

Analysis of cases of electric energy production through the use of ornamental plants in rural communities in Peru.

Zelada Gamarra Samantha Yessebell, Student¹, Gonzales Guevara Ysauro Ivan, Studente², Tenorio Ortiz Yenny Anali, Mg³, and Gutiérrez Cárdenas Luis Sergio, Mg.⁴

^{1,2,3} y⁴ First and Fourth Author's Universidad Tecnológica del Perú, U20249431@utp.edu.pe, 21532185@utp.edu.pe, C19608@utp.edu.pe, C16726@utp.edu.pe

Abstract– In rural areas of Peru, access to electricity is a constant challenge, as they depend on traditional energy sources that are polluting, often costly and unreliable. The general objective is to determine the relationship between the production of electricity through ornamental plants and entrepreneurship in education. The specific objectives are to identify the distinctive characteristics of plants that facilitate energy generation, determine the most efficient process for generating electricity from plants and understand the impact on entrepreneurship, education and the environment. A mixed approach with a non-experimental design is used. The study corresponds to descriptive research based on an exhaustive bibliographic review, identifying the ornamental plant species with the greatest photosynthetic capacity and potential for electricity generation, adaptability to the environment and local availability, installation of plant fuel cells and measurement of the energy generated. Species such as Geranium (Geranium), Corn (Zea mays), Fitonia (Fittonia) and Corazon de Jesus (Caladium bicolor) were selected. The results showed that the various systems used with similar methods can generate different levels of energy depending on the plant species and the materials are selected for their ability to conduct electricity and their compatibility with the root environment. The analysis concludes that it is possible to obtain electrical energy from ornamental plants through these bioelectrochemical systems and that they can be used to power low consumption devices, such as environmental sensors and LED lights, all to understand the social and environmental impacts of bioelectricity, including its potential for innovation or entrepreneurship in education, enabling local development and environmental protection.

Keywords-- Ornamental plants, Electrical energy, Microbial fuel cells, Rural communities, Bioenergy.

Análisis de casos de producción de energía eléctrica a través del uso de plantas ornamentales a las comunidades rurales del Perú

Zelada Gamarra Samantha Yessebell, Student¹, Gonzales Guevara Ysauro Ivan, Studente², Tenorio Ortiz Yenny Anali, Mg³, and Gutiérrez Cárdenas Luis Sergio, Mg. ⁴

^{1,2,3} y ⁴ First and Fourth Author's Universidad Tecnológica del Perú, U20249431@utp.edu.pe, 21532185@utp.edu.pe, C19608@utp.edu.pe, C16726@utp.edu.pe

Resumen– En las zonas rurales del Perú, el acceso a la energía eléctrica es un desafío constante, dependen de fuentes de energía tradicionales que son contaminantes, muchas veces costosas y poco confiables. El objetivo general es determinar la relación entre la producción de energía eléctrica a través de plantas ornamentales y el emprendimiento en educación, los objetivos específicos son identificar las características distintivas de las plantas que facilitan la generación de energía, determinar el proceso más eficiente para la generación de electricidad a partir de plantas y comprender el impacto en emprendimiento, educación y ambiental. Se emplea un enfoque mixto con un diseño no experimental. El estudio corresponde a una investigación descriptiva basada en una revisión bibliográfica exhaustiva, identificando las especies de plantas ornamentales que cuentan con mayor capacidad fotosintética y potencial para la generación de electricidad, adaptabilidad al entorno y disponibilidad local, la instalación de celdas de combustible vegetal y la medición de la energía generada. Se seleccionaron especies como Geranio (*Geranium*), Maíz (*Zea mays*), Fitonia (*Fittonia*) y Corazón de Jesús (*Caladium bicolor*). Los resultados mostraron que los diversos sistemas empleados con métodos similares pueden generar diferentes niveles de energía dependiendo de la especie de planta y los materiales son seleccionados por su capacidad para conducir electricidad y su compatibilidad con el ambiente radicular. El análisis concluye que es posible obtener energía eléctrica a través de plantas ornamentales mediante estos sistemas bioelectroquímicos y que pueden usarse para alimentar dispositivos de bajo consumo, como sensores ambientales y luces LED, todo con el fin de comprender los impactos sociales y ambientales de la bioelectricidad, incluyendo su potencial para realizar innovación o emprendimiento en la parte de educación permitiendo el desarrollo local y la protección del medio ambiente.

Palabras clave– Plantas ornamentales, Energía eléctrica, Celdas de combustible microbianas, Comunidades rurales, Bioenergía.

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, están surgiendo nuevas formas de generar electricidad que reemplazan los métodos tradicionales [1]. En este contexto, es fundamental explorar enfoques sostenibles e innovadores que faciliten la producción de energía de manera significativa y accesibles, especialmente para las comunidades rurales [2]. La búsqueda de soluciones en esta dirección ha sido crucial para mejorar las condiciones de vida en estas zonas remotas. En este sentido, una propuesta de innovadora consiste en utilizar las plantas como recursos naturales, dado que reciben la energía proveniente del sol, la

convierten en energía almacenada y la transforman en fuentes renovable, lo cual se considera una solución viable [3]

Este estudio se centra en el potencial de las plantas ornamentales para producir energía eléctrica, aprovechando tanto su capacidad fotosintética como la descomposición de materia orgánica en el suelo [4]. En particular, se destaca el proceso de la fotosíntesis, que no solo permite a las plantas producir su propio alimento de forma natural [5] sino que también acelera su crecimiento, influyendo en el rendimiento de producción de energía [2]. Por ende, la eficiencia de la producción de energía de plantas ornamentales se ve determinada por diversas características, tales como tamaño promedio de las hojas, tipo de cultivo, cantidad de agua, entre otros factores [6]. Por ello, la correcta delimitación de agua permite lograr un rendimiento óptimo; un exceso de agua puede ahogarlas, mientras que una insuficiencia puede provocar deshidratación [7]. Además, se tiene como referencia que la cantidad de energía extraída de las plantas ornamentales mediante el método de celda solar fotovoltaica puede oscilar entre el 14% y el 18%, eso se debe a que estas plantas cuentan con un sistema altamente efectivo para captar energía; y que la fotosíntesis emplea esa energía libre para la producción de glucosa y acelerar su crecimiento [2].

