

AUTOMATED BIOELECTRICAL GARDEN FOR SUSTAINABLE ENERGY GENERATION IN THE EL CHORRO ANNEX

Roger Silva Abanto Doctor en Ciencias, Briones Yanet, Escobart Mayra, Limay Jenny, Mendoza Juam, Ramirez Brestley, Vasquez Fredin

Universidad Privada del Norte, roger.silva@upn.edu.pe N00289831@upn.pe, N00295598@upn.pe, N00287896@upn.pe, N00286604@upn.pe, N00289328@upn.pe, N00289464@upn.pe²

Abstract– The objective of this project was to develop and implement an Automated Bioelectric Garden as a sustainable alternative for generating electricity in rural areas without access to conventional service, focusing on the El Chorro Annex, La Libertad de Pallán district, Cajamarca. The methodology consisted of designing and assembling microbial fuel cells using live succulent plants, zinc and copper electrodes, and silt loam soil, without including energy storage systems. The cells were connected in series and parallel to directly power a 3W LED bulb. Experimental results showed that each plant generated an average of 0.4 volts, which was insufficient to power the bulb; at least six connected plants were required to reach the necessary voltage. Despite not achieving direct ignition, the technical feasibility of the bioelectric principle and the structural functionality of the system were validated. It is concluded that this technology represents an environmentally friendly, low-cost, and replicable solution, but requires improvements in system architecture, preferential use of zinc as an anode, the incorporation of electrical storage, and community training strategies for its effective and sustainable implementation in vulnerable rural areas.

Keywords: Bioelectricity, succulent plants, renewable energy, microbial cells, rural areas.

JARDÍN BIOELÉCTRICO AUTOMATIZADO PARA GENERACIÓN SOSTENIBLE DE ENERGÍA EN EL ANEXO EL CHORRO

Roger Silva Abanto Doctor en Ciencias, Briones Yanet, Escobart Mayra, Limay Jenny, Mendoza Juam,
Ramirez Brestley, Vasquez Fredin

Universidad Privada del Norte, roger.silva@upn.edu.pe N00289831@upn.pe,
N00295598@upn.pe, N00287896@upn.pe, N00286604@upn.pe, N00289328@upn.pe,
N00289464@upn.pe

Resumen– El presente proyecto tuvo como objetivo desarrollar e implementar un Jardín Bioeléctrico Automatizado como una alternativa sostenible para la generación de energía eléctrica en zonas rurales sin acceso al servicio convencional, enfocándose en el Anexo El Chorro, distrito de La Libertad de Pallán, Cajamarca. La metodología consistió en diseñar y ensamblar celdas de combustible microbianas utilizando plantas suculentas vivas, electrodos de zinc y cobre, y suelo franco limoso, sin incluir sistemas de almacenamiento energético. Las celdas se conectaron en serie y paralelo con el propósito de alimentar un foco LED de 3W directamente. Los resultados experimentales mostraron que cada planta generó en promedio 0.4 voltios, lo cual resultó insuficiente para encender el foco, requiriéndose al menos seis plantas conectadas para alcanzar el voltaje necesario. A pesar de no lograr el encendido directo, se validó la viabilidad técnica del principio bioeléctrico y la funcionalidad estructural del sistema. Se concluye que esta tecnología representa una solución ecológica, de bajo costo y replicable, pero que requiere mejoras en la arquitectura del sistema, uso preferente de zinc como ánodo, incorporación de almacenamiento eléctrico y estrategias de capacitación comunitaria para su implementación efectiva y sostenible en zonas rurales vulnerables.

Palabras clave-- Bioelectricidad, plantas suculentas, energía renovable, celdas microbianas, zonas rurales.

I. INTRODUCCIÓN

La falta de acceso a energía eléctrica en comunidades rurales de Cajamarca representa un obstáculo importante para el desarrollo socioeconómico local [1]. Aunque existen avances en tecnologías de energías renovables descentralizadas, muchas familias siguen dependiendo de fuentes contaminantes como lámparas de queso, lo cual implica riesgos para la salud y el medio ambiente [2].

Ante este contexto, surgen alternativas innovadoras basadas en el uso de bioelectricidad generada por plantas vivas. Estudios previos han demostrado que ciertas especies vegetales, especialmente suculentas, pueden ser utilizadas para generar electricidad a través de sistemas bioelectroquímicos,

aprovechando los compuestos orgánicos liberados por sus raíces y metabolizados por bacterias electroactivas [3].

II. OBJETIVOS

Desarrollar e implementar una solución de generación de energía eléctrica sostenible utilizando plantas suculentas vivas, con el fin de proporcionar iluminación en zonas rurales de Cajamarca, provincia de Celendín, específicamente en el anexo el Chorro.

- Validar la viabilidad técnica de utilizar celdas de combustible microbianas con plantas suculentas en Cajamarca.
- Diseñar un prototipo de generación eléctrica basado en plantas suculentas y almacenamiento de energía.
- Evaluar el impacto social y ambiental del sistema de generación de energía en las comunidades rurales.

