

Construcción y caracterización de una celda de combustible microbiana con *Solanum lycopersicum* y cátodo reciclado de Zn/Cu/grafito

Lizeth Paris Adelfa Hernández Villanueva

Universidad Politécnica de Altamira

 0009-0008-2778-4083

Jorge Antonio Molina Torres

Universidad Politécnica de Altamira

 0009-0004-7820-8546

José Benjamín Cruz Ramos

Universidad Politécnica de Altamira

 0009-0004-8962-9901

Juan Jesús Reyes Valdez*

EPM del SECIHTI-Instituto Politécnico Nacional,

CICATA, Unidad Altamira

 0000-0002-0208-6667

Sandra Edith Benito Santiago*

Universidad Politécnica de Altamira

 0000-0002-5326-0397

*Autores para correspondencia:

juan_jesus_reyes@hotmail.com y

edith.santiago@upalt.edu.mx

Recibido: 14 de marzo de 2026 | Aceptado: 30 de marzo de 2026 | Publicado en línea: 1° de abril de 2026 |

Resumen: Se presenta el diseño, construcción y evaluación de una celda de combustible microbiana (CCM) de una sola cámara (cátodo de aire) para la generación de bioelectricidad a partir de residuos de *Solanum lycopersicum*. El sistema emplea un recipiente de barro como membrana cerámica natural, aprovechando su porosidad para facilitar el intercambio iónico entre ánodo y cátodo. El ánodo fue constituido por una malla de acero inoxidable con recubrimiento de cobre, mientras que el cátodo de aire se fabricó mediante la reutilización de materiales provenientes de baterías desechadas (Zn/Cu/grafito), promoviendo un enfoque de bajo costo y economía circular. El sustrato consistió en pulpa de tomate triturada, la cual actuó

simultáneamente como fuente de compuestos orgánicos fermentables y de microorganismos electrogénicos nativos, eliminando la necesidad de inoculación externa. Durante la operación, se registraron mediciones periódicas de voltaje y pH, evidenciando la actividad metabólica microbiana y la generación continua de electricidad. Las variaciones observadas en estos parámetros reflejan procesos dinámicos de degradación de materia orgánica y transferencia de electrones hacia el ánodo. Los resultados demuestran un desempeño bioelectroquímico estable, validando la viabilidad del uso de residuos agrícolas y electrónicos en sistemas de generación energética sostenible. Este estudio destaca el potencial de las CCM como una alternativa accesible para la producción descentralizada de electricidad, especialmente en contextos con recursos limitados, contribuyendo al desarrollo de tecnologías limpias basadas en la valorización de residuos.

Palabras clave: celda de combustible microbiana; *Solanum lycopersicum*; electrodo reciclado; cátodo de aire; energía sostenible

Title: Construction and characterization of a microbial fuel cell with *Solanum lycopersicum* and recycled Zn/Cu/graphite cathode.

Abstract: The design, construction and evaluation of a single-chamber microbial fuel cell (air cathode) for the

Cómo citar:

Hernández Villanueva, L. P. A., Molina Torres, J. A., Cruz Ramos, J. B., Reyes Valdez, J. J., & Benito Santiago, S. E. (2026). Construcción y caracterización de una celda de combustible microbiana con *Solanum lycopersicum* y cátodo reciclado de Zn/Cu/grafito. *Revista Multidisciplinaria de Ciencia Básica, Humanidades, Arte y Educación*, 4(17), 85-90. DOI 10.5281/zenodo.19373056 [[RIS](#)]

© Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional.

generation of bioelectricity from *Solanum lycopersicum* waste is presented. The system employs a clay vessel as a natural ceramic membrane, leveraging its porosity to facilitate ion exchange between the anode and cathode. The anode was constructed from a copper-coated stainless-steel mesh, while the air cathode was fabricated using recycled materials from discarded batteries (Zn/Cu/graphite), promoting a low-cost, circular economy approach. The substrate consisted of crushed tomato pulp, which simultaneously served as a source of fermentable organic compounds and native electrogenic microorganisms, eliminating the need for external inoculation. During operation, periodic voltage and pH measurements were recorded, demonstrating microbial metabolic activity and continuous electricity generation. The observed variations in these parameters reflect dynamic processes of organic matter degradation and electron transfer to the anode. The results demonstrate stable bioelectrochemical performance, validating the viability of using agricultural and electronic waste in sustainable energy generation systems. This study highlights the potential of CCMs as an accessible alternative for decentralized electricity production, especially in resource-constrained contexts, contributing to the development of clean technologies based on waste valorization.

