCs son capaces de generar energía eléctrica directamente a partir de la degradación del material orgánico que se encuentra en las corrientes de agua residuales. Las *Submerged Microbial Fuel Cells* (SMFCs) consisten en un ánodo incrustado en un sedimento anaeróbico y un cátodo suspendido en una columna de agua aeróbica (Chen *et al.*, 2016). En este caso, el agua contaminada pasaría por el ánodo donde las bacterias degradan los carbohidratos, lípidos y proteínas oxidándolos y liberando los electrones. Estas celdas son especialmente eficaces en aguas residuales de la industria alimentaria que carga una alta cantidad de nutrientes aprovechables por las bacterias (**Figura 8**).

Metales pesados

Las corrientes de aguas residuales que contienen metales pesados requieren un tratamiento adicional, ya que generalmente son contaminantes no biodegradables con un efecto tóxico para el medio ambiente y la salud humana. La aplicación de las MFCs puede combinar el tratamiento de aguas residuales con la recuperación de metales sin requerimientos energéticos adicionales (Huang *et al.*, 2013). Para eliminar estos metales en las MFCs, las aguas residuales se introducen en el lado del cátodo y estos compuestos se utilizan como aceptores finales de electrones, reduciéndolos a formas menos tóxicas. En el ánodo, se usa acetato comúnmente como fuente de carbono, el lodo como inóculo, y se adopta una formulación sintética para imitar las aguas residuales en el cátodo (Huang *et al.*, 2013; Ye *et al.*, 2019). Los metales pesados solo pueden convertirse en formas menos tóxicas mediante su reducción, o inmovilizarse para reducir su biodisponibilidad. Bajo la acción de un campo eléctrico, los iones metálicos con carga positiva migran del ánodo al cátodo donde son eliminados por precipitación o adsorción.

Nitrógeno y fósforo

El nitrógeno y el fósforo en concentraciones altas pueden causar varios problemas ambientales (por ejemplo, eutrofización, alteración del crecimiento de las especies, deterioro de la calidad del agua), pero su uso en la agricultura es vital y las reservas de fósforo se están agotando. Por tanto, la gestión eficiente de los nutrientes en la depuración de aguas residuales consiste en su valorización.

La recuperación de nitrógeno y fósforo se puede realizar, simultáneamente, por precipitación química y extracción con aire/nitrógeno a un pH alcalino. La recuperación de nitrógeno (en forma de amoníaco) en las MFCs es posible debido a la migración de cationes (formados en la reacción de oxidación en el bioánodo), a través de una membrana de intercambio de protones, al cátodo, aumentando el pH catódico y favoreciendo el amoníaco recuperado. Posteriormente, se aplica la técnica de *stripping* para extraer y recuperar el amoníaco. Durante la operación de la MFC, en presencia de amonio y magnesio, se genera un precipitado con alto contenido de fósforo (en forma de estruvita) en la superficie del cátodo del electrodo y luego se elimina y se recupera sumergiendo los electrodos en soluciones de disolución (Ye *et al.*, 2019).

Antibióticos

Debido a la hidrofilia y la estructura estable de los antibióticos, el proceso de tratamiento tradicional no puede eliminar eficazmente los antibióticos del agua. Sin embargo, se ha demostrado que los antibióticos biodegradables pueden ser eliminados en la MFC, por lo que se considera un método prometedor para degradar los contaminantes antibióticos. Funciona mejor principalmente debido a que los microorganismos están inmovilizados en un *biofilm*, pero hay un riesgo de que los antibióticos puedan dañarlo y detengan el funcionamiento del sistema. Existen tres mecanismos por los cuales se eliminan los antibióticos en las MFCs: antibióticos que actúan como aceptores de electrones o fuente de carbono en el ánodo, degradados en el cátodo por los microbios o reducidos por estos, y también eliminación por radicales libres producidos por las reacciones microorganismo- electrodo (Yanuka-Golub *et al.*, 2016).