III. MARCO TEÓRICO

A. Bioelectricidad

La bioelectricidad se refiere a la producción de energía eléctrica a partir de procesos biológicos naturales. En el caso de las plantas, este fenómeno ocurre principalmente en la rizosfera, donde los exudados orgánicos liberados por las raíces son descompuestos por microorganismos electroactivos, liberando electrones capturables mediante electrodos [4].

Este proceso puede integrarse dentro de celdas de microbianas combustibles (MFC), en las cuales los electrones generados son transferidos desde el ánodo hacia el cátodo, creando un flujo de corriente continuo [5].

B. Plantas Suculentas como Fuente de Bioelectricidad

Las plantas suculentas son ideales para este tipo de aplicación debido a su capacidad de adaptación a condiciones extremas y su bajo requerimiento de

mantenimiento. Además, poseen una alta eficiencia en la liberación de compuestos orgánicos a través de sus raíces, favoreciendo la actividad microbiana necesaria para la generación de energía [6].

Especies como *Aloe vera*, *Sansevieria trifasciata* y *Gazania hybrida* han sido ampliamente estudiadas por su capacidad para producir voltajes entre 0.7 V y 0.96 V por planta individual [7], lo que permite configuraciones en serie y paralelo para alcanzar niveles operativos compatibles con dispositivos de bajo consumo.

C. Automatización y Control Ambiental

Para maximizar la eficiencia del sistema, se integran sensores de humedad, temperatura y pH, junto con microcontroladores como Arduino o Raspberry Pi, permitiendo el monitoreo continuo de las condiciones del entorno y el ajuste automático de variables críticas como el riego y la ventilación [8].

IV. METODOLOGÍA

- Población

La población considerada en este estudio corresponde al distrito La Libertad de Pallán, ubicado en la provincia de Celendín, región Cajamarca, Perú. Según datos del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), este distrito cuenta con una población total de 9,084 habitantes. Cabe resaltar que La Libertad de Pallán se encuentra catalogado como un distrito en situación de pobreza extrema, con un índice de pobreza del 68.7%, lo cual representa un obstáculo significativo para el acceso a servicios básicos como la energía eléctrica [9].

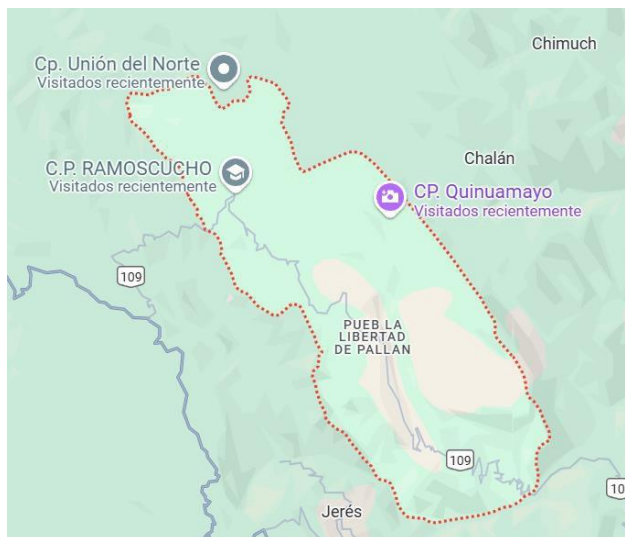


Fig. 1 representación de la población distribuida en centros poblados de La Libertad de Pallán.

- Muestra

La muestra seleccionada para este estudio corresponde al Anexo El Chorro, ubicado en el Centro Poblado Ramoscucho, dentro del distrito La Libertad de Pallán, provincia de Celendín, Cajamarca, este anexo cuenta con 24 habitantes distribuidos en 6 viviendas, según datos del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). La elección de esta muestra se basó en criterios como la ausencia de acceso a energía eléctrica convencional.

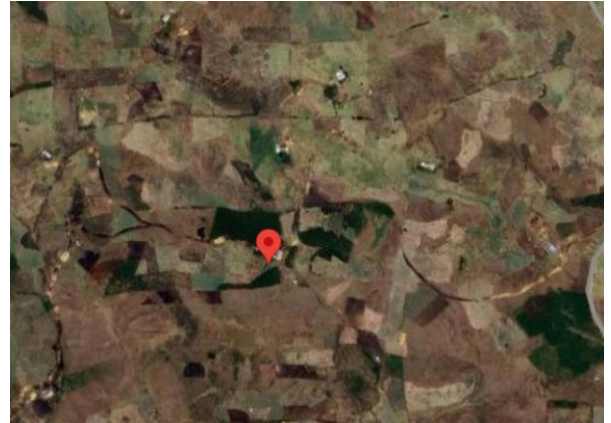


Fig. 2 Imagen satelital que representa la muestra, que es el anexo el Chorro.

