

Caracterización de una celda de combustible microbiana basada en la planta vicaria (*Catharanthus*)

Characterization of a microbial fuel cell based on the vicaria plant (*Catharanthus*)

Jorge Benjamín Magaña-Zaldívar^{1*}, Julio Cesar Molina-Céspedes¹,
Ramón Ariel Vela-Xool¹

¹*Tecnológico Nacional de México campus Motul, Carretera Mérida- Motul, Tablaje Catastral 383, CP 97430, Motul, Yucatán, México.*

*Corresponding author:
jorge.magana@itsmotul.edu.mx

Resumen. El presente trabajo caracteriza una Celda de Combustible Microbiana Basada en Plantas (PMFC) utilizando *Catharanthus* como fuente de bioelectricidad. Estas celdas aprovechan la fotosíntesis y la rizodeposición para generar energía. El objetivo fue evaluar la producción bioenergética de una PMFC con *Catharanthus* para su posible uso en el monitoreo de colmenas, considerando su atractivo para polinizadores. El sistema experimental se construyó en un contenedor de 22 × 15 cm, con electrodos de cobre y aluminio (25 cm²), separados 10 cm y conectados a una resistencia de 10 kΩ. Durante tres días se registró el voltaje cada minuto con humedad del 100%. Se obtuvo un promedio de 412 mV, un pico de 469.21 mV y una potencia media de 19.33 μW. Los resultados evidencian el potencial de integrar PMFCs en sistemas de monitoreo ambiental autónomos, aunque es necesario optimizar el diseño, los electrodos y el control hídrico para mejorar su estabilidad.

Palabras Clave: *Catharanthus*, Fotosíntesis, Sensores, Voltaje, Densidad de potencia.

Abstract. This study characterizes a Plant Microbial Fuel Cell (PMFC) using *Catharanthus* as a source of bioelectricity. These systems harness photosynthesis and rhizodeposition to generate energy. The objective was to evaluate the bioenergy production of a *Catharanthus*-based PMFC for potential use in hive monitoring, given the plant's attractiveness to pollinators. The experimental setup consisted of a 22 ×

15 cm container with copper and aluminum electrodes (25 cm²), spaced 10 cm apart and connected to a 10 kΩ resistor. Voltage was recorded every minute for three days under 100% humidity. The system produced an average voltage of 412 mV, a peak of 469.21 mV, and an average power output of 19.33 μW. The results indicate the potential of integrating PMFCs into autonomous environmental monitoring systems, although optimization of design, electrodes, and water control is needed to improve stability.

Keywords: *Catharanthus*, Photosynthesis, Sensors, Voltage, Power density.

I. INTRODUCCIÓN

Una de las áreas emergentes en la electrónica es el desarrollo de dispositivos de ultra bajo consumo, diseñados para aplicaciones como el monitoreo de condiciones ambientales en ciudades inteligentes. Paralelamente, se han creado recolectores de energía capaces de aprovechar pequeñas fuentes de generación, como la energía producida por las plantas (Ayala et al., 2019). La energía recolectada de las plantas representa una alternativa sostenible para la generación de electricidad de manera limpia y adaptable, adecuada para múltiples aplicaciones en la industria y la vida cotidiana, contribuyendo a satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica.

Las fuentes de generación de energía eléctrica basadas en plantas se les conoce como Celdas Microbianas Basadas en Plantas (PMFC, por sus siglas en inglés, "Plant Microbial Fuel Cells").

Las PMFC constituyen una tecnología innovadora que permite la generación de electricidad aprovechando la interacción simbiótica entre las raíces vegetales, los microorganismos del sustrato y electrodos instalados en el medio (Molina et al., 2017). Este sistema utiliza la rizodeposición y la fotosíntesis como fuentes de compuestos orgánicos, los cuales son degradados por bacterias electrogénicas, liberando electrones que son transferidos hacia el ánodo y posteriormente capturados para producir corriente eléctrica (Strik et al., 2008) (Regmi et al., 2018) (Lara et al., 2023).

Las PMFC se pueden clasificar según la geometría, tamaño, material de los electrodos, posición, tipo de sedimento y bacterias presentes (Rodríguez, 2024) (Sophia y Sreeja, 2017).

La arquitectura (horizontal vs. vertical) y el número de electrodos condicionan la resistencia interna, la difusión de sustratos y la interacción raíz-ánodo. Diseños horizontales han mostrado mayor desempeño que configuraciones verticales en varios montajes de PMFC, y aumentar el número de ánodos en disposición horizontal reduce la resistencia de electrodo y eleva la potencia. Además, se reportan formatos compactos y módulos apilables que mantienen desempeño con menor huella. (Nam et al., 2020) (Moqsud y Okamoto, 2023).

La separación ánodo-cátodo y, especialmente, la proximidad del ánodo a la rizosfera activa, son críticas: distancias menores disminuyen la resistencia óhmica y favorecen la transferencia electrónica desde bacterias electrogénicas asociadas a las raíces. Estudios recientes subrayan que optimizar esta distancia es uno de los factores más influyentes en la densidad de potencia de PMFC. (Chong et al., 2025) (Pamintuan et al., 2020).

