



# Hot Science

# Las Electro-poderosas: Bacterias creadoras de electricidad

## Resumen

A medida que se estudian a las bacterias, más nos sorprenden, esta vez nos encontramos con bacterias que tienen la facultad de producir electricidad mediante el uso de un dispositivo conocido como Celda de Combustible Microbiana (CCM), que produce electricidad por medio de la respiración celular, además este descubrimiento puede tener diversas aplicaciones para lograr tecnologías amigables con el ambiente. Entre las aplicaciones de la CCM está el tratamiento de aguas residuales de diversos efluentes, tratamiento de suelos contaminados y recuperación de metales de interés.

*Palabras clave:* bacterias exoelectrogénicas, electricidad, Celda de Combustible Microbiana.

Cuando pensamos en un científico, imaginamos a un ser fuera de serie con el pelo despeinado y un tanto chiflado. Puede que también pensemos en una persona socialmente retraída y reservada, por ejemplo, el Dr. Robert Bruce Banner, mejor conocido como Hulk. Este personaje, a consecuencia de sus experimentos en el laboratorio fue expuesto accidentalmente a la radiación gamma que modificó su ADN. Esto originó una mutación que le otorgó facultades superiores poco comprendidas por el entorno. Como sabemos, la realidad supera la ficción, y como en los cómics, puede haber historias de superhéroes: seres vivos que de acuerdo con las condiciones de su hábitat se han adaptado y desarrollado un superpoder; sin embargo, este permaneció oculto y fue descubierto hasta

Marcela Méndez-Tovar<sup>\*1</sup>, Ma. Concepción Romero-Serrano<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro.

<sup>2</sup>Departamento de Química, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.

\*Autores para la correspondencia  
<sup>1</sup>marcela.mendez.tovar@gmail.com  
<sup>2</sup>concepcionmacoro@gmail.com

principios del siglo pasado, para que en un futuro esté al servicio de toda la humanidad. Nos referimos a las bacterias capaces de producir electricidad.

## El comienzo de todo

El ser humano ha tenido un gran interés por experimentar con la energía eléctrica en seres vivos. Los primeros estudios que relacionaron la electricidad con los seres vivos se publicaron alrededor del año 1791. Fueron realizados por el médico italiano Luigi Galvani, un eminente profesor de anatomía en la universidad de Bolonia. Galvani estudiaba los efectos de la electricidad en las ranas, y para él los tejidos animales estaban dotados de electricidad, promoviendo la contracción de los músculos. Los trabajos de Galvani inspiraron a Mary Shelley en la escritura de la novela Frankenstein que ha mostrado la fascinación por el uso de la electricidad. Aunque se han estudiado los efectos de aplicación de la electricidad en seres vivos, también puede ser al revés, es decir utilizar un ser vivo para producir energía eléctrica. En 1911 Michael Potter, profesor de Botánica en la universidad de Durham; construyó por primera vez una “celda bacteriana” que en la actuali-

dad se le conoce como “Celda de Combustible Microbiana” (CCM) [1,2]. En este dispositivo se observó cómo algunas bacterias tienen el superpoder de generar electricidad [3].

Este tema permaneció como algo curioso y hasta principios de 1960 fue retomado por científicos para investigar cómo producir electricidad a partir de diferentes tipos de bacterias y biorresiduos en naves espaciales.

### El surgimiento del poder

Los seres humanos para vivir consumimos diversos alimentos ó compuestos orgánicos que representan una fuente de carbono. Al introducirse en nuestro cuerpo son transformados por diversas reacciones bioquímicas que conforman el metabolismo, de esta manera se obtiene la energía para que nuestro organismo

funcione. Como parte de este proceso, a nivel celular hay una cadena de reacciones químicas en las que se producen electrones que son transportados “eslabón por eslabón”. En el último eslabón ó al final de la cadena; el oxígeno acepta los electrones por lo que al oxígeno se le llama aceptor final; además, en este proceso se libera energía, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O). A este recorrido de electrones cuyo aceptor final es el oxígeno y en donde se libera energía se le denomina respiración aerobia. En otras palabras, somos aerobios debido a que el aceptor final de electrones es el oxígeno, es decir respiramos oxígeno. En el caso de las bacterias, la mayoría también consumen fuentes de carbono, algunas de ellas son aerobias (requieren oxígeno para su respiración), y tienen sus propias reacciones metabólicas. Pero a diferencia de nosotros, existen bacte-