- Técnicas, materiales y métodos

A. Conversión bioelectroquímica natural sin acumuladores.

Esta técnica se fundamenta en la implementación de celdas de combustible microbianas (MFC) instaladas directamente en suelo húmedo con plantas vivas, los microorganismos electroactivos presentes en el suelo degradan los compuestos orgánicos exudados por las raíces durante la fotosíntesis, liberando electrones; estos electrones son capturados por un electrodo ánodo de zinc enterrado, y fluyen hacia un cátodo de cobre expuesto al oxígeno atmosférico, produciendo una corriente eléctrica continua.

A diferencia de otros sistemas que requieren acumuladores o baterías, el sistema aprovecha la corriente generada en tiempo real para alimentar directamente un foco LED de 3 W, esto implica que el diseño debe asegurar un flujo constante y suficiente de corriente y voltaje para mantener el encendido del LED sin almacenamiento intermedio.

B. Ensamblaje modular en serie y paralelo de celdas bioeléctricas.

Para cumplir con el requisito de alimentar un foco LED de 3 W, que típicamente requiere un voltaje cercano a 3 V y una corriente aproximada de 1 A (dependiendo del tipo de LED y circuito), se utilizó una técnica de conexión modular.

Conexión en serie: Se conecta un número determinado de celdas en serie para alcanzar el voltaje necesario (aproximadamente 3 V o más).

Conexión en paralelo: Varias ramas en paralelo incrementan la corriente total disponible, buscando acercarse a 1 A de corriente continua estable.

Cada celda consiste en un electrodo de zinc como ánodo y uno de cobre como cátodo, con una planta para aportar materia orgánica y mantener el microambiente; la configuración modular permite ajustar el número total de celdas y su disposición para optimizar la salida eléctrica necesaria para encender el foco LED durante al menos 2 horas diarias.

C. Uso de electrodos metálicos compatibles y electroquímicamente activos.

Se emplean electrodos metálicos seleccionados por su reactividad, durabilidad y bajo costo, el ánodo está formado por zinc, que se oxida fácilmente en el medio húmedo del suelo liberando electrones; el cátodo es cobre, colocado en contacto con el aire para facilitar la reducción de oxígeno [2].

Esta combinación zinc-cobre produce un diferencial de potencial favorable, adecuado para generar la energía requerida. Además, ambos materiales presentan buena resistencia a la corrosión bajo condiciones naturales, garantizando una vida útil razonable para las celdas.

D. Diseño autosuficiente sin almacenamiento externo.

El sistema está diseñado para funcionar sin baterías, pilas ni dispositivos de almacenamiento energético, la corriente generada por las reacciones redox microbianas es conducida directamente al foco LED.

Este diseño requiere un cuidadoso dimensionamiento y configuración de las celdas, ya que no hay margen para acumulación de energía y compensación de fluctuaciones; la autonomía del sistema depende directamente de factores ambientales como la humedad del suelo, la actividad

microbiana y la disponibilidad de luz solar, que afecta la fotosíntesis y la producción de materia orgánica.

E. Optimización de parámetros físicos-biológicos del sistema.

Para maximizar la generación de energía y asegurar el funcionamiento continuo del foco LED, se controlan parámetros ambientales y biológicos:

Suelo: Se selecciona un suelo **franco arcilloso** o **franco limoso**, ya que este tipo de suelo tiene un **alto contenido de materia orgánica** que confiere una buena capacidad de retención de humedad [17], pero a la vez un buen drenaje, lo que evita la saturación de agua que podría afectar negativamente la actividad microbiana y la oxigenación necesaria en el sistema.

pH: Se mantiene el pH entre 6.5 y 7.0 para favorecer la actividad microbiana electrogénica y también para obtener el mayor rendimiento y productividad [18].

Plantas: Se eligen especies resistentes y de bajo mantenimiento, como las suculentas, que producen exudados orgánicos continuos y son excelentes para jardines de bajo mantenimiento [16].

Luz solar: El sistema se instala en zonas con al menos 6 horas de luz solar directa para maximizar la fotosíntesis y producción de compuestos orgánicos que alimentan a los microorganismos.

Riego y humedad: Se utiliza agua libre de contaminantes y sales en exceso, preferentemente agua potable o agua de lluvia recolectada [18], para mantener la humedad del suelo constante sin causar saturación, el riego se realiza de forma controlada para preservar un ambiente húmedo óptimo, evitando tanto la sequía [19] como el encharcamiento [20], condiciones que afectarían negativamente la actividad microbiana y la eficiencia del sistema bioeléctrico.

F. Verificación eléctrica con instrumentos básicos de medición.

Durante el montaje y pruebas, se utiliza un multímetro digital para medir y registrar:

- Voltaje en cada celda individual.
- Voltaje y corriente del sistema completo.