Otro factor es el tipo de cultivo, especialmente por el proceso de generación y desplazamiento de electrones, debido a que la cantidad de microorganismos requeridos puede variar significativamente. En este contexto, la incorporación de mezclas con alta concentración de microorganismos se traduce en la mejora del rendimiento del cultivo, desempeñando un papel crucial en su desarrollo [8]. Un ejemplo del impacto de los electrodos se observa en el uso del zinc y cobre como ánodo y cátodo, respectivamente; en este caso, la lámina de zinc experimenta una oxidación acelerada después cierto tiempo transcurrido, lo cual afecta negativamente el voltaje generado; por esta razón, se opta por sustituirla por una lámina de aluminio, que ha demostrado ser más duradera frente a los efectos de la corrosión [9]. Además, dentro de los materiales que se pueden emplear para la construcción de diez celdas biológicas a base de plantas vegetales pueden ser varillas de grafito (6 x 3 cm); aunque, también se pueden emplear clavos de zinc como ánodo y una tela de carbono en su construcción; otra opción viable es utilizar un alambre de cobre enrollado

como cátodo, y para la medición de voltaje y amperaje se recomienda el uso del multímetro digital, mientras que para el pH-meter para medir el pH. Todos estos materiales son económicos y de fácil manejo para las comunidades rurales. Asimismo, el aprovechar las plantas como fuente de energía fomenta la conservación del medio ambiente y minimiza el impacto ecológico. [10]

En las regiones rurales del Perú, se evidencia significativas limitaciones en el acceso a energía eléctrica, lo que repercute negativamente en la calidad de vida y el desarrollo socioeconómico [11]. En estas zonas rurales, los hogares carecen de iluminación pública, enfrentan tarifas elevadas y utilizan energía de baja eficiencia. Esta situación ha ocasionado el desplazamiento de la población rural a zonas urbanas [12]. En particular, en las comunidades rurales de la región selva baja del Perú, los estudiantes enfrentan serios desafíos para llevar a cabo actividades académicas y cotidianas debido a la falta de acceso confiable a la electricidad [13]. Por lo tanto, el gobierno peruano debe impulsar en la producción de energías renovables mediante un plan a largo plazo que fomente la participación de todos los actores interesados [14]. De esta manera, la electricidad se convierte un recurso crucial y esencial para mejorar las destrezas de las personas; sin embargo, sigue siendo una problemática grave [15].

Por ello, emplear plantas ornamentales que capturen energía solar y la producen en electricidad de manera continua, utilizando materiales biocompatibles y procesos ecológicos [16] se convierte una fuente alternativa de energía y mejora la calidad de vida en comunidades rurales al ofrecer una solución sostenible a la crisis energética. [14]. Frente a esta realidad problemática, se pretende analizar diferentes métodos de generación de energía eléctrica (EE) mediante plantas ornamentales, especialmente los PMFC porque los materiales para su fabricación no son considerados contaminantes y pueden implementarse sin dañar las plantas ni el medio ambiente. Asimismo, se busca la aceptabilidad social referido como atractivo de la tecnología en la sociedad que indica el interés de las empresas e instituciones u otros por ser inversionista de desarrollo, proponiendo una viabilidad económica en términos de costos de fabricación y mantenimiento, así como valor monetario equivalente a la energía producida, enmarca los costos asociados con los materiales de fabricación de electrodos, que son materiales de fácil acceso y bajo coste [17].

II. OBJETIVOS

A. Objetivo General

Determinar la relación entre la producción de EE a través de plantas ornamentales y el emprendimiento en educación

B. Objetivos específicos

1. Identificar las características de las plantas ornamentales para generar EE en las comunidades rurales del Perú.
2. Determinar el proceso más eficiente para la generación de EE a partir de plantas ornamentales
3. Comprender los impactos de la producción de EE a través del uso de plantas ornamentales en las comunidades rurales del Perú en emprendimiento, educación y ambiental

III. HIPOTESIS

H1: Existe relación entre la producción de EE a través de plantas ornamentales y el emprendimiento en educación

H0: No relación entre la producción de EE a través de plantas ornamentales y el emprendimiento en educación

IV. METODOLOGÍA

El presente estudio se basa en un enfoque mixto, diseño no experimental y alcance descriptivo. El tipo de muestreo es no probabilístico por tener población infinita por la variedad de plantas y por conveniencia, por seleccionar plantas ornamentales. La técnica que se aplicó es la revisión bibliográfica de casos. [18].

Los métodos y procedimientos para el análisis de casos se describen a continuación:

- A. Identificación de la planta ornamentales: según el potencial de generar electricidad, capacidad de absorber, conversión a energía solar, adaptabilidad al entorno y disponibilidad local en las comunidades rurales del Perú.
- B. Análisis de métodos aplicados en el caso
- C. Identificación de material
- D. Extracción de datos de energía obtenida expresada en: Voltaje (V) calculado en milivoltios (mV), corriente eléctrica (I) calculado en microamperios (μ A), potencia eléctrica (P) expresado en Watts y densidad de potencia, expresado en watts por metro cuadrado (W/m²).
- E. Viabilidad: análisis del cultivo, considerando ítems como reproducción del método y mantenimiento a bajo costo.
- F. Sostenibilidad y tecnología

V. RESULTADOS

A. Contraste con objetivo general

Existe una relación entre obtener energía eléctrica a través de plantas ornamentales mediante P-MFC de manera viable, el rendimiento se ve afectado por factores de condiciones climáticas, condiciones de crecimiento y ubicación de los electrodos. No obstante, es viable porque permite suministrar de energía generado mediante la fotosíntesis, volviéndola un sistema sostenible en el tiempo [17]. Además, las PMFC

basadas en plantas ornamentales se denomina fuente alternativa de electricidad autoalimentadas [19]. Por ende, se puede replicar en educación, favoreciendo además el desarrollo local y el cuidado del medioambiente desarrollando así un tema de innovación debido a que se analiza problemas reales y se presentan soluciones de bajo costo que permite la generación de EE a zonas rurales. [20]

B. Contraste con objetivo específicos

1. Identificar las características distintivas de las plantas que facilitan la generación de energía en comunidades rurales del Perú

Una de las ventajas de Perú es la gran variedad de flora, entre ellas destacan las plantas ornamentales como el Geranio (*Geranium*), Maíz (*Zea mays*), Fitonia (*Fittonia*) y Corazón de Jesús (*Caladium bicolor*), las cuales podemos encontrar en zonas rurales como Loreto y Ucayali [21]. En la tabla I, se evidencia algunas características para considerarlas aptas para la generación de electricidad [22], [23].

TABLA I
CARACTERISTICAS DE LAS PLANTAS ORNAMENTALES

ITEM	VALOR
Temperatura	15 A 25°C
Agua	Depende de la planta
Luz	Directa al sol
Sustrato y suelo (Nivel de acidez)	7,5

Y en la tabla II, se evidencia la producción de energía renovable que produce cada planta. Además, se precisa que cantidad de voltaje obtenido de las 4 plantas ornamentales en 8 celdas biológicas tuvieron rendimiento promedio de 6,76 voltios, volviéndola una opción de energía verde y amigable con el entorno, sobre todo su asequibilidad y facilidad para ser aplicadas en zonas rurales y alejadas [24].

TABLA II
CANTIDAD DE VOLTAJE POR CADA PLANTA

TIPO	VOLTAJE (EN VOLTIOS)
Geranios	0,75 – 0,78
Fitonia	0,79 – 0,81
Maíz	0,78 – 0,81
Corazón de Jesús	0,85 – 0,98

Esto debido a que sus propiedades fotosintéticas y capacidad de generación de energía demostrada en estudios previos. Estas plantas son elegidas por su disponibilidad en la región y su potencial para captar energía solar de manera eficiente.