El rendimiento depende del sedimento/sustrato: matrices con adecuada porosidad, conductividad y contenido de materia orgánica (p. ej., suelos limosos/arenosos enriquecidos) promueven comunidades electroactivas y facilitan el transporte de protones. En aplicaciones de campo (arrozales, humedales construidos), soportes cerámicos y suelos naturales han sido efectivos cuando se

ajustan la humedad y la aireación (Kumar y Manangath, 2020) (Toczyłowska-Mamińska et al., 2025).

Las comunidades dominantes en la rizósfera de PMFC suelen incluir *Geobacter* y *Shewanella*, reconocidas por su transferencia extracelular de electrones; también se reportan "cable bacteria" y ciertos *Clostridia* en ambientes naturales. Seleccionar condiciones que favorezcan estas EAB (electroactive bacteria) mejora la oxidación de exudados radiculares y el flujo electrónico hacia el ánodo. (Ancona et al., 2024) (Garbini et al., 2023).

Los principales electrodos utilizados para el Ánodo, es Carbono y derivados, Grafeno y nanotubos de carbono (CNTs), Materiales naturales derivados de residuos, Metales y óxido metálicos y polímeros conductores y nanocomposites, para los cátodos los materiales más frecuentes son carbón activado y telas de carbono, así como los catalizadores metálicos. (Chicas et al., 2018).

Entre sus ventajas se encuentra la producción de energía renovable y limpia, así como su aplicabilidad en contextos de monitoreo ambiental y agrícola en zonas remotas, donde las soluciones energéticas convencionales resultan inviables (Timmers et al., 2013) (Kaku et al., 2008). Pueden servir para alimentar dispositivos inalámbricos en áreas remotas utilizando plantas como el Aloe Vera (Chong et al., 2019), redes de sensores para monitoreo del suelo y agricultura de precisión (Pietrelli et al., 2014) (Ayala et al., 2019). De igual forma pueden permitir operar redes de sensores en ciudades inteligentes sin baterías, garantizando un suministro continuo para microcontroladores y sensores (Osorio de la Rosa et al., 2019).

Aunque su rendimiento es bajo, la integración de circuitos de gestión energética permite su uso en sistemas de ultra bajo consumo, generando suficiente energía para operaciones diarias como lo demuestra el trabajo desarrollado por (Osorio de la Rosa et al., 2021).

No obstante, existen limitaciones relevantes: la densidad de potencia reportada en la literatura sigue siendo baja (del orden de $\mu\text{W}/\text{cm}^2$), la dependencia de factores ambientales como la humedad y la radiación solar afecta la estabilidad, y el uso de electrodos metálicos puede comprometer la durabilidad por corrosión. Estas brechas justifican la búsqueda de nuevos diseños y plantas hospedantes que amplíen la aplicabilidad de la tecnología.

En este contexto, el uso de *Catharanthus roseus* como planta hospedera en una PMFC presenta beneficios particulares, debido a su atractivo para polinizadores y su adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales, lo que facilita su implementación en apiarios para el suministro energético de sensores de ultra bajo consumo destinados al monitoreo de variables físicas en colmenas. Este enfoque no solo contribuye al seguimiento de la salud de las abejas, sino que también permite registrar parámetros ambientales relevantes para la gestión apícola sostenible (Wetser et al., 2015). Adicionalmente, el bajo mantenimiento requerido por *Catharanthus* favorece la sostenibilidad, escalabilidad y replicabilidad del sistema en entornos rurales o de difícil acceso.

Con base en lo anterior, este trabajo plantea que una PMFC con *Catharanthus* puede generar un nivel de potencia suficiente (del orden de decenas de μW) para alimentar sensores de ultra bajo consumo en colmenas, siempre que se gestionen adecuadamente las condiciones de humedad y se optimice el diseño de los electrodos.

El presente proyecto tuvo como objetivo caracterizar la producción de bioenergía en una PMFC basada en la planta vicaria (*Catharanthus*) para evaluar su posible uso en el monitoreo de variables físicas en colmenas de abejas. Para la adquisición de datos se diseñó un adquisidor de datos utilizando un sistema embebido basado en un microcontrolador ATmega328 y una shield DAQ.

La planta utilizada para el desarrollo de la PMFC es adecuada para los apiarios por su capacidad para atraer a las abejas y otros polinizadores gracias a sus pequeñas y numerosas flores.

II. METODOLOGÍA

Para la construcción de la celda de combustible microbiana de planta (PMFC), se utilizó un contenedor cilíndrico de 22cm de diámetro y 15cm de altura, diseñado para proporcionar un entorno estable que favorezca el desarrollo del sustrato y la actividad microbiana (Figura 1). Las pruebas se realizan a cabo en condiciones controladas de laboratorio, ubicando el sistema en un área sombreada para minimizar la incidencia de luz directa y las fluctuaciones térmicas, factores que podrían interferir con la generación y medición de la señal eléctrica.

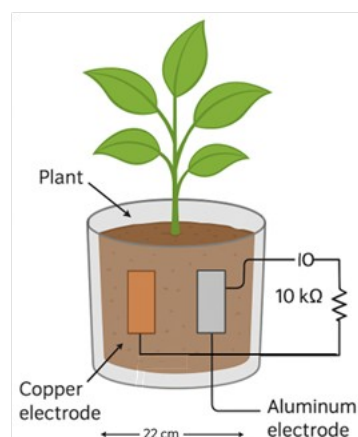


Figura 1. Esquema del PMFC. Fuente: Elaboración propia.