Keywords: Microbial fuel cell; *Solanum lycopersicum*; recycled electrode; air cathode; sustainable energy.

Introducción

La creciente demanda energética global y la necesidad de mitigar los impactos ambientales derivados del uso de combustibles fósiles han impulsado el desarrollo de tecnologías alternativas basadas en fuentes renovables. En este contexto, las CCM han surgido como sistemas bioelectroquímicos innovadores capaces de transformar la energía química contenida en materia orgánica en electricidad mediante la actividad metabólica de microorganismos electrogénicos (Apollon, 2023; Jalili et al., 2024). Estas tecnologías destacan por su capacidad de generar energía de forma simultánea al tratamiento de residuos, lo que las posiciona como una herramienta clave dentro del paradigma de economía circular y sostenibilidad ambiental (Li, 2024). El funcionamiento de las CCM se basa en la oxidación de compuestos orgánicos en el ánodo, proceso mediante el cual los microorganismos liberan electrones que son transferidos hacia el cátodo a través de un circuito externo, generando corriente eléctrica. Este mecanismo permite el aprovechamiento de una amplia variedad de sustratos,

incluyendo residuos agrícolas, aguas residuales y biomasa vegetal (Golzarian et al., 2024; Yalcinkaya et al., 2024). Además, presentan ventajas operativas significativas, como su funcionamiento a temperatura ambiente, bajo consumo energético y menor producción de subproductos contaminantes (Apollon, 2023). En los últimos años, la investigación en CCM se ha enfocado en mejorar su eficiencia y viabilidad económica mediante la optimización de materiales y configuraciones. Particularmente, el desarrollo de electrodos avanzados y catalizadores eficientes ha demostrado ser fundamental para incrementar la transferencia de electrones y la densidad de potencia (Rehman et al., 2025). Asimismo, el uso de membranas de bajo costo, como materiales cerámicos o biopolímeros, ha cobrado relevancia al permitir la reducción de costos sin comprometer el desempeño del sistema (Rojas-Flores et al., 2025; Tiwari et al., 2024). A pesar de estos avances, persisten desafíos importantes relacionados con la escalabilidad, la estabilidad a largo plazo y la baja densidad de potencia generada en comparación con tecnologías convencionales (Sonawane et al., 2024). Por ello, el uso de residuos orgánicos como sustratos y la reutilización de materiales reciclados en la construcción de componentes electroquímicos representan estrategias prometedoras para mejorar la sostenibilidad y accesibilidad de estas tecnologías. En este contexto, el presente estudio propone el uso de *Solanum lycopersicum* como fuente de biomasa y microorganismos electrogénicos, junto con la reutilización de materiales provenientes de baterías desechadas, con el objetivo de desarrollar una CCM de bajo costo y evaluar su desempeño bioelectroquímico.

Metodología

Diseño experimental de la celda de combustible microbiana

Se diseñó y construyó una CCM de una sola cámara con cátodo de aire, empleando materiales de bajo costo y fácil acceso. Como estructura principal se utilizó un recipiente de barro con capacidad aproximada de 1 L como se muestra en la Fig. 1, seleccionado por su porosidad natural, la cual permite el intercambio iónico entre el ánodo y el cátodo, funcionando como una membrana cerámica. Previo a su uso, el recipiente fue sometido a limpieza mecánica y lijado superficial para eliminar impurezas y mejorar la uniformidad interna.

Fig. 1. Recipiente de arcilla (jarra de barro) con capacidad de 1 Litro.



Construcción del ánodo

El ánodo se instaló en el interior del recipiente utilizando una malla de acero inoxidable como soporte estructural, recubierta parcialmente con tejido de cobre para mejorar la conductividad eléctrica, como se muestra en la Fig 2. Este conjunto se conectó mediante un conductor externo que permitió la transferencia de electrones hacia el circuito de medición.

Fig. 2. Instalación de malla de acero inoxidable en la superficie interior del recipiente de arcilla.