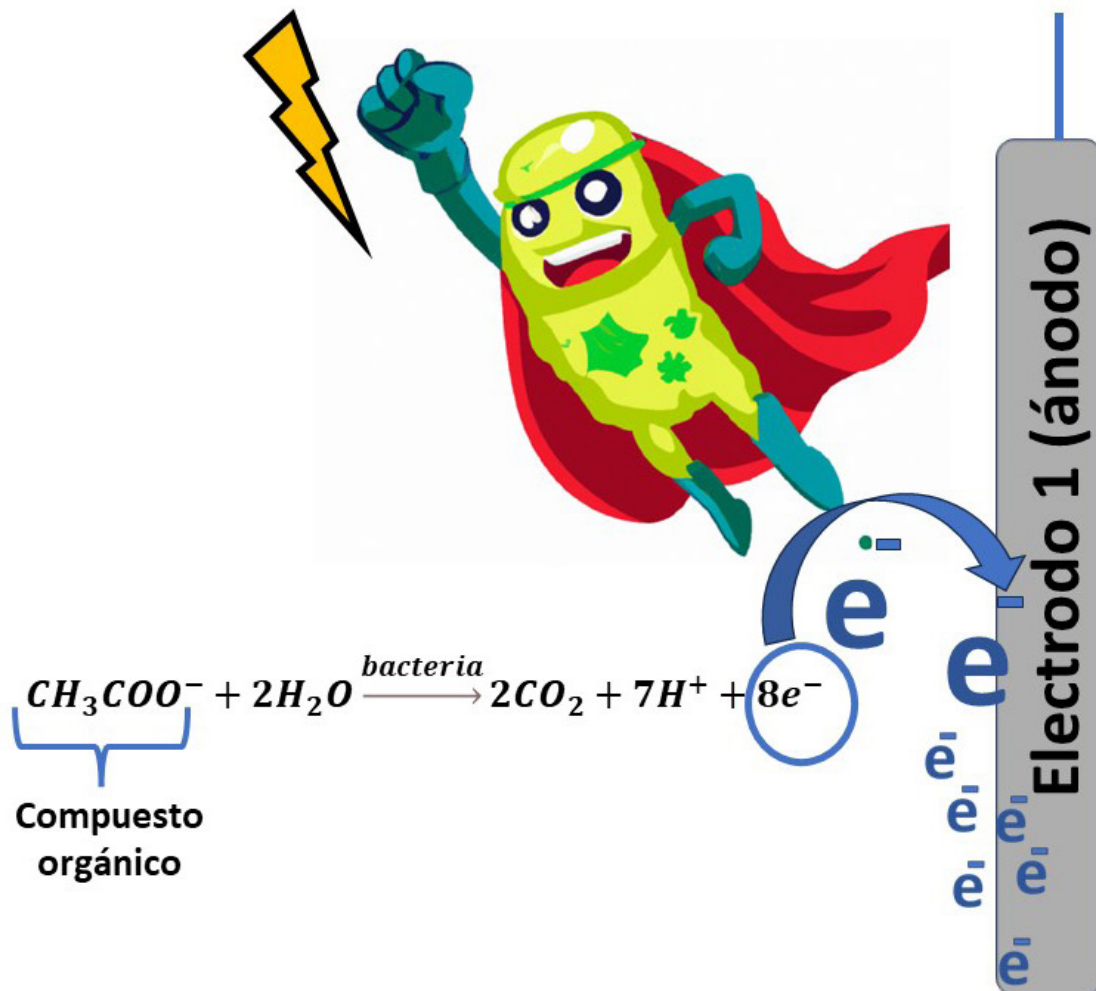


Figura 2. Bacteria exoelectrogénica transfiriendo electrones al electrodo 1 (ánodo). La reacción de oxidación que se presenta propone el ion acetato, sin embargo, podría utilizarse otro compuesto orgánico.

rias que no necesitan oxígeno, por lo que se les denomina anaerobias. Su respiración celular usa otros aceptores finales diferentes del oxígeno; como pueden ser iones inorgánicos, por ejemplo: el nitrato, el sulfato, o algún metal. Cuando el aceptor final es un metal se dice que “estas bacterias tienen la capacidad de respirar metales”. Estas bacterias que tienen la capacidad de respirar metales, transfieren electrones a un electrodo (hecho de una barra de metal u otro material). El pase de electrones entre la bacteria y el electrodo sucede mediante reacciones químicas redox (reacciones de oxidación-reducción), ver Figura 1. Debido a esta característica tan peculiar a estas bacterias se les conoce como exoelectrogénicas, que se refiere a aquellos microorganismos que pueden transferir electrones fuera de su membrana celular. De aquí proviene su superpoder. Entre las bacterias más importantes que se conocen por ser exoelectrogénicas y utilizarse en las CCM, se encuentran *Geobacter sulfurreducens* y *Shewanella oneidensis* [3]. Estas bacterias se han encontrado en sedimentos marinos y ambientes acuáticos. Se sabe que ambas especies requieren de carbono y compuestos orgánicos como fuentes de energía y crecimiento [4,5]. Además, *G. sulfurreducens* está catalogada como una bacteria anaerobia. Por otro lado, *S. oneidensis* puede vivir con y sin oxígeno, por lo que se le clasifica como facultativa. Lo sorprendente es que a partir de las CCM que han producido electricidad, estas bacterias se han aislado e identificado por medio de técnicas microbiológicas, y de biología molecular [4–6]. Por consiguiente, después de años de ardua investigación a este par de bacterias se les reconoce como las protagonistas del superpoder de producir electricidad [4,5].