- Comprobación de conexiones y contacto electrodo-suelo.
- Validación del umbral eléctrico necesario para encender el foco LED de 3 W.

Esta técnica permite diagnosticar problemas, ajustar configuraciones y asegurar que la energía generada sea suficiente para el funcionamiento deseado sin recurrir a instrumentos complejos.

G. Pruebas de función y duración del encendido.

Finalmente, se realizan pruebas prácticas encendiendo el foco LED de 3 W directamente conectado al Sistema, se evalúan diferentes configuraciones para garantizar que el LED permanezca encendido de manera continua por al menos 2 horas diarias; se registran voltajes, corrientes y condiciones ambientales durante el ensayo para identificar posibles mejoras en el sistema.

- Materiales utilizados

Electrodo de Zinc (Ánodo): El electrodo de zinc actúa como ánodo en el sistema bioelectroquímico, donde su función principal es oxidarse en el suelo húmedo, liberando electrones que generan la corriente eléctrica necesaria para alimentar el LED; este metal es elegido por su alta reactividad electroquímica, buena conductividad eléctrica y disponibilidad local a bajo costo. Además, el zinc tiene una vida útil razonable en ambientes húmedos y ricos en materia orgánica, lo que lo convierte en un material confiable para la generación continua de energía en la celda microbiana.

Electrodo de Cobre (Cátodo): El electrodo de cobre funciona como cátodo, recibiendo los electrones liberados por el zinc a través del circuito eléctrico externo y facilitando la reacción de reducción del oxígeno presente en la atmósfera; su alta conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión en condiciones húmedas lo hacen ideal para esta función, la posición del cátodo en contacto con el aire es crucial para que la reacción redox se mantenga activa, garantizando un flujo constante de electrones.

Suelo Franco Arcilloso o Franco Limoso: El suelo utilizado debe ser franco arcilloso o franco limoso, ya que este tipo de suelo combina una alta retención de materia orgánica con una buena capacidad de drenaje, lo que evita la saturación de agua, estas características permiten mantener un

ambiente húmedo pero oxigenado, esencial para la actividad óptima de los microorganismos electroactivos que descomponen los compuestos orgánicos y generan electrones. Además, el suelo proporciona soporte físico a los electrodos y las raíces de las plantas.

Plantas Suculentas o Nativas: Las plantas seleccionadas, como suculentas o especies nativas resistentes, cumplen un papel fundamental al liberar exudados orgánicos a través de sus raíces; estos compuestos orgánicos son el alimento para los microorganismos electroactivos presentes en el suelo, quienes metabolizan estos exudados y generan electrones como producto de su actividad bioquímica. Las plantas elegidas deben ser de bajo mantenimiento y capaces de sobrevivir en condiciones locales para asegurar un aporte continuo de materia orgánica.

Agua Potable o de Lluvia: El agua utilizada para mantener la humedad del suelo debe ser potable o recolectada de lluvia, evitando aguas con altos contenidos de sales o contaminantes que puedan afectar la actividad microbiana o corroer los electrodos, mantener una humedad adecuada es clave para garantizar la conductividad eléctrica del suelo y la vida activa de los microorganismos, asegurando así un flujo eléctrico estable y duradero.

Cableado de Cobre: Los cables de cobre se emplean para conectar eléctricamente los electrodos y el LED, debido a su alta conductividad eléctrica y flexibilidad, el cobre garantiza una mínima pérdida de energía durante el transporte de los electrones generados por el sistema, permitiendo que la corriente llegue con suficiente intensidad para encender el foco LED. Además, el cobre es resistente a la corrosión cuando se usa con los recubrimientos adecuados.

Foco LED de 3W: El foco LED de 3 watts es el componente final que convierte la energía eléctrica generada por las reacciones bioelectroquímicas en luz visible, este tipo de LED es elegido por su alta eficiencia energética, bajo consumo y larga vida útil, además de requerir un voltaje y corriente que pueden ser alcanzados mediante la conexión en serie y paralelo de varias celdas bioeléctricas; su baja demanda energética permite que el sistema funcione sin necesidad de almacenamiento externo.

Multímetro Digital: El multímetro digital es una herramienta esencial para medir y verificar el voltaje, la corriente y la resistencia en el sistema eléctrico, su uso durante el montaje y las pruebas permite

diagnosticar el desempeño de cada celda y del sistema completo, asegurando que se alcance el umbral necesario para encender el LED. El multímetro también ayuda a identificar fallas o pérdidas energéticas, facilitando ajustes en las conexiones o en el diseño.

Conectores y Terminales Eléctricos: Los conectores y terminales eléctricos son utilizados para asegurar conexiones firmes y confiables entre los cables, electrodos y el foco LED; estos elementos evitan falsos contactos y pérdidas de energía por conexiones sueltas o corroídas, además de facilitar el montaje y mantenimiento del sistema. Se seleccionan materiales resistentes a la corrosión para garantizar la durabilidad del sistema en condiciones húmedas.