2. Determinar el proceso más eficiente para la generación de EE a partir de plantas ornamentales

Se analizó 11 casos para determinar el método más eficiente. A continuación, se determina su evaluación.

El caso 1 utilizó un sistema de humedales artificiales verticales parcialmente saturados con *Zantedeschia aethiopica* y híbridos de *Canna* para producir bioelectricidad. Utilizaron carbón activado para ánodos y cátodos, cables de cobre aislado, y gravilla volcánica en los sistemas, obteniendo como sistema más eficiente a la planta híbridos de *Canna* [25].

TABLA III
CASO 1 EN HUMEDALES ARTIFICIALES VERTICALES (VPS-CWs)

ITEM	VALOR
Voltaje	750 mV
Corriente eléctrica	140 mA/m ²
Densidad de potencia	15 mW/m ²
Periodo de estudio	7 meses

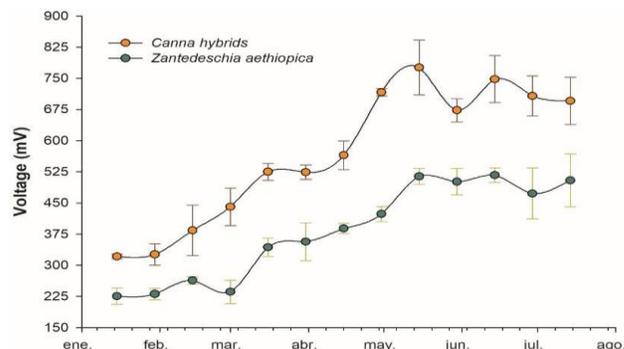


Figura 1. Comparación del voltaje (mV) generado en sistemas VPS-CW utilizando híbridos de *Canna* y *Z. aethiopica*. Nota. Estudiado durante 7 meses de retención

El caso 2 empleó *Zea mays L.* (maíz) mediante pilas de combustible microbianas con electrodos de carbón de bambú en orientaciones horizontal y vertical. Los resultados indicaron que la disposición horizontal del cátodo mostró una mayor eficiencia al generar energía, alcanzando los 320 mW/m², en comparación con la disposición vertical [26].

TABLA IV
CASO 2 EN PILAS DE COMBUSTIBLES MICROBIANA (PMFC)

ITEM	HORIZONTAL	VERTICAL
Voltaje promedio	692 mV	497 mV
Densidad de potencia	320 mW/m ²	128 mW/m ²
Cantidad de bioelectricidad maíz	320 mW/m ²	
Resistencia	100 Ω	
Periodo de estudio	70 días	

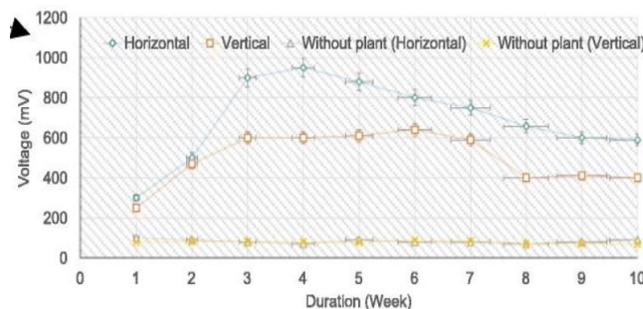


Figura 2. Variación de voltaje en disposición horizontal y vertical. Nota. Estudio diario con tres tipos de MFC.

El caso 3 estudió la planta *Lobelia Queen Cardinalis* en PMFC apiladas e individuales. No obstante, el apilar las celdas en paralelo mostró un rendimiento superior a la configuración en serie, debido a la menor reversión de voltaje y daño al biofilm [12].

TABLA V
CASO 3 EN PMFC

ÍTEM	VALOR
Voltaje máximo	800 mV
Corriente eléctrica	0,92 mA
Potencia	No especifica
Resistencia	680 Ω
Periodo de estudio	30 días

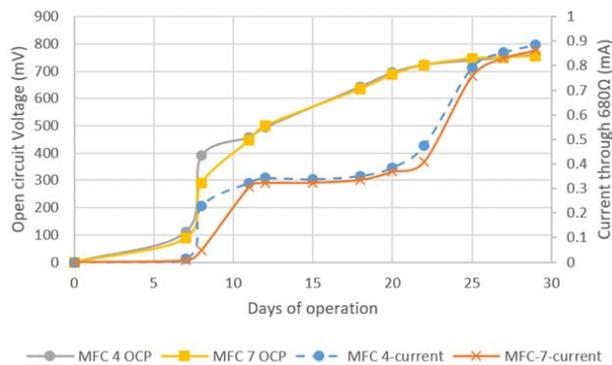


Figura 3. Potencial y corriente de circuito abierto a través de 680 Ω

El caso 4 experimentó con *Alisma plantago Aquatica*, *Festuca arundinacea*, *Carex hirta*, *Ocimum basilicum* y *musgo Polytrichum commune* en contenedores. Se construyeron 10 sistemas de electrodos con cátodos de grafito y ánodos de acero galvanizado con base de dos y veinte electrodos. En tiempo de evaluación de un mes *Sedge C. hirta* se caracterizó como la mejor por contar con mayor masa total acumulada en sus hojas y por su sistema de raíz fibrosa, con una corriente de 108,7 mA y una densidad de potencia de 970 ± 22 mW/m². Los sistemas podrían usarse para alimentar microcontroladores WiFi o recargar baterías, ver tabla IV [27].

TABLA VI
CASO 4- (PMFC) DE *SEDGE C. HIRTA*

ÍTEM	VALOR
Voltaje máximo	1126 ± 25 mV
Corriente eléctrica	108,7 mA
Densidad de potencia	970 ± 22 mW/m ² PGA

El caso 5 evaluó el uso de *Sansevieria cylindrica* como sensor de radiación visible usando un sistema de suelo-planta con electrodos de zinc y cobre. La planta, resistente a la sequía, mostró una sensibilidad de 6.6 mV/mW/cm² y una resolución de 0,13 mW/cm². Este método ofrece una alternativa económica y ecológica para medir radiación visible. Sin embargo, es afectado por la humedad y temperatura, determinando que a mayor temperatura menos voltaje [28].

TABLA VII
CASO 5- SENSOR VIVO

ÍTEM	VALOR
Voltaje	12,5 mV
Corriente	0,5 μA.
Densidad de potencia	30,39 mW/m ²

El caso 6 se aplicó en pantanos y obtuvo los siguientes valores promedio de voltaje en condiciones estables para diferentes configuraciones de PMFC utilizando jacinto de agua: PMFC1: 79,6 mV, PMFC2: 41,1 mV, PMFC3: 152,2 mV, PMFC4: 103,3 mV, PMFC5:244,8 mV, PMFC6: 222,3 mV. Esto indica variabilidad en el rendimiento del sistema y la necesidad de mejorar la transferencia de electrones para aumentar la eficiencia, ver imagen 4 [29].