Fabricación del cátodo de aire

El cátodo se construyó en la superficie externa del recipiente mediante la aplicación de capas sucesivas de materiales reciclados provenientes de baterías desechadas. Inicialmente, se aplicó una solución de sulfato cúprico (CuSO_4) y zinc metálico (Zn) y después se dejó secar. Posteriormente, se preparó una pasta compuesta por CuSO_4 , Zn y grafito pulverizado, la cual se aplicó en múltiples capas para mejorar la conductividad eléctrica y favorecer la reacción de reducción de oxígeno, como se muestra en la Fig 3. Finalmente, se colocó un alambre de cobre alrededor del recipiente para asegurar la continuidad eléctrica del sistema.

Fig. 3. Fijación de pasta Zn/Cu/grafito en superficie exterior del recipiente de barro como cátodo de aire.



Preparación del sustrato

El sustrato orgánico se preparó a partir de pulpa de tomate (*Solanum lycopersicum*), previamente triturada y homogeneizada como se muestra en la Fig. 4. Este material fue utilizado sin inoculación externa, aprovechando la presencia natural de microorganismos

electrogénicos y su contenido de compuestos orgánicos fermentables.

Fig. 4. Preparación de sustrato orgánico utilizando residuos de tomate: a) corte y molienda, y b) llenado del recipiente con la pulpa.



Ensamblaje y operación

Una vez integrados los componentes, la celda se llenó con el sustrato hasta cubrir completamente el ánodo. El sistema fue conectado a un circuito externo con un multímetro digital modelo MUL-281 de la marca Steren para el monitoreo del voltaje generado, como se muestra en la Fig. 5. La CCM operó en condiciones ambientales (temperatura ambiente y presión atmosférica) sin control externo de aireación en el cátodo.

Fig. 5. Registro de voltaje a circuito abierto en CCM con cátodo de aire.



Monitoreo y análisis de datos

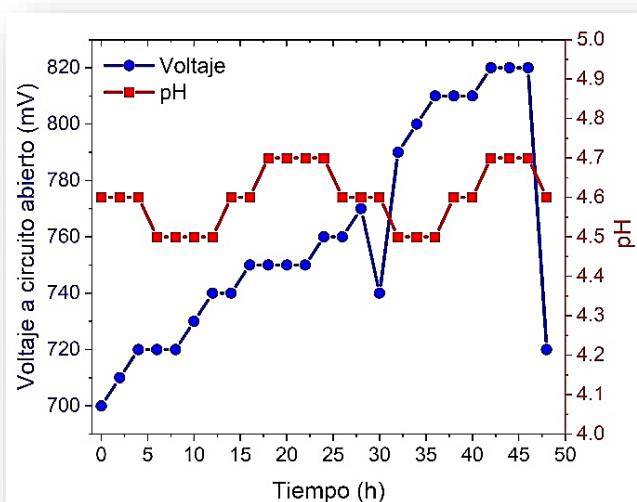
Se realizaron mediciones de voltaje cada dos horas durante el periodo de operación. Adicionalmente, se registraron valores de pH del sustrato para evaluar la

evolución de la actividad microbiana y los procesos de degradación orgánica con un medidor de pH modelo MA-167 de la marca Marzseflo. Los datos obtenidos fueron analizados de manera descriptiva para identificar tendencias en la generación de electricidad y estabilidad del sistema.

Resultados y Discusión

El comportamiento electroquímico de la CCM evidenció una generación sostenida de voltaje a lo largo de 48 horas de operación. Como se muestra en la Fig. 6, el sistema presentó un voltaje inicial de 700 mV, seguido de un incremento gradual hasta alcanzar un valor máximo de 820 mV entre las 42 y 46 horas. Posteriormente, se observó una disminución abrupta hasta 720 mV al final del periodo evaluado (48 h).

Fig. 6. Variación del voltaje y pH en función del tiempo.



El incremento progresivo del voltaje sugiere el establecimiento y maduración de comunidades microbianas electrogénicas sobre el ánodo, facilitando la transferencia de electrones desde la oxidación de la materia orgánica hacia el circuito externo (Apollon, 2023; Roy et al., 2023). A diferencia de sistemas con fases marcadas de crecimiento y declive, el comportamiento observado muestra una tendencia más estable, lo que indica una actividad metabólica sostenida y una adecuada disponibilidad de sustrato durante gran parte del experimento.