El sistema incorpora dos electrodos cuadrados de $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ y 3mm de espesor, fabricados en cobre y aluminio, respectivamente. Estos fueron insertados verticalmente en el sustrato, separados entre sí por una distancia aproximada de 10 cm, con el fin de optimizar la transferencia de electrones desde los microorganismos del suelo hacia los electrodos, sin comprometer la integridad estructural del sistema.

El sustrato empleado fue un suelo franco-arenoso de procedencia local, adecuado para el desarrollo de la comunidad microbiana y del sistema radicular. El pH del sustrato, determinado mediante una relación 1:2.5 (suelo:agua), fue de 6.7 ± 0.1 , mientras que la conductividad eléctrica, medida en extracto 1:5, fue de 0.42 ± 0.03 mS/cm. La humedad inicial se ajustó al 100% de la capacidad de campo, correspondiente a $34.5 \pm 1.2\%$ en peso, medida por gravimetría. Estos parámetros proporcionan un sustrato estable y representativo para el funcionamiento de la PMFC, y permiten la adecuada reproducibilidad del sistema experimental.

Para el registro continuo de la señal eléctrica generada por la PMFC se empleó un sistema de adquisición basado en un microcontrolador Arduino Uno (ATmega328P), acoplado a una shield DAQ diseñada para la medición de voltajes de baja magnitud. El voltaje entre los electrodos se midió mediante el convertidor analógico-digital (ADC) de 10 bits del Arduino, con un rango de entrada configurado a 0–5 V y resolución de 4.88 mV/bit, empleando un divisor resistivo calibrado para garantizar la exactitud de las lecturas. Los datos fueron muestreados a intervalos de un minuto y almacenados en una tarjeta microSD integrada en la shield DAQ, en formato CSV.

Para el análisis posterior, los datos fueron procesados en Microsoft Excel 2021 para el cálculo de estadísticos (promedio, máximos, densidad de corriente y potencia) y generación de gráficas. Este flujo de trabajo permitió una evaluación detallada del comportamiento temporal de la PMFC y la obtención de los parámetros eléctricos reportados en este estudio.

La elección de cobre (como cátodo) y aluminio (como ánodo) se basó en su bajo costo y disponibilidad local; sin embargo, se reconoce que estos materiales presentan limitaciones, como la corrosión y la liberación de iones metálicos al medio, lo que puede afectar la estabilidad a largo plazo. En futuros estudios se recomienda contrastar estos resultados con electrodos de carbono, material estándar en PMFC por su mayor estabilidad electroquímica.

Con el objetivo de simular una carga eléctrica real y permitir una medición precisa del voltaje generado, se conectó una resistencia externa de 10kΩ con una tolerancia de ±1%. Los datos de voltaje se registraron a intervalos de aproximadamente un minuto, lo que permitió obtener un monitoreo continuo y detallado del comportamiento eléctrico del sistema a lo largo del tiempo.

Las condiciones ambientales durante las pruebas se mantuvieron en un rango de temperatura entre 25–29 °C y una humedad relativa de 60–70%. La iluminación natural fue reducida mediante ubicación en sombra parcial, registrándose niveles promedio de 200–300 lux. Estos parámetros se controlaron para minimizar la variabilidad experimental.

Las características físicas del sistema, los materiales empleados y los parámetros eléctricos considerados en el montaje experimental se resumen en la Tabla 1, lo que permite visualizar de manera sintética la configuración empleada en la PMFC.

Tabla 1. Resumen de dimensiones, materiales y parámetros eléctricos de la PMFC basada en *Catharanthus*. Fuente: Elaboración propia.

Categoría	Parámetro	Valor / Descripción
Dimensiones del sistema	Tipo de contenedor	Cilíndrico, 22 cm (diámetro), 15 cm (altura)
	Separación entre electrodos	10 cm

	Área de los electrodos	25 cm ² (5 × 5 cm), 3 mm espesor
Materiales	Planta utilizada	<i>Catharanthus</i>
	Sustrato	Suelo franco-arenoso (pH 6.7 ± 0.1; CE = 0.42 ± 0.03 mS/cm)
	Humedad inicial	100% capacidad de campo (≈34.5%)
	Ánodo	Aluminio
	Cátodo	Cobre
Configuración eléctrica	Resistencia externa	10 kΩ ±1%
	Sistema de adquisición	Arduino Uno + Shield DAQ
	Resolución del ADC	10 bits (4.88 mV/bit)
	Frecuencia de muestreo	1 lectura por minuto
Parámetros eléctricos (3 días)	Voltaje máximo	469.21 mV
	Voltaje promedio	412 mV
	Corriente promedio	46.92 μA
	Potencia promedio	19.33 μW
	Densidad de potencia	0.77 μW/cm ²
Sin aporte hídrico (7 días)	Voltaje inicial	300–320 mV
	Voltaje final	140–160 mV
	Tasa de caída	–3.13 mV/día
	Observaciones	Oscilaciones diurnas por fotosíntesis

Nota. La tabla resume la configuración geométrica, los materiales utilizados y los parámetros eléctricos obtenidos durante las pruebas experimentales realizadas con la PMFC basada en *Catharanthus roseus*.