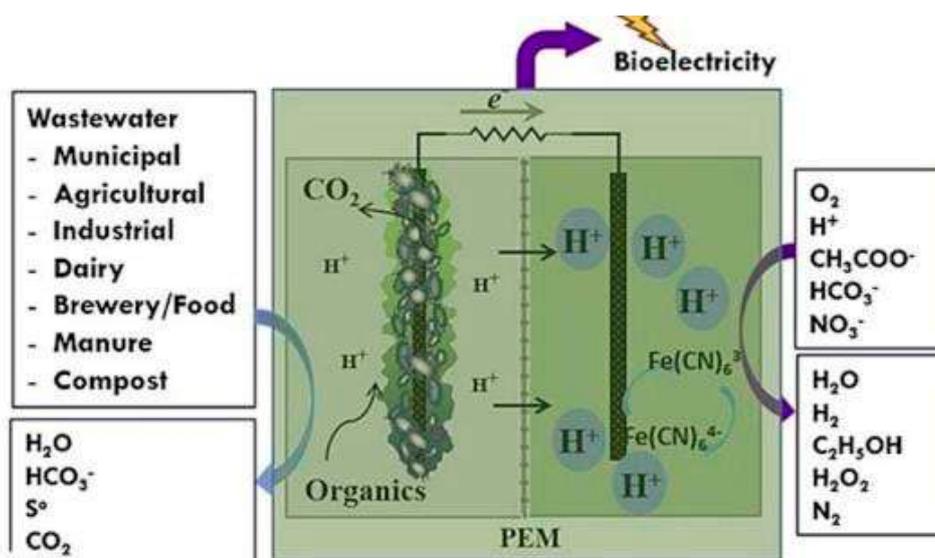


Figura 8. Celda de combustible microbiana para el tratamiento de aguas residuales con un cátodo químico: la cámara de ánodo se puede alimentar con varias fuentes de aguas residuales, mientras que la cámara de cátodo se puede utilizar para sintetizar productos químicos útiles o degradar contaminantes ambientales (Gude, 2016).

Biorremediación

La tecnología MFC se ha estudiado para la biorremediación *in situ* de suelos contaminados, sedimentos, aguas subterráneas y recursos hídricos superficiales (**Figura 9**). Este es un proceso biológico realizado por una comunidad microbiana que existe naturalmente en el medio y que es capaz de degradar los contaminantes en otros menos dañinos (Borello *et al.*, 2020). Este proceso es conocido como bioelectrorremediación, y trae ventajas sobre las técnicas convencionales como la microrremediación, la fitorremediación y la biorremediación bacteriana tradicional, ya que permite la producción de energía (aunque menor que la que se puede producir por aguas residuales). Al igual que hemos comentado en el apartado anterior, en las MFCs se permiten reacciones de oxidación y reducción sobre los contaminantes que conducen a una eliminación completa de éstos (Borello *et al.*, 2020). Según Modin y Aulenta (2017), las MFCs pueden constituir un dispositivo eléctrico autosostenible para la biorremediación que funcione de manera continua y autónoma a partir de la energía que genera ella misma. Sin embargo, este proceso de biorremediación se encuentra limitado por la disponibilidad de electrones en el medio para mantener el metabolismo anaeróbico de los microorganismos (Rodrigo *et al.*, 2014).

Las MFCs para la biorremediación pueden usarse combinadas con otras técnicas, como tratamientos biológicos o químicos tradicionales, o junto a las MECs.