Estructura o Contenedor para Montaje: Una estructura o contenedor adecuado sostiene y organiza todos los componentes del sistema bioeléctrico, manteniendo los electrodos en posición correcta y facilitando el acceso para mantenimiento o ajustes; esta estructura puede ser de materiales resistentes a la humedad y la intemperie, como plástico o madera tratada, asegurando estabilidad y protección para el funcionamiento continuo del sistema en el ambiente externo.

- **Método de construcción paso a paso**

Paso 1: Preparación del Área de Cultivo

Selecciona un lugar que reciba al menos 6 horas diarias de luz solar directa. Prepara un contenedor o superficie con drenaje adecuado (maceta grande, cajón de madera tratada o jardinera) y llena con suelo franco arcilloso o franco limoso, previamente aireado y enriquecido con materia orgánica (puede mezclarse con compost o humus de lombriz). Asegúrate de que el suelo se mantenga húmedo, pero no encharcado.

Paso 2: Instalación del Ánodo (Electrodo de Zinc)

Entierra un electrodo de zinc en la zona más húmeda del suelo, aproximadamente a 10–15 cm de profundidad. Este será el ánodo, y su posición enterrada asegura que esté en contacto directo con los microorganismos activos y el ambiente anaeróbico donde ocurre la oxidación del zinc. La parte superior del electrodo debe quedar accesible para conectarlo al cableado.

Paso 3: Instalación del Cátodo (Electrodo de Cobre)

Coloca el electrodo de cobre cerca de la superficie del suelo, de modo que esté parcialmente expuesto al aire.

Esto facilita el contacto con el oxígeno necesario para la reacción de reducción. Este cátodo debe quedar firmemente sujeto, sin moverse, para garantizar un contacto constante con el suelo húmedo y el aire.

Paso 4: Conexión Eléctrica de la Celda

Usa cables de cobre para conectar el ánodo (zinc) al polo negativo y el cátodo (cobre) al polo positivo del circuito. Asegura las conexiones con terminales o cinta aislante para evitar corrosión o pérdidas de contacto. Esta es la base de una celda bioeléctrica individual.

Paso 5: Ensamblaje Modular (Serie y Paralelo)

- Repite los pasos 2 a 4 para construir múltiples celdas bioeléctricas.
- Conexión en serie: Une el cátodo de una celda al ánodo de la siguiente, para sumar los voltajes de cada unidad.
- Conexión en paralelo: Une ánodos entre sí y cátodos entre sí, para aumentar la corriente total.

Utiliza una combinación adecuada (por ejemplo, 3 celdas en serie x 3 ramas en paralelo) para alcanzar un voltaje de al menos 2.8 a 3.2V y una corriente superior a 700–800 mA, que es lo mínimo requerido para encender un foco LED de 3W. La cantidad exacta de celdas dependerá de las mediciones reales.

Paso 6: Verificación con Multímetro

Antes de conectar el foco LED, utiliza un multímetro digital para medir el voltaje total y la corriente del sistema completo.

- Verifica cada celda individual para asegurar que genera al menos 0.5–0.8V.
- Revisa que la corriente total supere los 700 mA. Esto es esencial para confirmar que el sistema puede alimentar el foco LED sin almacenamiento.

Paso 7: Instalación de las Plantas

Plantas suculentas o especies nativas resistentes alrededor de los electrodos. Estas plantas, a través de sus raíces, liberan exudados orgánicos que alimentan a los microorganismos electroactivos. Además, requieren poco mantenimiento, lo que mejora la estabilidad del sistema.

Paso 8: Conexión del Foco LED

Conecta cuidadosamente el foco LED de 3W directamente al sistema bioeléctrico, asegurándote de respetar la polaridad (positivo al cátodo, negativo al ánodo). Si el sistema no enciende de inmediato, revisa conexiones o prueba con una configuración diferente de celdas.

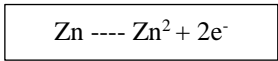
Paso 9: Monitoreo y Mantenimiento

Mantén el suelo húmedo con agua potable o de lluvia, sin saturarlo. Controla el pH (ideal entre 6.0 y 7.0) y verifica semanalmente el funcionamiento con el multímetro. Asegúrate de que las plantas estén sanas, que los electrodos no estén corroídos, y que las conexiones eléctricas permanezcan firmes.

- Reacciones químicas involucradas

A. Reacción de oxidación en el Ánodo (Zinc)

El zinc, enterrado en el suelo húmedo (ambiente anaeróbico), se oxida al liberar electrones:

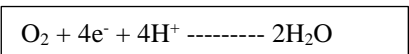


El zinc pierde electrones, lo que genera una corriente eléctrica en el circuito externo.

Esta es la reacción de oxidación.