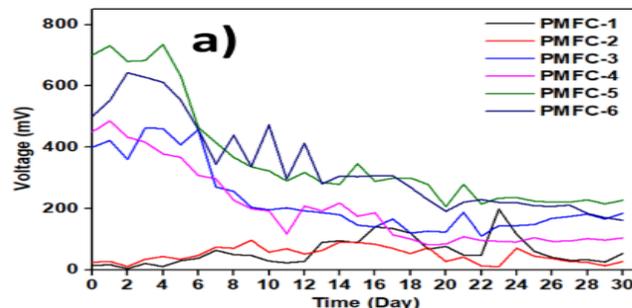


Figura 4. Valores fluctuantes de voltajes
Nota. Extraído [29].

TABLA VIII
CASO 6- PMFC PANTANOS CON SEPARACIÓN ENTRE ELECTRODOS DE 10 CM.(PMFC-1) Y PMFC-5

ÍTEM	VALOR
Voltaje	244,8 mV
Densidad de corriente	185,4 mA/m ²
Densidad de potencia	30,39 mW/m ²
Potencia máxima	100,2 mW/m ²
Periodo de estudio	30 días

El caso 7 llevó a cabo especies como *Puccinellia distans*, *Oryza sativa*, *Phragmites australis* y *Canna indica*. Estas plantas se eligieron por su tolerancia a condiciones adversas, alta fotosíntesis y capacidad para liberar compuestos orgánicos en la rizosfera, lo que mejora la eficiencia de las pMFC. Se utilizaron sistemas con diferentes configuraciones de cámaras para separar ánodos y cátodos, con materiales como fieltro de grafito y tela de carbono. Las celdas generaron potencias de hasta 80 mW/m² con *Puccinellia distans*, mostrando potencial para aplicaciones en sensores y dispositivos de bajo consumo [30].

TABLA IX
CASO 7- PMFC

ÍTEM	VALOR
Voltaje	256 mV
Densidad de corriente	105 mA/m ²
Densidad de potencia	67 mW/m ²

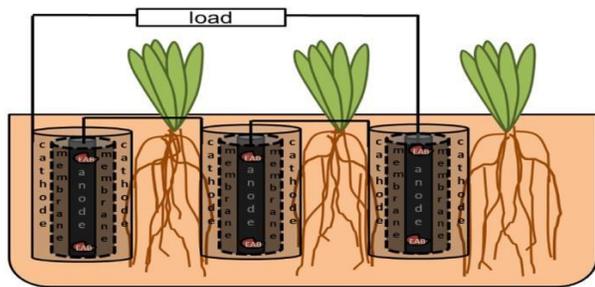


Figura 5. Representación esquemática de un pMFC tubular.
Nota. Ánodo en forma de tubo rodeado por una membrana y luego un cátodo, con conexión en serie colocado en un campo agrícola

El caso 8 investigó el potencial de las celdas de combustible microbiales usando tres plantas de interior: *Chlorophytum comosum*, *Portulaca oleracea* y *Dieffenbachia amoena*. *Chlorophytum comosum* mostró la mayor densidad de potencia (30,39 mW/m²). La producción de energía variaba según el momento del día, siendo mayor en la mañana por la fotosíntesis y en la tarde por la actividad bacteriana. Las tres plantas fueron efectivas para generar bioelectricidad, con un voltaje creciente a medida que maduraban [31].

TABLA X

CASO 8- PMFC DE MEJOR RENDIMIENTO DE LA PLANTA C. COMOSUM

ITEM	VALOR
Voltaje	340 mV
Densidad de corriente	30,8 μ A
Densidad de potencia	30,39 mW/m ²

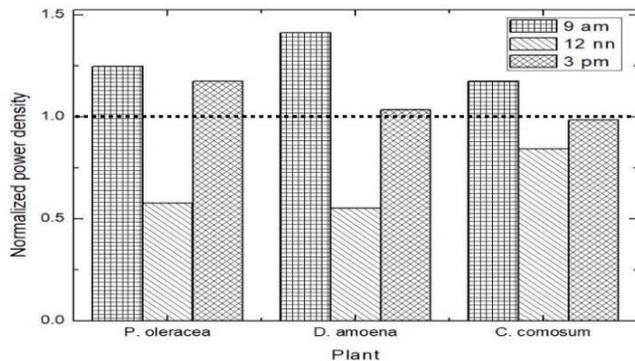


Figura 6. Densidad de potencia en el tiempo para las tres plantas de estudio.
Nota. La línea de puntos representa la densidad de potencia promedio.

El caso 9 analizó celdas combustibles microbianas vegetales para generar energía utilizando diversas especies de plantas como *Torenia fournieri*, *Kalanchoe blossfeldiana*, *Pentas lanceolata*, *Nephrolepis exaltata*, *Begonia semperflorens* y *Asplenium nidus*. Mediante la respiración de microorganismos, se recolectaron electrones en un sustrato especial. *Begonia semperflorens* mostró el voltaje promedio más alto (607 V), mientras que *Torenia fournieri* y *Asplenium nidus* tuvieron los picos más altos (1,782 V y 1,587 V). Las PMFC pueden generar energía útil para aplicaciones prácticas en áreas remotas [32]

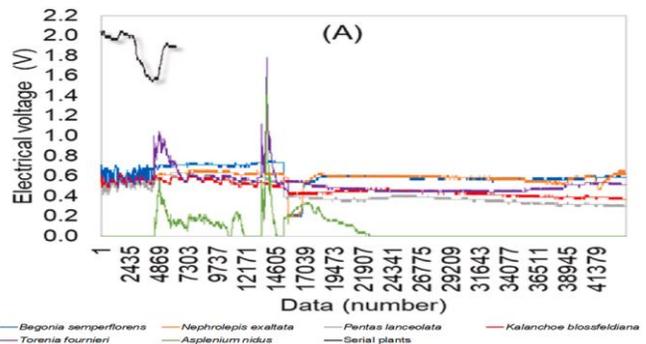


Figura 7. Medidas de cada celda para la variable de voltaje según medidas de tensión (A) de las PMFC

TABLA XI
CASO 9- PMFC

ITEM	VALOR
Voltaje	0,609 V
Densidad de corriente	185,4 mA/m ²
Densidad de potencia	30,39 mW/m ²
Potencia máxima	67 mW/m ²
Periodo de estudio	30 días

El caso 10 detalló cómo generar energía eléctrica usando Aloe Vera, Maíz, Frijol, Tomate y Musgo, mediante celdas con contenedores PET y electrodos de fieltro de grafito. Se prepare un sustrato con tierra y fertilizante, y se midió el voltaje cada 12h durante 32 días. El musgo produjo el voltaje más alto, 884 mV y 62,23 mV para el maíz. Las plantas pueden generar energía, aunque su eficiencia varía según la interacción entre las raíces, los electrodos y el suelo [17]



Figura 8. Colocación de un electrodo en el cableado.
Nota. Para los electrodos se utilizaron láminas de fieltro de grafito.