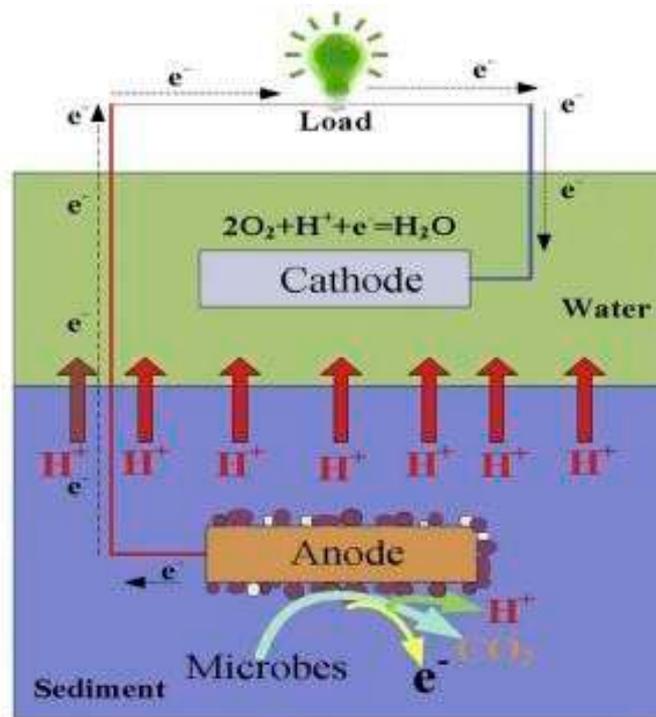


Figura 9. Principio del funcionamiento de una celda de combustible microbiana (MFC) empleada en la biorremediación del sedimento de un acuífero (Prasad y Kumar, 2021).

Desalinización

Con simples modificaciones en su estructura y funcionamiento las MFCs pueden desalinizar el agua aprovechando los gradientes que se generan de forma natural en las cámaras que favorecen la difusión de iones fuera de la cámara de desalinización, quedando en ella el agua potable. Estas celdas se conocen como celdas de desalinización microbiana (MDC). Estas MDCs desalinizan agua salobre para el consumo seguro y tratamiento de aguas residuales, al mismo tiempo que producen energía. Para construir esta celda se integra una cámara adicional en un diseño típico de la MFC entre las cámaras anódica y catódica. Las cámaras están separadas por una membrana de intercambio de aniones (AEM) y una membrana de intercambio de cationes (CEM) (Saeed *et al.*, 2015) (**Figura 10**).

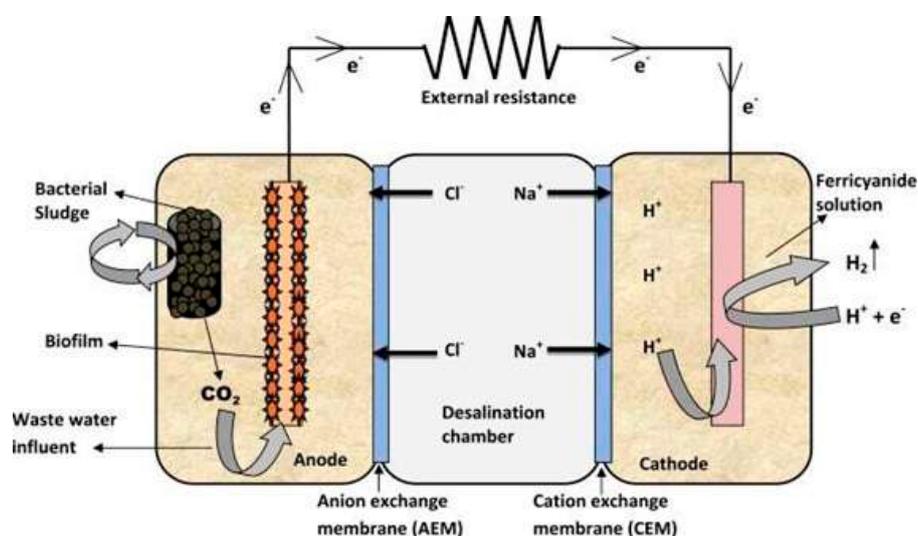


Figura 10. Celda de desalinización microbiana (MDC) con biocátodo (Saeed *et al.*, 2015).

Biosensores

La capacidad de producir y mantener una corriente eléctrica como respuesta a un determinado comportamiento biológico es muy atractiva para la aplicación en sensores biológicos (**Figura 11**). Las bacterias actúan como los agentes de reconocimiento de un analito o cambios en las condiciones del ambiente; como consecuencia de estos cambios se produce un cambio en el potencial eléctrico de la celda, y esto es usado como señal que se transduce para ser procesada. Estos sistemas se conocen como biosensores potenciométricos. Estos biosensores han sido principalmente empleados como sensores de la calidad del aire y del agua, midiendo el pH, temperatura o también para identificar productos químicos específicos como 23 ácidos grasos volátiles o AGVs como acetato, propionato y butirato; además estos sensores biomonitorizan la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), y evalúan la concentración de tóxicos en el agua (Sun *et al.*, 2019).