B. Reacción de Reducción en el Cátodo (Cobre)

El cobre, colocado cerca de la superficie y expuesto al oxígeno atmosférico, permite la siguiente reacción:



Aquí, el oxígeno acepta electrones (y protones presentes en el suelo húmedo), formando agua.

Esta es la reacción de reducción.

V. RESULTADOS

Durante la fase experimental del proyecto “Jardín Bioeléctrico Automatizado para Generación Sostenible de Energía en el Anexo El Chorro”, se realizó la implementación de un sistema bioeléctrico con plantas suculentas, con el objetivo de verificar si era posible generar energía suficiente para alimentar directamente una fuente de iluminación tipo LED, sin el uso de acumuladores de energía ni baterías.

Las pruebas se desarrollaron siguiendo cuidadosamente los pasos establecidos en la metodología: se seleccionó un

suelo apropiado, se instalaron electrodos metálicos compatibles, se controló la humedad, se plantaron suculentas en el entorno de las celdas bioeléctricas y se midieron las condiciones ambientales. La energía generada por cada planta fue medida con instrumentos adecuados, y se registró que cada una producía un promedio de 0.4 voltios. Esta medición fue consistente a lo largo de diversas configuraciones y permitió concluir que, de manera individual, la energía bioeléctrica generada por una sola planta no era suficiente para alimentar la carga del sistema de iluminación.

Durante las pruebas de encendido, el foco LED no respondió, lo que evidenció que el voltaje acumulado en la configuración inicial era inferior al necesario para activar el dispositivo. Al analizar esta situación con base en los datos obtenidos, se determinó que se requerirían al menos seis plantas conectadas de manera adecuada en serie para alcanzar el nivel mínimo de energía necesario para el encendido. Sin embargo, en esta fase del experimento no se logró implementar dicha cantidad de plantas, lo que explica por qué el sistema no logró encender la fuente de iluminación.

Para descartar problemas relacionados con el circuito, el foco o las conexiones eléctricas, se conectó el sistema a una fuente de energía externa. Al hacerlo, el LED encendió de forma inmediata y sin interrupciones, lo cual confirmó que el sistema estaba correctamente ensamblado y que el problema no estaba en los componentes, sino en la baja energía generada por el conjunto bioeléctrico.

Este resultado permitió identificar que, si bien el prototipo fue funcional en términos estructurales y respondió correctamente al diseño técnico, su rendimiento fue limitado por la baja cantidad de plantas y la modesta producción de voltaje por unidad vegetal. La baja generación también puede estar influenciada por otros factores como el tipo de planta, las condiciones del suelo, la humedad ambiental y la posible formación de capas pasivadoras en los electrodos utilizados.

Además, se observó que la actividad del sistema dependía en gran medida de la salud de las plantas, el riego adecuado y la interacción activa entre las raíces y los microorganismos del suelo. Aunque estas condiciones fueron controladas y mantenidas durante el proceso, la energía producida aún no fue suficiente para lograr el objetivo inicial.

V. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos durante la fase experimental del proyecto evidencian que el sistema bioeléctrico basado en plantas suculentas logró generar energía, pero no en la cantidad suficiente como para alimentar directamente una fuente de iluminación LED. Cada planta generó un promedio de 0.4 voltios, lo que resulta insuficiente si no se cuenta con una cantidad mínima de plantas conectadas en serie. Esto evidencia la importancia de una correcta planificación del

número de celdas bioeléctricas necesarias en función de la carga que se desea alimentar.

El hecho de que el foco LED no haya encendido, pese a que el sistema estaba correctamente ensamblado y las conexiones eran funcionales, revela que el reto principal no fue técnico, sino energético. Este resultado es consistente con antecedentes científicos que destacan que, si bien las plantas pueden generar energía a través de la interacción rizosfera- microorganismos-electrodos, se requiere de una arquitectura optimizada y un número adecuado de unidades para alcanzar voltajes útiles.

Asimismo, se identificaron factores que afectan directamente el rendimiento del sistema, tales como el tipo de planta, el estado del suelo, la humedad constante y la calidad de los electrodos. La elección del aluminio en lugar del zinc, debido a la disponibilidad local, también pudo haber limitado la eficiencia del sistema por la formación de capas pasivadoras que reducen la conducción eléctrica.

Estos hallazgos reflejan que la tecnología es prometedora, pero necesita ajustes importantes en su implementación. Es clave mejorar la arquitectura modular, seleccionar mejor los materiales y ampliar la cantidad de plantas por sistema para lograr una generación de energía más estable y útil para aplicaciones prácticas.

VI. CONCLUSIONES

El sistema bioeléctrico construido logró generar energía a partir de plantas suculentas vivas, lo cual valida el principio científico de las celdas de combustible microbianas en condiciones controladas. Este resultado demuestra que es posible producir electricidad mediante la interacción entre las raíces de las plantas, los microorganismos del suelo y los electrodos metálicos, sin dañar el entorno ni la planta.