TABLA XII
CASO 10- PMFC MAÍZ

ITEM	VALOR
Voltaje	884 mV
Densidad de corriente	No especifica
Densidad de potencia	No especifica
Tiempo de estudio	32 días

El caso 11 se centró en varias especies vegetales en celdas de combustible microbianas para generar bioelectricidad. Entre las especies evaluadas están *C. fruticosa* como planta ornamental mesofítica y *Agapanthus africanus* en subunidades conectadas en serie, que

produjeron hasta 1 V y cargaron dispositivos electrónicos. La investigación combina estas celdas con humedales para biorremediación y producción de electricidad [19].

TABLA XIII
CASO11- PMFC DE *C. FRUTICOSA*

ITEM	VALOR
Voltaje	0,71 V
Densidad de corriente	5 mA/cm ²
Densidad de potencia	0,5 mW/cm ²

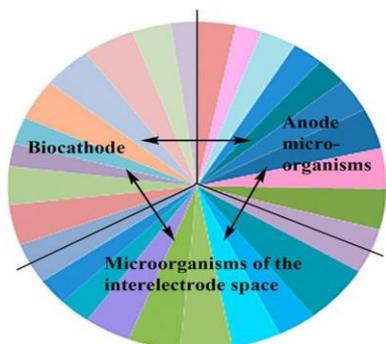


Figura 9. Representación esquemática de la comunidad microbiana PMFC.

Nota. Incluye una amplia variedad de especies de microorganismos interrelacionados del espacio biocátodo, ánodo y interelectrodo.

Asimismo, adjunto la tabla resumen de los casos analizados, teniendo en cuenta el voltaje, densidad y método.

TABLA XIV
RESUMEN DEL ANÁLISIS DE CASOS

CASOS	VOLTAJE	DENSIDAD DE LA CORRIENTE	DENSIDAD DE LA POTENCIA	MÉTODO
1	750 mV	140 mA/m ²	15 mW/m ²	Humedades artificiales verticales
2	692 mV	-	320 mW/m ²	Pilas de combustión microbianas (PMFC)
3	800 mV	0,92 mA	-	PMFC en paralelo
4	1126 ± 25 mV	108,7 mA	970 ± 22 mW/m ² PGA	PMFC
5	12,5 mV	0,5 µA.	30,39 mW/m ²	Sensor vivo
6	244,8 mV	185,4 mA/m ²	30,39 mW/m ²	PMFC en pantanos
7	256 mV	105 mA/m ²	67 mW/m ²	PMFC
8	340 mV	30,8 µA	30,39 mW/m ²	PMFC
9	0,609 V	185,4 mA/m ²	30,39 mW/m ²	PMFC
10	884 mV	-	-	PMFC
11	0,71 V	5 mA/cm ²	0,5 mW/cm ²	PMFC

Después del análisis, el método más eficiente es PMFC (pilas de combustible microbiana de origen vegetal) porque emplea las raíces de las plantas, nutrientes y otros materiales de bajo costo que se encuentra a disposición de las comunidades rurales, volviéndose una excelente alternativa de solución para la generación de energía renovable [31]. La ventaja que ofrece es la producción de electricidad de forma ininterrumpida, todo el día y la noche, a diferencia de los paneles solares fabricados por humanos [17]. Por ende, es viable y sostenibles porque es de bajo costo, con nueva eficiente energética y se adapta a las limitaciones de infraestructura en las zonas rurales [14].

- Comprender el impacto de la producción de EE a través de plantas ornamentales a través de plantas ornamentales en las comunidades rurales del Perú en emprendimiento, educación y ambiental

En base al análisis de casos se determinó un presupuesto aproximado para la adquisición de materiales que permita la generación de EE a través de plantas ornamentales en comunidades rurales. Los materiales fueron seleccionados en función de su disponibilidad, costo y eficiencia. En la tabla XIV se observa el detalle los materiales y el costo total de 300 soles para elaboración de una celda de combustión vegetal.

TABLA XV
ESTIMACIÓN DE MATERIALES BÁSICOS

Item	Presupuesto	
	Material	Costo promedio (S/.)
1	Planta ornamental	S/ 15.00/unidad
2	Contenedor o maceta	S/ 20.00/unidad
3	Sustrato especial	S/ 15.00/kg
4	Varilla de grafito	S/ 10.00/unidad
5	Alambre de cobre enrollado	S/ 10.00/unidad
6	Foco led	S/ 10.00/unidad
7	Multímetro digital	S/ 70.00/unidad
8	pH-meter	S/ 130.00/unidad
9	Detector de voltaje	S/ 30.00/unidad
10	Cables conductores	S/ 10.00/rollo
11	Cuaderno de apuntes	S/ 10.00/unidad
TOTAL		S/ 330.00

Asimismo, si se plantea una comparación de costo entre la energía producida por una celda vegetal y la de un panel solar portátil el resultado es similar; no obstante, las celdas de combustible vegetal presenta beneficios ambientales significativos [21]. Y considerando las regiones rurales del Perú se requiere una generación de energía sostenible y accesible debido a las limitaciones de acceso a fuentes de energía convencionales como la ubicación, infraestructura limitada y costos prohibitivos [33]

El estudio publicado en el año 2021 muestra el acceso a la red pública de EE por departamento; y se observa a los departamentos de Loreto y Ucayali como aquellos con

menor acceso a energía eléctrica con un 54,4% y 51,9% respectivamente. [34]

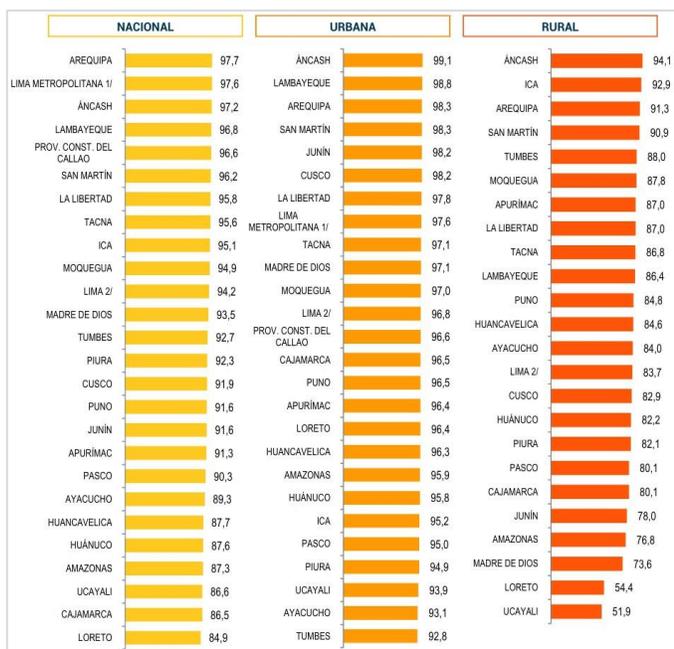


Figura 10. Instalación del servicio eléctrico por departamento. Nota. Extraído de [34].