Las principales ventajas de las MFCs como biosensores son el monitoreo en tiempo real, su actividad *in situ* continua, su largo tiempo de actividad

y su corto tiempo de producción, además de su portabilidad, pudiendo operar en áreas remotas y como sistemas autosustentables que funcionan durante largos periodos de tiempo. Sin embargo, ocasionalmente pueden presentar tiempos prolongados de aclimatación y recuperación, menor sensibilidad, poca reproducibilidad y muchas veces una poca selectividad, pero se espera superar estos problemas en un futuro cercano.

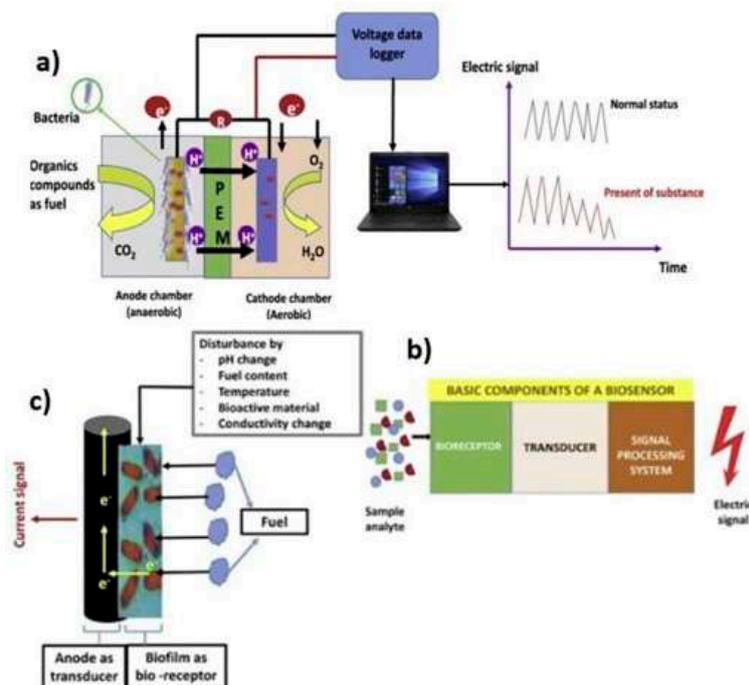


Figura 11. (a) Mecanismo básico de un biosensor basado en una celda de combustible microbiano; (b) componentes del biosensor; (c) principios básicos del biosensor (Hang *et al.*, 2020).

Producción de H₂ y otros productos

Teniendo en cuenta las necesidades energéticas futuras y el agotamiento de los combustibles fósiles, el hidrógeno se señala como un combustible viable para una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo su uso para la generación de electricidad. El hidrógeno se puede producir mediante varios enfoques. Sin embargo, la producción de hidrógeno mediante procesos biológicos, por ejemplo, a través de las MECs ha atraído mucha atención en los últimos años, ya que no consumen energía y son ecológicos (Sharma *et al.*, 2020).

Para la síntesis de hidrógeno y otros muchos productos, es necesario el uso de las MECs, dado que las MFCs no producen la suficiente energía para que las reacciones de obtención de los compuestos ocurran de manera espontánea. Esta MEC funciona como un electrolizador, que puede utilizar materia de desecho y necesita un pequeño aporte de energía inicial con el fin de sintetizar y liberar H₂ con un mayor potencial energético, si bien es cierto que una o varias MFCs po-

drían usarse para alimentar la MEC (Sharma *et al.*, 2020). Se puede utilizar también una MEC para potenciar y acelerar la síntesis de metano a partir de desechos gracias a la sinergia de bacterias acetogénicas y metanógenas hidrogenotróficas. También facilitan la obtención de ácido fórmico, peróxido de hidrógeno o incluso la separación y separación de productos como el amoníaco.