La energía generada por cada planta fue de aproximadamente 0.4 voltios, un valor insuficiente para encender directamente un foco LED, debido a que no se alcanzó el voltaje mínimo requerido. Esto indica que el número de plantas conectadas fue limitado y que, para lograr una aplicación funcional, se requiere una configuración más amplia del sistema.

La imposibilidad de encender el foco LED no estuvo relacionada con errores en el armado del circuito ni con fallas en los componentes electrónicos, ya que al conectar una fuente externa de energía el foco respondió correctamente. Esto permitió confirmar que la limitación se encuentra exclusivamente en la baja potencia generada por el sistema bioeléctrico.

La elección del aluminio como material para el ánodo, aunque fue una alternativa viable ante la falta de zinc, presentó

una baja eficiencia electroquímica. Esto probablemente se debió a su menor reactividad y a la formación de capas pasivadoras que dificultan la transferencia de electrones, reduciendo así la capacidad de generación eléctrica.

A pesar de que se tomaron medidas para asegurar condiciones óptimas —como la selección del tipo de suelo, el mantenimiento de la humedad y la elección de plantas resistentes—, estas variables no fueron suficientes para compensar la limitada cantidad de celdas bioeléctricas instaladas. La energía producida se mantuvo constante, pero por debajo del umbral funcional.

El prototipo, aunque no logró encender el foco LED de forma directa, permitió validar importantes aspectos del diseño estructural, del comportamiento eléctrico y de la funcionalidad básica del sistema. Estos aprendizajes constituyen una base sólida para futuras versiones del proyecto, más optimizadas y mejor dimensionadas.

VII. RECOMENDACIONES

Es recomendable aumentar el número de plantas suculentas integradas al sistema, conectándolas en serie para acumular un mayor voltaje. Para lograr una funcionalidad básica como la iluminación de un ambiente pequeño, se sugiere utilizar al menos seis plantas o más, dependiendo de las mediciones reales obtenidas durante las pruebas.

Se debe considerar reemplazar el ánodo de aluminio por electrodos de zinc, debido a que este metal ofrece una mayor reactividad en medios húmedos y mejora significativamente la eficiencia del proceso electroquímico. El uso de zinc podría incrementar la liberación de electrones y, por tanto, la cantidad de energía disponible.

Sería útil incorporar un sistema de almacenamiento energético, como baterías recargables o supercondensadores, que permitan acumular la energía generada a lo largo del día y utilizarla en momentos clave, como durante la noche. Esto haría que el sistema sea más autónomo y estable.

Se recomienda monitorear y registrar continuamente los parámetros ambientales del sistema, incluyendo humedad, temperatura, pH del suelo y niveles de exposición solar. Un control adecuado de estas variables permitirá mantener el entorno biológico activo y asegurar la continuidad en la producción de bioelectricidad.

Se sugiere experimentar con nuevas configuraciones del sistema, combinando conexiones en serie y paralelo de celdas bioeléctricas, con el fin de equilibrar tanto el voltaje como la corriente. Este enfoque modular permitirá una mejor adaptación a diferentes necesidades de consumo energético.

En caso de implementarse el proyecto a nivel comunitario, sería beneficioso desarrollar talleres de capacitación dirigidos a los habitantes de zonas rurales. De esta forma, podrán aprender a instalar, mantener y adaptar el sistema a sus propias necesidades, fomentando así la sostenibilidad y el empoderamiento local.