Este enfoque no solo posibilitó la caracterización del desempeño de la PMFC, sino que también aportó información valiosa sobre la dinámica de generación de bioelectricidad en sistemas basados en plantas y sustratos naturales.

Cabe señalar que el experimento se realizó con una sola celda, por lo que los resultados corresponden a un caso inicial de caracterización. Para garantizar reproducibilidad, en trabajos futuros se recomienda la realización de al menos tres réplicas independientes, aplicando análisis estadístico (media, desviación estándar y ANOVA) para validar la significancia de los resultados. Asimismo, se sugiere complementar la caracterización con curvas de polarización (V–I) y espectroscopía de

impedancia electroquímica (EIS), lo que permitiría identificar la resistencia interna y los procesos limitantes del sistema.

III. RESULTADOS

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 2 durante un muestreo continuo de tres días con una humedad del sustrato del 100%, el sistema con electrodos con área de 25 cm², mostró un voltaje máximo de 469.21mV y un voltaje promedio de 412mV. La corriente promedio registrada fue de 46.92 μA.

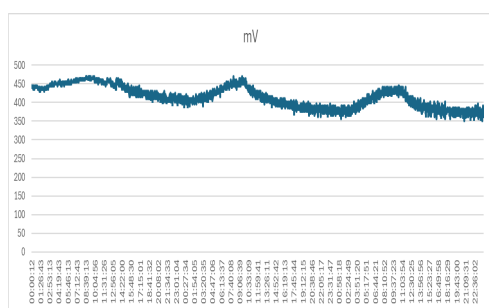


Figura 2. Muestreo de tres días del PMFC construido.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2, se observan oscilaciones diarias que pueden asociarse a variaciones de temperatura, humedad del sustrato o radiación solar, lo que sugiere que la actividad microbiana y la fotosíntesis de la planta influyen directamente en el flujo de electrones. Los picos más altos rondan los 470 mV y las caídas más pronunciadas se acercan a los 350–370mV, indicando periodos de menor actividad metabólica o condiciones ambientales menos favorables.

Con el área activa de los electrodos (25 cm²) y la corriente promedio obtenida se estima una densidad de corriente de $\approx 1.88 \mu A/cm^2$,

$$J = \frac{46.92 \mu}{25 cm^2} \approx 1.88 \mu A/cm^2$$

Y una potencia promedio generada de $\approx 19.35 \mu W$.

$$P = V_{prom} \times I_{prom} = 0.412 V \times 46.92 \times 10^{-6} A \approx 19.35$$

La inclusión de densidades de corriente y de potencia permite comparar el desempeño de este sistema con otros reportados en la literatura. Por ejemplo, estudios con arrozales han alcanzado entre 1–3 μW/cm² (Kaku et al., 2008), mientras que configuraciones con Aloe vera rondan 0.5–1.0 μW/cm² (Chong et al., 2019). Por lo tanto, el rendimiento de la PMFC con Catharanthus se ubica en

un rango intermedio, mostrando viabilidad para aplicaciones de bajo consumo.

Además, el uso de *Catharanthus* en la PMFC representa un aporte novedoso frente a especies tradicionalmente empleadas como el arroz o *Aloe vera*, ya que permite la generación de bioelectricidad en condiciones no inundadas, con un montaje simple y estable, y con la ventaja adicional de atraer polinizadores. Esto abre la posibilidad de integrar PMFC ornamentales en aplicaciones ambientales y apícolas, ofreciendo una alternativa práctica y ecológica para sistemas de monitoreo de bajo consumo.

De igual forma se observaron durante los 3 días un patrón diurno reproducible, con incrementos matutinos y máximos alrededor del mediodía ($V_{max}=469.21mV$) y descensos nocturnos ($V_{mean}=412mV$). El voltaje pico fue 13.9% superior al promedio; asumiendo carga constante, la potencia pico alcanzó ≈ 1.30 la media (25 μW vs.19.3 μW).

$$\frac{P_{pico}}{P_{media}} = \frac{(P_{pico})^2}{(P_{media})^2} = \frac{(469.21)^2}{(412.00)^2} \approx 1.30$$

Aunque los resultados son prometedores, es importante señalar que provienen de una única celda sin réplicas, por lo que carecen de análisis estadístico. Esto limita la solidez de las conclusiones, ya que no se puede cuantificar la variabilidad experimental. En futuros estudios se recomienda aplicar al menos tres repeticiones y reportar promedios con desviaciones estándar.

Este nivel de potencia confirma que la celda es capaz de alimentar sensores de ultra bajo consumo en aplicaciones de monitoreo ambiental o apícola, aunque su uso continuo requeriría optimización del diseño (por ejemplo, mayor superficie de electrodos o arreglo serie-paralelo para aumentar voltaje o corriente).

El registro continuo del voltaje generado por la PMFC durante un periodo de 7 días sin aporte de agua mostró una variación característica asociada a la disminución progresiva de la humedad en el sustrato (Figura 3). El voltaje inicial se mantuvo en el rango de 300–320mV, alcanzando un pico máximo en las primeras horas del experimento, seguido de una tendencia decreciente hasta valores cercanos a 140–160mV al final del periodo.