### **La unión hace la fuerza**

Si sólo estuviera una bacteria exoelectrogénica adherida al electrodo, la cantidad de electrones que pudiera ceder sería muy poca y, por lo tanto, la electricidad que se generaría sería muy limitada; sin embargo, así como los humanos, las bacterias pueden formar comunidades que les ayudan a incrementar su

supervivencia. Además, dichas comunidades liberan sustancias pegajosas conocidas como sustancias poliméricas extracelulares. Estas sustancias están formadas por una mezcla de polisacáridos, fosfolípidos, material genético (ADN) y diversos biopolímeros que permiten que las bacterias se adhieran o se anclen sobre un soporte (por ejemplo, la superficie de un electrodo). Esta capacidad de permanecer unidas entre ellas les posibilita formar lo que se conoce como una biopelícula. En conclusión, las biopelículas conformadas por muchas bacterias exoelectrogénicas permiten que exista un mayor flujo de electrones hacia un electrodo y por lo tanto se puede producir una mayor cantidad de electricidad.

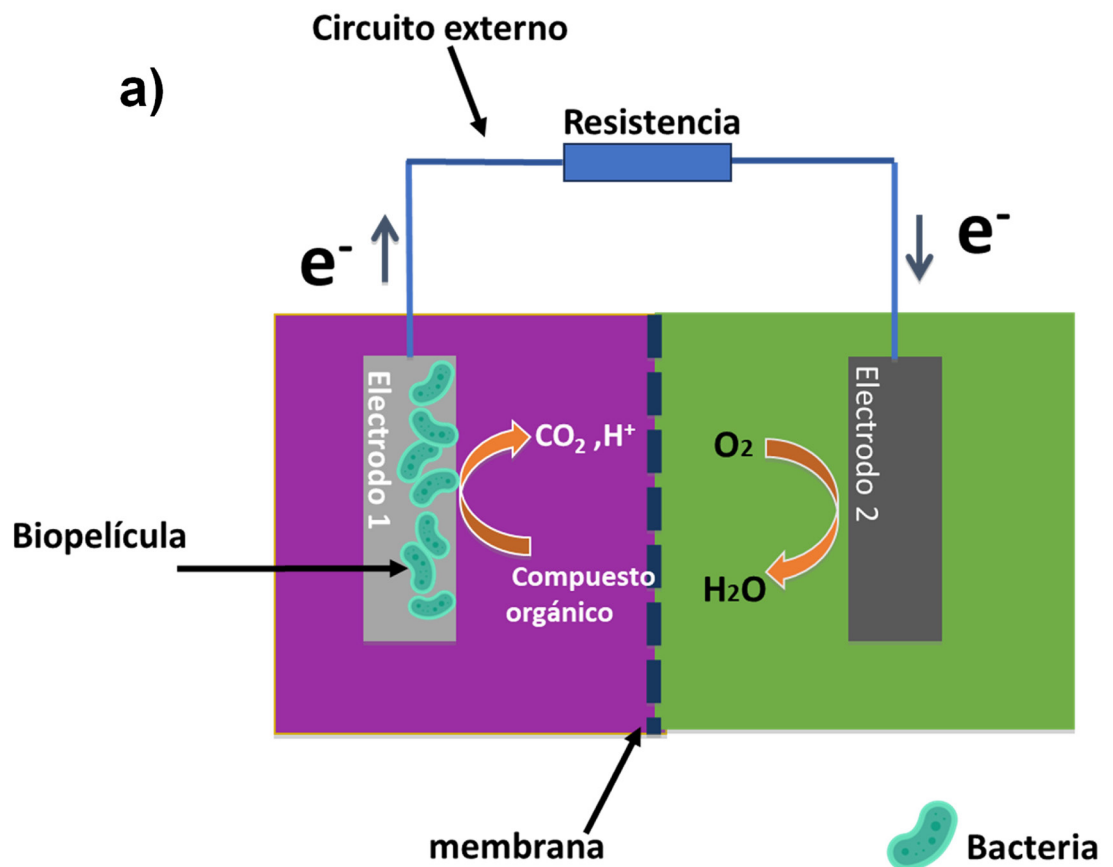
### **El poder es para servir**

Debido a la actual crisis energética y ambiental que vive la humanidad, los países miembros de las Naciones Unidas, entre ellos México; han adoptado un conjunto de objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta, asegurar la paz y prosperidad para todos. Estos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son un llamado para desarrollar tecnologías que mejoren el mundo. Entre estas tecnologías se encuentran las enfocadas a la producción de energías limpias. En este contexto, la CCM es un dispositivo enfocado a producir electricidad; la configuración que tiene la CCM permite la generación de un voltaje. Dentro de la CCM, las bacterias exoelectrogénicas se pegan a un electrodo, forman biopelículas y se alimentan de compuestos orgánicos añadidos (Figura 2). Al estar adheridas al electrodo, sucede el proceso de respiración y transfieren electrones al electrodo [3]. Aunque puede parecer complejo, la CCM ha tenido diversas aplicaciones, siendo su principal uso para remover contaminantes del agua (aguas residuales). En este caso, las bacterias exoelectrogénicas se añaden a la CCM con el agua residual y junto con otras bacterias consumen los contaminantes orgánicos presentes. Las bacterias exoelectrogénicas al estar adheridas al electrodo “respiran metales”, por lo tanto, se produce electricidad y el consumo del contaminante or-