Si analizamos a detalle, la región de la Selva registra el mayor porcentaje de hogares afectados por interrupciones o cortes de energía eléctrica, con un 62,8%, seguido de la región Sierra con un 54,7% y la Costa con un 36,1%. [34]



Figura 11. Interrupciones o cortes de energía eléctrica por región natural. Nota. Extraído de [34].

Además, la zona rural presentó el mayor porcentaje de interrupciones en el suministro eléctrico, alcanzando un 54,6% frente a un 42,8% de la zona urbana. [34]

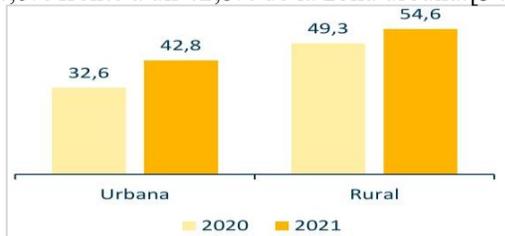


Figura 12. Interrupciones o cortes de energía eléctrica por área de residencia. Nota. Extraído de [34].

Por ello, explorar soluciones innovadoras y sostenibles como la generación de energía utilizando plantas ornamentales, abre nuevas oportunidades de mejorar las condiciones de vida de las personas, debido a que presentan un doble beneficio, además de su valor estético, pueden contribuir a la generación de energía, proporcionando una fuente renovable y continua de electricidad [20].

De esta manera, aprovechar las plantas utilizadas por los agricultores para producir bioelectricidad puede ofrecerles la oportunidad de generar ganancias y una forma de emprendimiento en las zonas rurales del Perú. Además, la implementación para la generación de energía permitirá crecer monetaria y socialmente, y el uso de plantas ornamentales como innovación de generación de energía probablemente será socialmente satisfactorio y aceptable para grandes masas, la generación de bioelectricidad renovable, con su implementación en áreas públicas, abordará los problemas de electricidad, así como los problemas ambientales que enfrentamos actualmente [10].

Asimismo, se evidencia de vacíos en investigaciones sobre energías renovables (ER), especialmente en la educación de energías renovables (EER) y perspectiva crítica. A nivel institucional, ausencia de adecuación del diseño curricular a temas ambientales. Por ello, existe una responsabilidad de las comunidades investigadoras educativas consolidar el campo de estudio [35].

Como solución innovadora nace el aprendizaje colaborativo, el cual articula la docencia y la atención de los problemas ambientales, analizando temas reales, pero sobre todo imparte pensamiento crítico y reflexivo en búsqueda de soluciones amigables con el medio ambiente y de bajo costo [36]. Asimismo, el ABP (aprendizaje basado en problemas) permite a los estudiantes crear experiencias únicas, donde analizan problemas reales de su comunidad y brindan soluciones para disminuir el impacto ambiental mediante la promulgación o generación de energías renovables. [37]

Asimismo, a nivel de universidad se tiene el proyecto denominado Plantalámparas cuyo rendimiento eficiente de bajo consumo es de 300 lúmenes y se plantan a través de plantas, en el cual se evaluó el pH, humedad, temperatura y valores eléctricos, agua, entre otros. [38]

IV. DISCUSION

Con relación al objetivo general, determinar la relación entre la producción de EE a través de plantas ornamentales y el emprendimiento en educación. Se proporciona como resultado que la metodología aprovecha la capacidad de las plantas para producir electrones a través de la descomposición de materia orgánica en el suelo, convirtiéndolos en electricidad sin afectar su

crecimiento. Esto concuerda con [39], que los resultados experimentales muestran una ganancia de voltaje muy alta, indicando un enorme potencial para la generación de energía mediante fuentes naturales como las plantas. Por otro lado, [40] incorporar plantas en sistemas abre nuevas vías de investigación en el campo de la energía verde, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y mostrando su potencial para aplicaciones sostenibles en agricultura y energía renovable, el uso de plantas ornamentales no solo puede proporcionar una fuente alternativa de energía, sino que también puede mejorar la calidad de vida en comunidades rurales al ofrecer una solución sostenible a la crisis energética, además, abre un abanico de oportunidades para el emprendimiento en el ámbito educativo, la intersección entre la biotecnología, la sostenibilidad y la educación puede ser un catalizador para el desarrollo de iniciativas que fomenten el aprendizaje práctico y la innovación en estas comunidades.

Respecto al primer objetivo específico, identificar las características de las plantas ornamentales para generar EE a las comunidades rurales del Perú. Resulta que los parámetros morfológicos de las plantas, como la masa total acumulada de hojas/tallos y raíces secas, junto con las características estructurales de los biomódulos y el uso de sustratos con presencia de carbón activado estimula el crecimiento y la producción de nuevas plantas ornamentales en sistemas de humedales construidos parcialmente saturados. Según [41], al tener los nutrientes disponibles en la solución nutritiva, las plantas no necesitan extender sus raíces profundamente, lo que reduce el desgaste energético y permite almacenar energía de manera eficiente en las raíces. Sin embargo, de acuerdo con [42] es crucial considerar no solo los atributos externos como forma, tamaño, color y recambio de flores y hojas, sino también la capacidad de preservar estas características al diseñar sistemas para la generación de bioelectricidad.

Conforme al segundo objetivo específico, determinar el proceso más eficiente para generar EE a través del uso de plantas ornamentales en las comunidades rurales del Perú. De los resultados obtenidos, se analizó que las celdas pueden generar potencias máximas que varían según las especies vegetales, bacterianas y los materiales empleados en la construcción de las celdas (seleccionados por su capacidad para conducir electricidad y su compatibilidad con el ambiente radicular). Según la referencia [43] abordan la optimización de condiciones para maximizar la producción de energía, aprovechando la capacidad natural de las plantas para convertir la luz solar en energía química. Para enriquecer al campo, [22] destacan que la variabilidad del voltaje y la densidad de potencia depende de una serie de factores, incluyendo el tipo de planta, el tipo de sustrato, el diseño de la pila de combustible y las condiciones ambientales (como la intensidad de la luz, la

temperatura, el pH y la humedad).

Del objetivo específico, comprender los impactos de la producción de EE a través del uso de plantas ornamentales a las comunidades rurales del Perú en emprendimiento, educación y ambiental. Al contrastar los resultados de los casos se evidencia que las plantas de interior son efectivas en la generación de bioelectricidad, presentando un potencial prometedor para aplicaciones en dispositivos de bajo consumo y como fuente de energía verde. Dado que Loreto y Ucayali tienen uno de los menores porcentajes de hogares con acceso a energía eléctrica (ver Figura 1), este enfoque podría significar una mejora significativa en la calidad de vida de las comunidades rurales (ver Figura 2). Guardando relación con [24], la energía fotosintética de las plantas ornamentales puede ser suficiente para cargar celulares y encender lámparas, ayudando a reducir costos energéticos y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental. Como aporte de [31] proponen que, con un diseño y selección óptimos de plantas, las PMFC pueden escalarse para aplicaciones comerciales y políticas públicas, promoviendo energía sostenible en regiones con escasez de recursos energéticos.