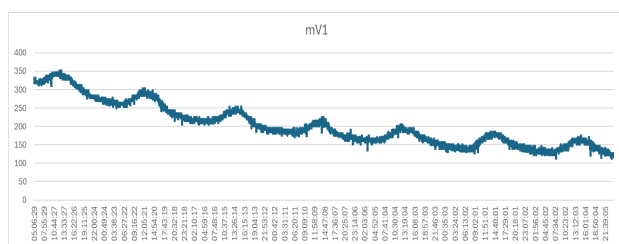


Figura 3. Voltajes adquiridos por el PMFC durante 7 días.
Fuente: Elaboración propia.

Nota: Evolución del voltaje en una PMFC durante 7 días sin aporte de agua. Se observa una tendencia decreciente (línea roja) con una tasa media de disminución de -3.13 mV/día, junto con oscilaciones diarias atribuidas a la actividad fotosintética residual y variaciones ambientales.

A lo largo de la medición se identificó un patrón oscilatorio periódico, con picos y valles recurrentes. Este comportamiento se atribuye a ciclos diarios de actividad fotosintética de la planta y a variaciones de temperatura ambiental, que influyen en la disponibilidad de compuestos orgánicos en la rizosfera y en la conductividad iónica del sustrato. Las oscilaciones fueron más pronunciadas en los primeros días y disminuyeron conforme el voltaje descendió.

IV. DISCUSIÓN

La comparación con estudios previos confirma la importancia del manejo hídrico. Strik et al. (2008) reportaron caídas similares bajo estrés hídrico en arrozales, mientras que Kumar & Manangath (2020) observaron una recuperación inmediata tras riego intermitente. Esto refuerza la hipótesis de que la humedad es un factor crítico para la estabilidad de la señal eléctrica en PMFC.

Este fenómeno puede explicarse a través de múltiples mecanismos interconectados. Primero, la disminución en la humedad del sustrato incrementa directamente la resistencia óhmica del sistema, dificultando el flujo de iones entre el ánodo y el cátodo, lo que se manifiesta como una caída en el voltaje en circuito cerrado bajo carga. Segundo, a nivel microbiológico, la desecación progresiva del suelo afecta la movilidad y actividad metabólica de las bacterias electrogénicas rizosféricas, como *Geobacter* y *Shewanella*, reduciendo la tasa de oxidación de los rizodépósitos y, por consiguiente, la liberación de electrones. Estudios metagenómicos recientes, como el de Ancona et al. (2024), han demostrado que la composición de la comunidad electroactiva puede verse alterada significativamente bajo condiciones de estrés hídrico, favoreciendo a especies más tolerantes a la sequía pero potencialmente menos eficientes en la transferencia extracelular de electrones. Tercero, desde la fisiología vegetal, el déficit hídrico induce el cierre estomático en la planta, lo que limita la tasa fotosintética (Flexas et al., 2004). Una fotosíntesis reducida se traduce en una menor producción y exudación

de compuestos orgánicos fotosintetizados hacia la rizosfera, privando a las bacterias de su sustrato primario. La tasa de reducción de -3.13 mV/día observada en este trabajo es, por lo tanto, el resultado agregado de estas limitaciones físicas, microbiológicas y fisiológicas. La recuperación reportada por Kumar & Manangath (2020) tras el riego sugiere una notable resiliencia del consorcio microbiano y de la planta, indicando que los procesos de transferencia de electrones pueden reactivarse rápidamente una vez se restablecen las condiciones favorables de humedad, lo que es alentador para el diseño de sistemas de riego automatizado basados en la demanda energética de la celda.

Los resultados obtenidos contribuyen al desarrollo de tecnologías sostenibles de conversión energética, posicionando a las celdas de combustible microbianas como una alternativa prometedora dentro de las energías renovables de bajo impacto ambiental.

La PMFC caracterizada en este estudio encarna los principios de la bioeconomía y la energía verde. A diferencia de los sistemas fotovoltaicos, que generan electricidad de forma intermitente, una PMFC operando en condiciones óptimas puede proveer una generación de energía basal continua, las 24 horas del día, ya que la actividad microbiana en la rizosfera no cesa por completo durante la noche, como lo demuestran las oscilaciones nocturnas registradas. Esta característica es particularmente valiosa para aplicaciones de monitoreo continuo que requieren un mínimo de energía durante la noche. Además, el sistema es inherentemente de bajo impacto ambiental: no emite gases de efecto invernadero durante su operación, utiliza una planta viviente que contribuye a la captura de CO_2 y puede implementarse en suelos no aptos para agricultura intensiva, promoviendo así la generación de energía en terrenos marginales. El potencial de estas celdas se ve reforzado por investigaciones recientes que exploran su uso dual para generación de energía y biorremediación de suelos ligeramente contaminados con compuestos orgánicos, donde los microorganismos electrogénicos simultáneamente generan corriente y degradan contaminantes (Toczyłowska-Mamińska et al., 2025). La integración de la PMFC en un apiario, como se propone, crea un ecosistema sinérgico donde la planta atrae polinizadores, beneficia la biodiversidad y, al mismo tiempo, genera la energía necesaria para monitorear la salud de las colmenas, cerrando un ciclo de sostenibilidad local.

Aunque la potencia obtenida es suficiente para sensores de μW , las limitaciones principales del sistema son: (i) Baja densidad de potencia frente a estándares comerciales, (ii) Fuerte dependencia de la humedad del sustrato, y (iii) Falta de replicabilidad estadística en este

estudio inicial. Estos aspectos marcan la pauta para optimizaciones futuras en diseño y metodología.