Referencias

- Aiyer, K.S. 2020. How does electron transfer occur in microbial fuel cells? *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 36(2). doi:10.1007/s11274-020-2801-z.
- Borello, D., Gagliardi, G.G., Aimola, G., Ancona, V. *et al.* 2021. Use of microbial fuel cells for soil remediation: A preliminary study on DDE. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(16): 10131–10142.
- Chen, S., Tang, J., Fu, L., Yuan, Y. y Zhou, S. 2016. Biochar improves sediment microbial fuel cell performance in low conductivity freshwater sediment. *Journal of Soils and Sediments*, 16(9): 2326–2334.
- Cui, M., Cui, D., Gao, L., Cheng, H. y Wang, A. 2016. Analysis of electrode microbial communities in an up-flow bioelectrochemical system treating azo dye wastewater. *Electrochimica Acta*, 220: 252–257.
- Dickschat, J.S. 2010. Quorum sensing and bacterial biofilms. *Natural Product Reports*, 27(3): 343.
- Gude, V.G. 2016. Wastewater treatment in microbial fuel cells – an overview. *Journal of Cleaner Production*, 122: 287–307.
- Hang, M., Ngo, H.H., Guo, W., Chang, S.W. *et al.* 2020. Microbial fuel cell-based biosensor for online monitoring wastewater quality: a critical review. *Science of the Total Environment*, 712: 135612.
- Huang, L., Li, T., Liu, C., Quan, X. *et al.* 2013. Synergetic interactions improve cobalt leaching from lithium cobalt oxide in microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 128: 539–546.
- Kim, Y., Lee, J., Lee, S., Kim, J. y Lee, H. 2018. Microbial fuel cells: A review of current progress and future prospects. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(12): 5766–5786.
- Kotloski, N.J. y Gralnick, J.A. 2013. Flavin electron shuttles dominate extracellular electron transfer by *Shewanella oneidensis*. *mBio*, 15;4(1): e00553-12.
- Kumar, R., Singh, L. y Zularisam, A.W. 2016. Exoelectrogens: recent advances in molecular drivers involved in extracellular electron transfer and strategies used to improve it for microbial fuel cell applications. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 56: 1322–1336.
- Kumar, R., Singh, L., Wahid, Z.A. y Din, M.F.M. 2015. Exoelectrogens in microbial fuel cells toward bioelectricity generation: A review. *International Journal of Energy Research*, 39(8): 1048–1067.

- Lee, J., Kim, Y., Lee, S. y Kim, J. 2017. Microbial fuel cells: principles and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68: 683–696.
- Lovley, D.R. 2006. Microbial fuel cells: novel microbial physiologies and engineering approaches. *Current Opinion in Biotechnology*, 17(3): 327–332.
- Prasad, J. y Tripathi, R.K. 2021. Effect of sediment microbial fuel cell stacks on 9 V/12 V DC power supply. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(27): 14628–14638.
- Puig, S., Ganigué, R., Batlle-Vilanova, P., Balaguer, M.D., Bañeras, L. y Colprim, J. 2017. Tracking bio-hydrogen-mediated production of commodity chemicals from carbon dioxide and renewable electricity. *Bioresource Technology*, 228: 201–209.
- Reguera, G. 2018. Biological electron transport goes the extra mile. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(22): 5632–5634.
- Rodrigo, J.A., Boltes, K. y Estéve-Núñez, A. 2014. Microbial-electrochemical bioremediation and detoxification of dibenzothiophene-polluted soil. *Chemosphere*, 101: 61–65.
- Saeed, H.M., Husseini, G.A., Yousef, S., Saif, J. *et al.* 2015. Microbial desalination cell technology: A review and a case study. *Desalination*, 359: 1–13.
- Sharma, S., Basu, S., Shetti, N.P. y Aminabhavi, T.M. 2020. Waste-to-energy nexus for circular economy and environmental protection: Recent trends in Hydrogen energy. *Science of the Total Environment*, 713, 136633.
- Sobieszuk, P., Zamojska-Jaroszewicz, A. y Koltuniewicz, A.B. 2012. Harvesting energy and hydrogen from microbes. *Inzynieria Chemiczna I Procesowa*, 33(4): 603–610.
- Sun, H., Zhang, Y., Wu, S., Dong, R. y Angelidaki, I. 2019. Innovative operation of microbial fuel cell-based biosensor for selective monitoring of acetate during anaerobic digestion. *Science of the Total Environment*, 655: 1439–1447.
- Yanuka-Golub, K., Reshef, L., Rishpon, J. y Gophna, U. 2016. Community structure dynamics during startup in microbial fuel cells – the effect of phosphate concentrations. *Bioresource Technology*, 212, 151–159.
- Ye, Y., Ngo, H.H., Guo, W., Liu, Y. *et al.* 2019. Feasibility study on a double chamber microbial fuel cell for nutrient recovery from municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 358: 236–242.