El uso de *Solanum lycopersicum* como sustrato resultó altamente eficiente, ya que permitió alcanzar valores de voltaje superiores a los comúnmente reportados en CCM de bajo costo. Este desempeño puede atribuirse a la presencia de azúcares simples y compuestos orgánicos

fácilmente biodegradables que favorecen el metabolismo fermentativo y la producción de electrones (Kunwar et al., 2023). Además, la presencia de microorganismos nativos en el sustrato permitió el desarrollo de un consorcio microbiano funcional sin necesidad de inoculación externa, lo cual simplifica el diseño del sistema, aunque podría limitar la especialización electrogénica (Jalili et al., 2024).

En cuanto al pH, los valores se mantuvieron en un rango ácido relativamente estable (4.5–4.7) durante todo el experimento como se muestra en la Figura 1. Este comportamiento indica la producción continua de ácidos orgánicos derivados del metabolismo microbiano, lo cual es consistente con procesos fermentativos (Kunwar et al., 2023). Sin embargo, a diferencia de otros sistemas donde la acidificación limita el desempeño, en este caso no se observó una correlación directa entre la disminución del pH y la caída del voltaje, lo que sugiere que las comunidades microbianas presentes muestran cierta tolerancia a condiciones ácidas. No obstante, el descenso del voltaje al final del experimento podría estar asociado a la acumulación de metabolitos inhibidores o al agotamiento parcial del sustrato (Golzarian et al., 2024; Tiwari et al., 2024).

El desempeño del cátodo de aire elaborado con materiales reciclados (Zn/Cu/grafito) fue adecuado, permitiendo mantener una producción estable de voltaje durante la mayor parte del experimento. Esto respalda la viabilidad del uso de materiales alternativos en CCM, en concordancia con estudios recientes que destacan su potencial para reducir costos sin comprometer significativamente el rendimiento (Rehman et al., 2025). Sin embargo, la caída final del voltaje también podría estar relacionada con limitaciones en la cinética de reducción de oxígeno, la cual es reconocida como uno de los principales factores limitantes en estos sistemas (Rehman et al., 2025; Sonawane et al., 2024).

En comparación con la literatura reciente, los valores obtenidos en este estudio (hasta 820 mV) son notablemente superiores a los reportados en muchos sistemas de bajo costo, donde los valores típicos oscilan entre 200 y 600 mV (Apollon, 2023; Sonawane et al., 2024). Esto sugiere que la combinación de sustrato, diseño y materiales empleados en este trabajo favorece una mayor eficiencia en la generación de bioelectricidad.

En conjunto, los resultados demuestran que el sistema desarrollado presenta un desempeño competitivo y estable, destacando el potencial del uso de residuos agrícolas y electrónicos en la generación de energía sostenible. No obstante, futuras investigaciones deberían enfocarse en optimizar la estabilidad a largo plazo, mejorar la cinética del cátodo y evaluar la densidad de

potencia para aplicaciones prácticas (Golzarian et al., 2024; Sonawane et al., 2024).

Conclusiones

La CCM desarrollada demostró una capacidad sostenida para la generación de bioelectricidad a partir de residuos de *Solanum lycopersicum*, alcanzando valores de voltaje de hasta 820 mV. Este desempeño supera el rango típico reportado para sistemas de bajo costo, lo que evidencia la efectividad del diseño experimental y la adecuada interacción entre el sustrato, los microorganismos electrogénicos y los materiales empleados.

El comportamiento del voltaje mostró una tendencia creciente a lo largo del tiempo de operación, indicando la formación progresiva y estabilización de biopelículas microbianas en el ánodo, lo cual favorece la transferencia de electrones. La caída observada al final del experimento sugiere posibles limitaciones asociadas al agotamiento parcial del sustrato o a la acumulación de metabolitos inhibidores, lo que resalta la importancia de optimizar las condiciones operativas para mantener la estabilidad del sistema a largo plazo.

En cuanto al pH, los valores se mantuvieron en un rango ácido relativamente estable (4.5–4.7), lo que indica una actividad fermentativa constante. A pesar de estar fuera del rango óptimo reportado para muchas CCM, el sistema mostró tolerancia a estas condiciones, manteniendo una producción eficiente de voltaje. Esto sugiere la presencia de comunidades microbianas adaptadas a medios ácidos, lo cual representa una ventaja para el uso de sustratos orgánicos similares.