Analizando cada limitación en profundidad, se puede trazar una hoja de ruta clara para la investigación futura. En primer lugar, la baja densidad de potencia ($0.77 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) es una característica inherente a las PMFC en su estado actual de desarrollo. Sin embargo, esta no es una barrera insalvable para su aplicabilidad. La clave reside en el acoplamiento con sistemas electrónicos de gestión de energía (PMIC, por sus siglas en inglés) altamente eficientes, como los utilizados por Osorio de la Rosa et al. (2021). Estos circuitos son capaces de acumular la energía generada de forma constante pero de baja potencia en supercondensadores o baterías de thin-film durante horas o incluso días, para luego liberarla en pulsos cortos de alta potencia que permiten la operación de un sensor, el procesamiento de datos por un microcontrolador de ultra bajo consumo (como los de la familia ARM Cortex-M o algunos AVR) y la transmisión inalámbrica de dichos datos mediante protocolos de bajo consumo como LoRaWAN o Bluetooth Low Energy (BLE). La viabilidad de este enfoque ha sido demostrada en la literatura para aplicaciones de Smart Farming y Smart Cities (Ayala et al., 2019; Osorio de la Rosa et al., 2019).

En segundo lugar, la fuerte dependencia de la humedad del sustrato es, quizás, el desafío de ingeniería más importante. Superarlo requiere intervenciones a nivel de diseño y material. Una estrategia prometedora es el uso de sustratos con mayor capacidad de retención de humedad, como ciertos hidrogeles o mezclas de suelo enriquecidas con arcillas o biochar. Otra línea de trabajo, como sugieren Moqsud & Okamoto (2023), es la optimización de la geometría del contenedor para minimizar la superficie de evaporación. Además, el uso de membranas semipermeables o cubiertas de mulching podría reducir las pérdidas de agua. A un nivel más sofisticado, se podría implementar un sistema de riego automático de baja frecuencia activado por la misma señal de voltaje de la PMFC; cuando el voltaje caiga por debajo de un umbral crítico (indicador de estrés hídrico), un sistema pasivo de liberación de agua o una electroválvula alimentada por la energía almacenada podría liberar una pequeña cantidad de agua. Investigaciones futuras deben cuantificar rigurosamente la humedad del suelo con sensores capacitivos y correlacionarla directamente con el voltaje de salida para desarrollar estos algoritmos de control.

Finalmente, la falta de replicabilidad estadística es una limitación metodológica crucial de este estudio inicial.

Los resultados reportados, aunque alentadores, representan un caso de estudio único. La alta variabilidad inherente a los sistemas biológicos, influenciada por diferencias en la composición microbiana del suelo, el estado fisiológico de la planta individual y las microvariaciones ambientales, hace imperativo el uso de réplicas biológicas e instrumentales. Un diseño experimental robusto para un estudio de seguimiento debería incluir al menos tres a cinco réplicas del sistema PMFC idénticas y operando en paralelo. Esto permitiría calcular promedios, desviaciones estándar y realizar pruebas estadísticas (como ANOVA) para determinar la significancia de los efectos observados al modificar variables como el tipo de electrodo, la especie vegetal o el régimen de riego. Solo a través de la replicación se pueden obtener conclusiones generalizables y confiables.

Más allá de estas tres limitaciones principales, este estudio también señala la necesidad de una caracterización electroquímica más completa. La inclusión de curvas de polarización (voltaje vs. corriente) permitiría calcular con precisión la resistencia interna del sistema, identificar las regiones de pérdida (activación, óhmica y por concentración) y determinar el punto de máxima transferencia de potencia. Asimismo, la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) sería una herramienta invaluable para desglosar los diferentes componentes de la resistencia interna (transferencia de carga en la interfaz electrodo-bacteria, resistencia del electrolito, difusión de sustratos), guiando así las estrategias de optimización de manera más específica. Por ejemplo, la EIS podría confirmar si la limitación principal en nuestro sistema con electrodos de Cu/Al es la corrosión y alta resistencia de contacto, como se sospecha.

La elección de los electrodos de cobre y aluminio, justificada en esta etapa por su bajo costo y disponibilidad, se revela como un factor limitante al contrastarla con la literatura. Trabajos recientes, como el de Nam et al. (2020), demuestran que electrodos de materiales carbonosos, como cepillos de grafito o felpas de carbono, ofrecen un área superficial específica orders de magnitud mayor, lo que favorece la adhesión bacteriana y reduce la resistencia de polarización. La transición hacia estos materiales, aunque con un costo inicial ligeramente superior, es un paso casi obligatorio para mejorar la densidad de potencia y la estabilidad a largo plazo, mitigando los problemas de corrosión que inevitablemente afectarán la durabilidad de los electrodos metálicos.

Aunque este estudio se centró en la caracterización eléctrica de la PMFC con *Catharanthus*, es probable que la arquitectura microbiana del biofilm y la rizosfera jueguen un papel determinante en el desempeño observado. Investigaciones futuras que incluyan análisis metagenómicos, ARNr 16S dirigida y cultivos electrogénicos permitirán profundizar en los mecanismos de transferencia electrónica y optimizar la eficiencia del sistema.

V. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman que la ausencia de aporte hídrico tiene un efecto determinante en la disminución del voltaje generado por la Celda de Combustible Microbiana de Planta (PMFC). La tasa media de reducción de -3.13 mV/día obtenido en este estudio se alinea con reportes previos que indican que la humedad del sustrato es un factor crítico para el rendimiento de este tipo de sistemas (Strik et al., 2008) (Helder et al., 2010).

La presencia de oscilaciones diarias incluso en condiciones de sequía prolongada sugiere que la planta mantiene cierta actividad fotosintética residual, lo que permite un aporte limitado de materia orgánica a los microorganismos electrogénicos. Este fenómeno ha sido documentado en estudios donde el estrés hídrico no es inmediato en afectar la fotosíntesis, pero sí altera su eficiencia y continuidad (Flexas et al., 2004).

Comparado con trabajos que emplearon riego continuo o intermitente, el voltaje final obtenido en este experimento representa aproximadamente un 50% menos que el valor inicial, lo que evidencia la necesidad de estrategias de gestión hídrica para mantener un rendimiento estable. Soluciones como el uso de sustratos con mayor capacidad de retención de humedad, sistemas de riego de baja frecuencia o el empleo de membranas que reduzcan la pérdida de agua podrían mejorar significativamente la estabilidad de la señal eléctrica.

En términos prácticos, estos hallazgos implican que las PMFC operadas en entornos donde la disponibilidad de agua es limitada requerirán diseños adaptativos para conservar la humedad y minimizar las pérdidas por evaporación. Además, el patrón de caída y las oscilaciones observadas pueden emplearse como indicadores indirectos del estado hídrico del sistema, lo que abre la posibilidad de desarrollar protocolos de

control automático basados en la medición del voltaje en tiempo real.

De manera específica, este estudio aporta tres hallazgos principales:

- (i) la PMFC basada en *Catharanthus* mostro un desempeño estable bajo condiciones no inundadas, alcanzando una potencia promedio cercana a 0.77 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ con la carga empleada y un comportamiento diurno coherente con la dinámica fotosintética de la planta. Estos valores sitúan al sistema dentro del rango inferior-medio reportado para PMFC terrestres, confirmando la viabilidad de *Catharanthus* como especie hospedera para la generación de bioelectricidad.
- (ii) el estrés hídrico reduce significativamente el rendimiento, confirmando la dependencia del sistema con la humedad;
- (iii) la señal presenta un patrón diurno reproducible, lo que puede ser aprovechado como indicador bioelectroquímico del metabolismo vegetal.

Se puede concluir que el uso de *Catharanthus* representa una alternativa novedosa frente a especies tradicionalmente empleadas en PMFC, ya que funciona en condiciones no inundadas, es ornamental y atrae polinizadores. Esto abre oportunidades para integrar PMFC en espacios urbanos, jardines, viveros o incluso apiarios, donde podrían alimentar sensores de bajo consumo o sistemas de monitoreo ambiental de manera sostenible.

Para trabajos futuros, se plantea realizar un monitoreo detallado de la humedad del sustrato y la radiación solar, dos factores ambientales que pueden influir significativamente en la eficiencia de la generación de bioenergía en las PMFC.

De igual forma se propone la implementación de arreglos en serie-paralelo de múltiples PMFC basadas en *Catharanthus* con el fin de incrementar tanto el voltaje como la corriente disponible y evaluar la estabilidad del sistema en condiciones reales de operación. En particular, se plantea realizar pruebas en apiarios experimentales, donde estas PMFC ornamentales podrían integrarse al entorno sin alterar la dinámica de polinizadores y servir como fuente de energía para sensores de bajo consumo. La evaluación en campo permitirá determinar la robustez, variabilidad ambiental y potencial de escalamiento del sistema para aplicaciones de monitoreo ecológico y apícola.