REFERENCES

- [1] Adminis. (2019). *Joven ayacuchano crea proyecto que ilumina los hogares de cientos de peruanos - IPAE - Acción Empresarial*. IPAE - Acción Empresarial. <https://www.ipae.pe/joven-ayacuchano-crea-proyecto-que-ilumina-los-hogares-de-cientos-de-peruanos/>
- [2] Chong, P. L., Chuah, J. H., Chow, C., & Ng, P. K. (2024). Plant microbial fuel cells: A comprehensive review of influential factors, innovative configurations, diverse applications, persistent challenges, and promising prospects. *International Journal Of Green Energy*, 1-50. <https://doi.org/10.1080/15435075.2024.2421325>
- [3] Díaz, M., Ramírez, J., & Rodríguez, C. (2020). "La bioelectricidad como solución para la energía renovable en zonas rurales". *Journal of Environmental Science and Technology*, 44(6), 775-783. <https://www.journals.elsevier.com/journal-of-environmental-science-and-technology>
- [4] Energía Fotovoltaica: Las Plantas como Fuente Alternativa de Energía Renovable en Portoviejo, Provincia de Manabí | Revista Científica Sinapsis. (s. f.). [https://revistas.itsup.edu.ec/index.php/sinapsis/article/view/723/1720#:~:text=El%20procedimiento%20para%20la%20obteneci%C3%B3n,la%20tira%20\(figura%201\)](https://revistas.itsup.edu.ec/index.php/sinapsis/article/view/723/1720#:~:text=El%20procedimiento%20para%20la%20obteneci%C3%B3n,la%20tira%20(figura%201))
- [5] *How plants can generate electricity to power LED light bulbs*. (2018). ScienceDaily. <https://www.sciencedaily.com/releases/2018/12/181212093308.htm>
- [6] Kumar, S., & Singh, R. (2019). "Automatización de sistemas de energía renovable mediante sensores y microcontroladores: Una revisión". *Journal of Sustainable Energy Technologies*, 30(3), 49-58. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X19302421>
- [7] Lecaro-Zambrano, J. L., & Garzón-Montealegre, V. J. (2021). Energía eléctrica fotosintética: una alternativa económica y ecológica para los sectores rurales y urbanos del Cantón Machala, Provincia de El Oro. *Polo del Conocimiento*, 6(12), 670-685. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i12.3397>
- [8] López, R., Martínez, A., & Sánchez, P. (2020). "Biogás generado a partir de estiércol de vaca: Oportunidades y retos en la región andina". *Journal of Renewable Energy*, 25(2), 45-56. <https://www.journals.elsevier.com/journal-of-renewable-energy>
- [9] Ministerio de Desarrollo e Inclusión Social. (2020, 14 de agosto). Resolución Ministerial N.º 121-2020-MIDIS: Aprueban lista de distritos priorizados para la intervención correspondiente al Apoyo Temporal para el fortalecimiento del Desarrollo Infantil. https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1237898/RM_121_2020MIDIS.pdf
- [10] Moeve. (2025, marzo 25). *Bioelectricidad: Las plantas como fuente de energía renovable*. Recuperado el 24 de mayo de 2025, de <https://www.moeveglobal.com/es/planet-energy/innovacion-sostenible/bioelectricidad-plantas-energia-renovable>
- [11] Ochoa, D., López, F., & Rodríguez, M. (2018). "Energía renovable en comunidades rurales: Análisis de la viabilidad de soluciones sostenibles en Perú". *Revista de Energía Renovable y Sostenibilidad*, 17(3), 12-20. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X18300253>
- [12] Rimachi Flores, C. I. (2019). *Estudio de la energía generada por las plantas mediante el proceso de la fotosíntesis, como alternativa sostenible*. Universidad Peruana Unión. <https://repositorio.upeu.edu.pe/server/api/core/bitstreams/40c78cf5-dab7-4bc3-81e3-109b537437b3/content>
- [13] Rojas Flores, S., Aburto Custodio, A., Espilco Soriano, N., Minchola Gallardo, J., Rodríguez Yupanqui, M., Ugaz, O. F., & Mendoza Villanueva, K. (2018). *Electricidad a partir de plantas vivas*. *Cientifi-k*, 6(1), 36-40. <https://doi.org/10.18050/Cientifi-k.v6n1a4.2018>
- [14] Zapien-Rodríguez, J. M., Solorio-De Jesús, B. A., Ballesteros-Pacheco, J. C., & Núñez-Ayala, F. L. (2019). Generación eléctrica a partir de la fotosíntesis natural: ¿una realidad escalable? *Revista de Energías Renovables*, 3(10), 1-6. <https://doi.org/10.35429/JRE.2019.10.3.1.6>
- [15] Zhou, T., Liu, Z., & Zhang, Y. (2021). "Celdas de combustible microbianas: Una solución emergente para la generación de energía renovable". *Renewable Energy*, 160, 61-70. <https://www.journals.elsevier.com/renewable-energy>
- [16] Escuela Postgrado de Ingeniería y Arquitectura. (2024) *Jardines sostenibles y de bajo mantenimiento: guía para tener un espacio verde* <https://postgradoingenieria.com/jardines-sostenibles-y-de-bajo-mantenimiento/#:~:text=Plantas%20suculentas%20y%20cactus,retener%20agua%20en%20sus%20hojas.>
- [17] Pereira-Morales, C., Maycotte-Morales, C., Elena-Restrepo, Mauro, F., B., Calle-Montes, A., Esther-Velarde, M. (2011). *Edafología*. <https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4776/edafologia.pdf>
- [18] Barra-Castillo, D., Ruiz-Corral, J., González-Eguarte, D., Flores-Garnica, J., & Díaz-Padilla, G. (2009). Distribución espacial del pH de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco, México. *Agricultura técnica en México*, 35(3), 267-276. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172009000300003&lng=es&tlng=es
- [19] SINC. *Las sequías alteran la diversidad microbiana del suelo aumentando el CO2*. <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Las-sequias-alteran-la-diversidad-microbiana-del-suelo-aumentando-el-CO2>
- [20] Das, A., Lee, D.-S., Woo, Y., Sultana, S., Mahmud, A., & Yun, B. (2025). The Impact of Flooding on Soil Microbial Communities and Their Functions: A Review. *Stresses*, 5(2), 30. <https://doi.org/10.3390/stresses5020030>