gánico mejora la calidad del agua. Esto promueve dos acciones benéficas: 1) Producir electricidad a partir de un agua contaminada, 2) el agua contaminada a su vez se limpia debido a que las bacterias se alimentan del contaminante orgánico. Se han estudiado las CCM para la producción de electricidad con aguas de diferentes efluentes, como aguas residuales domésticas, entre ellas la orina humana denominada agua amarilla [7]. También se han empleado aguas residuales de procesos industriales: de papa, lácteos, arroz, cerveza, y de efluentes de rastros porcinos, entre otros [8]. Adicionalmente, la CCM ha tenido otras aplicaciones que involucran la recuperación de compuestos con alto valor añadido. Por ejemplo, el nitrógeno empleado para producir fertilizantes, el hidrógeno como combustible y diversos metales como: mercurio, plata, cromo, cobre, y cadmio [7,9]. Estas aplicaciones representan una gran ventaja en favor de la economía circular, la cual es un modelo en el que se pretende mantener el mayor tiempo posible de vida útil de un producto, promoviendo menores daños ambientales. También las CCM se han utilizado para el tratamiento de agua y suelos contaminados con hidrocarburos como son las gasolinas, el diésel y diversos compuestos alifáticos y aromáticos [10].

Por otro lado, la NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio, de Estados Unidos) tiene proyectos que involucran aplicaciones prometedoras con distintos objetivos; por ejemplo, convertir desechos en energía reutilizable en misiones espaciales, o como suministro energético para baterías implementadas en robots. Lo que representa una



b)

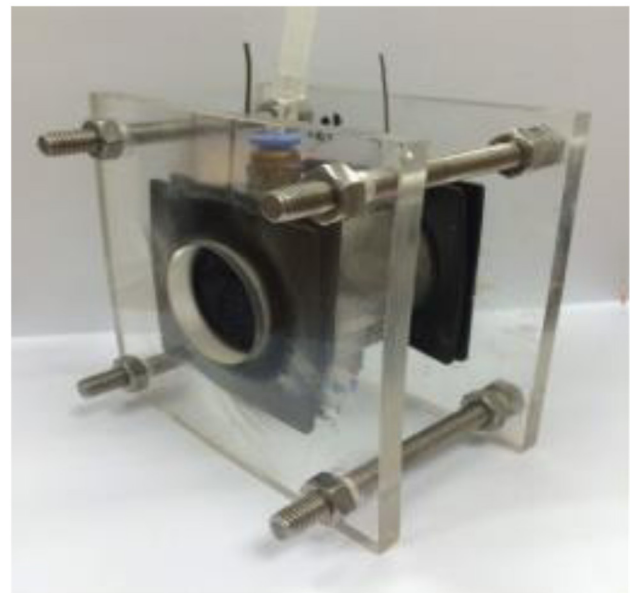


Figura 2. Celda de Combustible Microbiana (CCM). a) Representación de una CCM, b) CCM de una sola cámara, imagen obtenida de: Sawasdee, V., SiriornBoonyawanich y NiponPisutpaisal [13].

fuerza de energía alternativa con respecto a las energías obtenidas mediante la quema de combustibles fósiles, así como la solar y la nuclear [11,12].