V. CONCLUSIONES

El estudio muestra como alternativa considerable utilizar plantas ornamentales seleccionadas que presentan un alto potencial bioenergético y pueden ser cultivadas de manera sostenible en la región. En cuanto a los sistemas de bioelectricidad implementados han demostrado ser eficientes y rentables, proporcionando energía eléctrica en zonas rurales con acceso limitado a la red eléctrica tradicional. El uso de plantas ornamentales para la generación de energía eléctrica puede ser integrado en los programas educativos, promoviendo un enfoque de aprendizaje basado en proyectos. Este enfoque permite a los estudiantes involucrarse activamente en la investigación y el desarrollo de tecnologías sostenibles, al mismo tiempo que se les enseña sobre la importancia de la energía renovable y la conservación del medio ambiente. Al implementar talleres y cursos que enseñen a los estudiantes sobre la fotosíntesis, la biotecnología y la electroquímica, se puede cultivar un interés en las ciencias naturales y la ingeniería, preparando a los jóvenes para carreras en campos relacionados con la sostenibilidad y la energía.

Se identificaron que las plantas ornamentales son las más adecuadas para generar energía eléctrica en las comunidades rurales del Perú, debido a sus características como rápido crecimiento, alta fotosíntesis y capacidad de producir electricidad a través de procesos electroquímicos.

El proceso más eficiente para generar energía eléctrica a través del uso de plantas ornamentales implica el uso de celdas de combustible microbianas que aprovechan la fotosíntesis y la descomposición de materia orgánica por

microorganismos para producir electricidad. Factores clave son la selección adecuada de electrodos, sustratos y condiciones ambientales como luz, temperatura y humedad.

La producción de energía eléctrica mediante plantas ornamentales abre la puerta a beneficios significativos en las comunidades rurales de las regiones más afectadas del Perú, al proveer una fuente de energía renovable, sostenible y de bajo costo que puede satisfacer necesidades básicas como iluminación y carga de dispositivos. Además, este enfoque puede inspirar a los estudiantes a desarrollar proyectos de emprendimiento que integren la biotecnología y la energía renovable, fomentando la innovación y el pensamiento crítico.

REFERENCIAS

- [1] T. T. Cuong *et al.*, «Renewable energy from biomass surplus resource: potential of power generation from rice straw in Vietnam», *Scientific Reports*, vol. 11, n.º 1, 2021, doi: 10.1038/s41598-020-80678-3.
- [2] Z. Lu *et al.*, «Power-generating trees: Direct bioelectricity production from plants with microbial fuel cells», *Applied Energy*, vol. 268, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115040.
- [3] W. Apollon *et al.*, «Impact of Opuntia species plant bio-battery in a semi-arid environment: Demonstration of their applications», *Applied Energy*, vol. 279, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115788.
- [4] G. Bataillou, O. Ondel, y N. Haddour, «900-Days long term study of plant microbial fuel cells and complete application for powering wireless sensors», *Journal of Power Sources*, vol. 593, 2024, doi: 10.1016/j.jpowsour.2023.233965.
- [5] D. S. C. Daminieli, M. T. Portes, y J. A. Feijó, «Electrifying rhythms in plant cells», *Current Opinion in Cell Biology*, vol. 77, 2022, doi: 10.1016/j.ccb.2022.102113.
- [6] A. I. Darras, «Implementation of sustainable practices to ornamental plant cultivation worldwide: A critical review», *Agronomy*, vol. 10, n.º 10 October, 2020, doi: 10.3390/agronomy10101570.
- [7] T. E. Kuleshova *et al.*, «Influence of the electrode systems parameters on the electricity generation and the possibility of hydrogen production in a plant-microbial fuel cell», *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, n.º 58, pp. 24297-24309, 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.06.001.
- [8] E. T. Sayed *et al.*, «Progress in plant-based bioelectrochemical systems and their connection with sustainable development goals», *Carbon Resources Conversion*, vol. 4, pp. 169-183, 2021, doi: 10.1016/j.crcon.2021.04.004.
- [9] R. Concepcion II, K. Francisco, A. G. Janairo, J. J. Baun, y L. G. Izzo, «Genetic atom search-optimized in vivo bioelectricity harnessing from live dragon fruit plant based on intercellular two-electrode placement», *Renewable Energy*, vol. 219, 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.119528.
- [10] S. R. B. Arulmani *et al.*, «Sustainable bioelectricity production from *Amaranthus viridis* and *Triticum aestivum* mediated plant microbial fuel cells with efficient electrogenic bacteria selections», *Process Biochemistry*, vol. 107, pp. 27-37, 2021, doi: 10.1016/j.procbio.2021.04.015.
- [11] L. O. B. Safa, G. G. A. Arteaga, M. M. V. Játiva, y J. E. S. Giler, «Energía Biofotovoltaica: Las Plantas como Fuente Alternativa de Energía Renovable en Portoviejo, Provincia de Manabí», *Revista Científica Sinapsis*, vol. 1, n.º 22, Art. n.º 22, jun. 2023, doi: 10.37117/s.v1i22.723.
- [12] G. Bataillou, N. Haddour, y C. Vollaie, «Bioelectricity production of PMFC using *Lobelia Queen Cardinalis* in individual and shared soil configurations», presentado en E3S Web of Conferences, 2022. doi: 10.1051/e3sconf/202233408001.
- [13] C. L. Trujillo Rodríguez, «The Current Landscape of Access to Electrical Energy», *Ingeniería (Colombia)*, vol. 29, n.º 2, 2024, doi: 10.14483/23448393.22198.
- [14] H. Campodónico y C. Carrera, «Energy transition and renewable energies: Challenges for Peru», *Energy Policy*, vol. 171, 2022, doi: 10.1016/j.enpol.2022.113261.
- [15] M. Farhali *et al.*, «Social, environmental, and economic consequences of integrating renewable energies in the electricity sector: a review», *Environmental Chemistry Letters*, vol. 21, n.º 3, pp. 1381-1418, 2023, doi: 10.1007/s10311-023-01587-1.
- [16] N. Uria-Molto *et al.*, «Self-contained and integral microbial fuel cells as portable and sustainable energy sources for low-power field devices», *Electronic Journal of Biotechnology*, vol. 57, pp. 44-51, 2022, doi: 10.1016/j.ejbt.2022.04.004.
- [17] R. D. R. Martínez y M. E. A. Bermúdez, «Production of electrical energy from living plants in microbial fuel cells», *Clean Energy*, vol. 7, n.º 2, pp. 408-416, 2023, doi: 10.1093/ce/zkac092.
- [18] J. Arias, J. Holgado, T. Tafur, y M. Vasquez, *Metodología de la investigación: El método ARIAS para desarrollar un proyecto de tesis*. Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú, 2022. doi: 10.35622/inudi.b.016.
- [19] I. Rusyn, «Role of microbial community and plant species in performance of plant microbial fuel cells», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 152, p. 111697, dic. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111697.
- [20] J. Prasad y R. K. Tripathi, «Voltage control of sediment microbial fuel cell to power the AC load», *Journal of Power Sources*, vol. 450, 2020, doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.227721.
- [21] M. Hameed Jabbar, A. K. Abdullah, y F. Mohammed Ali, «Realizing smart microgrid electricity solutions for rural communities using a hybrid microgrid system based on renewable energy sources», *Salud, Ciencia y Tecnología - Serie de Conferencias*, vol. 3, 2024, doi: 10.56294/sctconf2024833.
- [22] T. H. Cheng, K. B. Ching, C. Uttraphan, y Y. M. Heong, «Electrical energy production from plant biomass: An analysis model development for *Pandanus amaryllifolius* plant microbial fuel cell», *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 18, n.º 3, pp. 1163-1171, 2020, doi: 10.11591/ijeecs.v18.i3.pp1163-1171.
- [23] A. Ferrante, A. Trivellini, D. Scuderi, D. Romano, y P. Vernieri, «Post-production physiology and handling of ornamental potted plants», *Postharvest Biology and Technology*, vol. 100, pp. 99-108, feb. 2015, doi: 10.1016/j.postharvbio.2014.09.005.
- [24] J. L. Lecaro-Zambrano y V. J. Garzón-Monteaegre, «Energía eléctrica fotosintética: una alternativa económica y ecológica para los sectores rurales y urbanos del Cantón Machala, Provincia de El Oro», *Polo del Conocimiento*, vol. 6, n.º 12, Art. n.º 12, dic. 2021, doi: 10.23857/pc.v6i12.3397.
- [25] H. R. González-Moreno *et al.*, «Bioelectricity Generation and Production of Ornamental Plants in Vertical Partially Saturated Constructed Wetlands», *Water*, vol. 13, n.º 2, Art. n.º 2, ene. 2021, doi: 10.3390/w13020143.
- [26] M. A. Moqsud y T. Okamoto, «Generación de bioelectricidad a partir de celdas de combustible microbianas de plantas de maíz (PMFC) utilizando carbón de bambú natural como electrodos y *Shewanella oneidensis*», *Bioresource Technology Reports*, vol. 24, p. 101611, dic. 2023, doi: 10.1016/j.biteb.2023.101611.
- [27] I. B. Rusyn, O. M. Fihurka, y V. V. Dyachok, «EFFECT OF PLANTS MORPHOLOGICAL PARAMETERS ON PLANT-MICROBIAL FUEL CELL EFFICIENCY», *Innovative Biosystems and Bioengineering*, vol. 6, n.º 3-4, pp. 161-168, 2022, doi: 10.20535/ibb.2022.6.3-4.273108.
- [28] C. Trigona, I. Puglisi, A. Baglieri, y A. M. Gueli, «Measurement of Visible Radiation through a *Sansevieria cylindrica*-Based "Living Sensor"», *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, n.º 6, 2023, doi: 10.3390/app13063896.
- [29] I. D. Widharyanti, M. A. Hendrawan, y M. Christwardana, «Membraneless plant microbial fuel cell using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for green energy generation and biomass production», *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 10, n.º 1, pp. 71-78, 2020, doi: 10.14710/ijred.2021.32403.
- [30] T. Kuleshova *et al.*, «Plant microbial fuel cells as an innovative, versatile agro-technology for green energy generation combined with