REFERENCIAS

- Ancona, V., Cavone, C., Grenni, P., Gagliardi, G., Cosentini, C., Borello, D., y Caracciolo, A. B. (2024). Plant microbial fuel cells for recovering contaminated environments. *International Journal of Hydrogen Energy*, 72, 1116-1126. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.457>
- Ayala, R. D., Castillo, A. A., Ruiz, I. E., Osorio, d. I., y Vázquez, C. J. (2019). A Self-Powered PMFC-Based Wireless Sensor Node for Smart City Applications. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2019, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2019/8986302>
- Chicas, S., Sivasankar, V., Omine, K., Valladarez, J., y Mysamy, P. (2018). Plant Microbial Fuel Cell Technology: Developments and Limitations. En V. Sivasankar, P. Mysamy, y O. d. Kiyoshi (Eds.), *Microbial Fuel Cell Technology for Bioelectricity*. (pp. 49-65). Springer Cham. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-92904-0_3
- Chong, P. L., Chuah, J. H., Chow, C. O., y Ng, P. K. (2025). Plant microbial fuel cells: A comprehensive review of influential factors, innovative configurations, diverse applications, persistent challenges, and promising prospects. *International Journal of Green Energy*, vol. 22(3), 599-648. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/15435075.2024.2421325>
- Chong, P., Singh, A., y Kok, S. (2019). Potential application of Aloe Vera-derived plant-based cell in powering wireless device for remote sensor activation. (U. M. Dai-Viet N. Vo, Ed.) *PLoS ONE*, 14(12), 1-17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227153>
- Flexas, J., Bota, J., Loreto, F., Cornic, G., y Sharkey, T. D. (2004). Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. *Plant biology*, 6(3), 269-279. <https://doi.org/10.1055/s-2004-820867>
- Garbini, G. L., Barra Caracciolo, A., y Grenni, P. (2023). Electroactive bacteria in natural ecosystems and their applications in microbial fuel cells for bioremediation: A review. *Microorganisms*, 11(5), 1-18. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051255>
- Helder, M., Strik, D., Hamelers, H., Kuhn, A., Blok, C., y Buisman, C. (2010). Concurrent bio-electricity and biomass production in three Plant-Microbial Fuel Cells using *Spartina anglica*, *Arundinella anomala* and *Arundo donax*. *Bioresource technology*, 101(10), 3541-3547. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.124>
- Kaku, N., Yonezawa, N., Kodama, Y., y Watanabe, K. (2008). Plant/microbe cooperation for electricity generation in a rice paddy field. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79(1), 43-49. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00253-008-1410-9>
- Kumar, K., y Manangath, S. P. (2020). Resource recovery from paddy field using plant microbial fuel cell. *Process Biochemistry*, 99, 270-281. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.09.015>
- Lara, C. M., Lorenzana, M. S., Carmona, V. A., y Bonilla, H. A. (2023). Sistema electrónico para recolección de energía de celdas de. *Interconectando Saberes*, 23-28. <https://doi.org/https://doi.org/10.25009/is.v0i15>
- Molina, A. C., Mancilla, J. O., Assi, M. E., y Borges, E. V. (2017). ENERGÍA: CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS. *Ingeniería*, 21(1), 54-62. Retrieved 27 de 10 de 2024, from <http://redalyc.org/pdf/467/46752305005.pdf>
- Moqsud, M. A., y Okamoto, T. (2023). Bioelectricity generation from corn plant microbial fuel cell (PMFC) using natural bamboo charcoal as electrodes and *Shewanella oneidensis*. *Bioresource Technology Reports*, 24. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101611>
- Nam, T., Kang, H., Pandit, S., Kim, S. H., Yoon, S., Bae, S., y Jung, S. P. (2020). Effects of vertical and horizontal configurations of different numbers of brush anodes on performance and electrochemistry of microbial fuel cells. *Journal of Cleaner Production*, 277. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124125>
- Osorio de la Rosa, E., Vázquez Castillo, J., Carmona Campos, M., Barbosa Pool, G., Becerra Nuñez, G., Castillo Atoche, A., y Ortegón Aguilar, J. (2019). Plant Microbial Fuel Cells-Based Energy Harvester System for Self-powered IoT Applications. *Sensors*, 19, 1-16. <https://doi.org/10.3390/s19061378>
- Osorio de la Rosa, E., Vazquez, C. J., Castillo, A. A., Heredia, L. J., Castillo, A. A., Becerra, N. G., y Barbosa, R. (2021). Arrays of Plant Microbial Fuel Cells for Implementing Self-sustainable Wireless Sensor Networks. *IEEE Sensor Journal*, 1965-1974. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3019986>
- Pamintuan, K. R., Reyes, C. S., y Lat, D. K. (2020). Compartmentalization and polarization studies of a Plant-Microbial Fuel Cell assembly with *Cyn-*

- odon dactylon. *E3S Web of Conferences*, 181. <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018101007>
- Pietrelli, A., Micangeli, A., Ferrara, V., y Raffi, A. (2014). Wireless Sensor Network Powered by a Terrestrial Microbial Fuel Cell as a Sustainable Land Monitoring Energy System. *Sustainability*, 6, 7263-7275. <https://doi.org/10.3390/su6107263>
- Regmi, R., Nitorisavut, R., y Ketchaimongkol, J. (2018). A decade of plant-assisted microbial fuel cells: looking back and moving forward. *Biofuels*, 9(5), 605–612. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1432272>
- Rodríguez, R. D. (Enero de 2024). Diseño de una configuración bajo el esquema de las celdas de combustible microbianas-vegetal para la producción de electricidad a partir de la fotosíntesis de plantas vivas. *TEKHNE*, 27(1), 46-63. <https://doi.org/https://doi.org/10.62876/tekhn.v27i1.6176>
- Sophia, A. C., y Sreeja, S. (2017). Green energy generation from plant microbial fuel cells (PMFC) using compost and a novel clay separator. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 21, 59-66. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.05.001>
- Strik, D. P., Hamelers, H. V., Snel, J. F., y Buisman, C. J. (2008). Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 32(9), 870-876. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/er.1397>
- Timmers, R. A., Strik, D. P., Hamelers, H. V., y Buisman, C. J. (2013). Characterization of the internal resistance of a plant microbial fuel cell. *Electrochimica Acta*, 72, 165-171. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.04.013>
- Toczyłowska-Mamińska, R., Mamiński, M. Ł., y Kwasowski, W. (2025). Microbial Fuel Cell Technology as a New Strategy for Sustainable Management of Soil-Based Ecosystems. *Energies*, 18(4), 970. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en18040970>
- Wetser, K., Sudirjo, E., Buisman, C., y Strik, D. (2015). Electricity generation by a plant microbial fuel cell with an integrated oxygen reducing biocathode. *Applied energy*, 137, 151-157. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.006>