### **Las electro-poderosas: Un nuevo universo**

Debido a que las bacterias exoelectro-génicas ó electro-poderosas pueden transferir electrones se encuentran en investigación, hay diferentes áreas que se centran en los mecanismos de transferencia de electrones, el diseño de la CCM, y en el estudio de las comunidades microbianas. Los avances por resaltar son que se han descubierto tres formas de transferir electrones al electrodo: por mediadores (compuestos químicos), citocromos (proteínas redox) y pilis (nanocables). Otro suceso relevante fue el aislamiento de los nanocables de *Geobacter sulfurreducens* para producir electricidad [14]. Este hallazgo podría permitir la conexión de varias CCM para generar corriente y alimentar dispositivos electrónicos (smartphones, tablets, entre otros). Además, se debe de considerar el papel que juega la formación, desarrollo y evolución de las biopelículas. Por lo que las investigaciones seguirán evolucionando y en el futuro tal vez puedas cargar tu dispositivo favorito con la energía producida por las bacterias electro-poderosas.

Si quieres aprender más y cómo construir una CCM visita la página: <https://www.ncbe.reading.ac.uk/microbial-fuel-cell/>

### **Agradecimientos**

Agradecimientos: Ma. Concepción Romero-Serrano agradece al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca de estancia Posdoctoral.

### **Referencias**

[1] He, Z., & Angenent, L. T. (2006). Application of Bacterial Biocathodes in Microbial Fuel Cells. *Electroanalysis*, 18(19-20), 2009-2015. <https://doi.org/10.1002/elan.200603628>  
[2] University of Reading. National Centre for Biotechno-

logy Education. (s. f.). <https://www.ncbe.reading.ac.uk/microbial-fuel-cell/>  
[3] 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. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.05.004>  
[4] Ikeda, S., Takamatsu, Y., Tsuchiya, M., Suga, K., Tanaka, Y., Kouzuma, A., & Watanabe, K. (2021). *Shewanella oneidensis* MR-1 as a bacterial platform for electro-biotechnology. *Essays in Biochemistry*, 65(2), 355-364. <https://doi.org/10.1042/EBC20200178>  
[5] Howley, E., Ki, D., Krajmalnik-Brown, R., & Torres, C. I. (2022). *Geobacter sulfurreducens*' Unique Metabolism Results in Cells with a High Iron and Lipid Content. *Microbiology Spectrum*, 10(6), e02593-22. <https://doi.org/10.1128/spectrum.02593-22>  
[6] Logan, B. E. (2007). *Microbial Fuel Cells* (1.a ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470258590>  
[7] Patel, A., Mungray, A. A., & Mungray, A. K. (2020). Technologies for the recovery of nutrients, water and energy from human urine: A review. *Chemosphere*, 259, 127372. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127372>  
[8] Pant, D., Singh, A., Van Bogaert, G., Irving Olsen, S., Singh Nigam, P., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2012). Bioelectrochemical systems (BES) for sustainable energy production and product recovery from organic wastes and industrial wastewaters. *RSC Adv.*, 2(4), 1248-1263. <https://doi.org/10.1039/C1RA00839K>  
[9] Nancharaiyah, Y. V., Venkata Mohan, S., & Lens, P. N. L. (2015). Metals removal and recovery in bioelectrochemical systems: A review. *Bioresource Technology*, 195, 102-114. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.058>  
[10] Li, T., Li, R., & Zhou, Q. (2021). The application and progress of bioelectrochemical systems (BESs) in soil remediation: A review. *Green Energy & Environment*, 6(1), 50-65. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2020.06.026>  
[11] *Synthetic Biology and Microbial Fuel Cells: Towards Self-Sustaining Life Support Systems*. (s. f.). <https://www.nasa.gov/centers/ames/cct/office/cif/2011/microbial-fuel-cells.html>  
[12] *Electrified Bacteria Clean Wastewater, Generate Power*. (s. f.). [https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2019/ee\\_1.html](https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2019/ee_1.html)  
[13] Sawasdee, V., SiriornBoonyawanich y NiponPisutpaisal. (2015). Simultaneous Treatment of Nitrogen-Rich Wastewater and Electricity Generation using Single-Chamber Microbial Fuel Cells. *Energy Procedia*, 79, 624-628. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.543>  
[14] Liu, X., Gao, H., Ward, J. E., Liu, X., Yin, B., Fu, T., Chen, J., Lovley, D. R., & Yao, J. (2020). Power generation from ambient humidity using protein nanowires. *Nature*, 578(7796), 550-554. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2010-9>