- wastewater treatment and food production». *Biomass and Bioenergy*, vol. 167, 2022, doi: 10.1016/j.biombioe.2022.106629.
- [31] K. R. S. Pamintuan, M. A. L. Calma, K. A. D. Feliciano, y K. J. P. D. Lariba, «Potential of Bioelectricity Generation in Plant-Microbial Fuel Cells Growing House Plants», presentado en IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020. doi: 10.1088/1755-1315/505/1/012043.
- [32] E. R. Ballestas *et al.*, «Power generation potential of plant microbial fuel cells as a renewable energy source», *Renewable Energy*, vol. 221, 2024, doi: 10.1016/j.renene.2023.119799.
- [33] J. V. Boas, V. B. Oliveira, M. Simões, y A. M. F. R. Pinto, «Review on microbial fuel cells applications, developments and costs», *Journal of Environmental Management*, vol. 307, p. 114525, abr. 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.114525.
- [34] «INEI - Acceso a los servicios básicos en el Perú, 2021». Consultado: 13 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1863/
- [35] C. David Rojas-Hoyos y A. Molina-Andrade, «Concepciones sobre educación en energías renovables y educación ambiental: Estudio exploratorio mediante Mapeamiento Bibliográfico Infomacional (MIB)», *Bio-grafía. Escritos Sobre la Biología y su Enseñanza*, pp. 2601-2610, jul. 2022.
- [36] J. M. García-Arévalo, D. F. Becerra-Rodríguez, M. E. Téllez-Acosta, y A. D. V. Sánchez, «Collaborative learning in the study of renewable energies: a route towards teacher training», *Formacion Universitaria*, vol. 15, n.º 6, pp. 71-82, 2022, doi: 10.4067/S0718-50062022000600071.
- [37] E. L. Pérez Montero y I. Salcedo Benavides, «Metodología del aprendizaje basado en problemas en la educación de energías renovables», *Revista Científica Epistemia*, vol. 6, n.º 2, pp. 64-76, 2022.
- [38] «Las plantas que “dieron luz” a los poblados de la selva amazónica en Perú», BBC News Mundo. Consultado: 13 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/11/151109_tecnologia_plant_alamparas_energia_electrica_selva_indigenas_luz_peru_amazonas_utec_lb
- [39] L. A. Alvarez Muñoz, «Estudio de viabilidad de la generación de energía eléctrica mediante una célula de combustible vegetal microbiana (Plant-Microbial Fuel Cell) por fotosíntesis de la planta *Phaseolus vulgaris* (frijol)», masters, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2021. Consultado: 13 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://biblioteca.ingenieria.usac.edu.gt/>
- [40] F. Meder, A. Mondini, F. Visentin, G. Zini, M. Crepaldi, y B. Mazzolai, «Multisource energy conversion in plants with soft epicuticular coatings», *Energy and Environmental Science*, vol. 15, n.º 6, pp. 2545-2556, 2022, doi: 10.1039/d2ee00405d.
- [41] F. del P. Leon Capacyachi, «Generación de energía limpia, no convencional, sostenible empleando raíces de plantas hidropónicas-Lima,2022», *Repositorio Institucional - UCV*, 2022, Consultado: 13 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/100824>
- [42] A. Trivellini, S. Toscano, D. Romano, y A. Ferrante, «LED Lighting to Produce High-Quality Ornamental Plants», *Plants*, vol. 12, n.º 8, 2023, doi: 10.3390/plants12081667.
- [43] R. C. Adrianzen Alva y M. S. A. Moran Flores, «Producción de energía eléctrica a partir de la fotosíntesis del *Allium fistulosum* (cebolla china), San Ignacio y Lambayeque», *Repositorio Institucional - UCV*, 2020, Consultado: 13 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/47901>