El uso de un cátodo de aire elaborado con materiales reciclados (Zn/Cu/grafito) resultó funcional, contribuyendo a la estabilidad del sistema y validando la reutilización de residuos electrónicos como alternativa viable en el diseño de dispositivos bioelectroquímicos. Este enfoque refuerza la aplicabilidad de la CCM dentro de un marco de economía circular y sostenibilidad.

En conjunto, los resultados confirman que la integración de residuos agrícolas y electrónicos permite el desarrollo de sistemas eficientes, accesibles y ambientalmente amigables para la generación de energía. No obstante, futuras investigaciones deberán centrarse en la optimización del control de pH, la mejora de los materiales de electrodo y la evaluación de parámetros como la densidad de potencia y la escalabilidad, con el fin de avanzar hacia aplicaciones prácticas de esta tecnología.

Referencias

- Apollon, W. (2023). An Overview of Microbial Fuel Cell Technology for Sustainable Electricity Production. *Membranes*, 13(11), 884. <https://doi.org/10.3390/membranes13110884>
- Golzarian, M., Ghiasvand, M., Shokri, S., Bahreini, M., & Kazemi, F. (2024). Performance evaluation of a dual-chamber plant microbial fuel cell developed for electricity generation and wastewater treatment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(7), 5947–5954. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05415-5>
- Jalili, P., Ala, A., Nazari, P., Jalili, B., & Ganji, D. D. (2024). A comprehensive review of microbial fuel cells considering materials, methods, structures, and microorganisms. *Heliyon*, 10(3), e25439. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25439>
- Kunwar, S., Pandey, N., Bhatnagar, P., Chadha, G., Rawat, N., Joshi, N. C., Tomar, M. S., Eyvaz, M., & Gururani, P. (2023). A concise review on wastewater treatment through microbial fuel cell: sustainable and holistic approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(5), 6723–6737. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31696-x>
- Li, M. (2024). Energy Recovery Applications of Microbial Fuel Cells in Wastewater Treatment. *Journal of Energy Bioscience*, 15(3), 186–195. <https://doi.org/10.5376/jeb.2024.15.0018>
- Rehman, F. U., Amjad, F., Lee, W., & Chang, M. (2025). Recent advances in functional energy materials for microbial fuel cells: progress, challenges, and future perspectives. *Journal of Materials Chemistry A*, 13(38), 32056–32103. <https://doi.org/10.1039/D5TA04072H>
- Rojas-Flores, S. J., La Cruz-Noriega, M. De, Nazario-Naveda, R., Benites, S. M., & Delfin-Narciso, D. (2025). Biopolymers as Sustainable Materials for Membranes in Microbial Fuel Cells: A Bibliometric Analysis. *ISAMR 2025*, 3. <https://doi.org/10.3390/materproc2025027003>
- Roy, H., Rahman, T. U., Tasnim, N., Arju, J., Rafid, Md. M., Islam, Md. R., Pervez, Md. N., Cai, Y., Naddeo, V., & Islam, Md. S. (2023). Microbial Fuel Cell Construction Features and Application for Sustainable Wastewater Treatment. *Membranes*, 13(5), 490. <https://doi.org/10.3390/membranes13050490>
- Sonawane, A. V., Rikame, S., Sonawane, S. H., Gaikwad, M., Bhanvase, B., Sonawane, S. S., Mungray, A. K., & Gaikwad, R. (2024). A review of microbial fuel cell and its diversification in the development of green energy technology. *Chemosphere*, 350, 141127. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141127>
- Tiwari, A., Yadav, N., Jadhav, D. A., Saxena, D., Anghan, K., Sandhwar, V. K., & Saxena, S. (2024). A Critical Review on the Advancement of the Development of Low-Cost Membranes to Be Utilized in Microbial Fuel Cells. *Water*, 16(11), 1597. <https://doi.org/10.3390/w16111597>
- Yalcinkaya, F., Torres-Mendieta, R., Hruza, J., Vávrová, A., Svobodová, L., Pietrelli, A., & Ieropoulos, I. (2024). Nanofiber applications in microbial fuel cells for enhanced energy generation: a mini review. *RSC Advances*, 14(13), 9122–9136. <https://doi.org/10.1039/D4RA00674G>