



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales

No Renovables

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Prototipo de lámpara LED sustentable con energía biofotovoltaica

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones.

AUTOR:

Luis Alfredo Azuero Jaramillo

DIRECTOR:

Ing. Christian Hernán Campoverde Ramírez. Mg.Sc

Loja – Ecuador

2024

Certificación

Loja, 26 de febrero de 2024

Ing. Christian Campoverde Ramírez, Mg. Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo proceso de la elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Prototipo de lámpara LED sustentable con energía biofotovoltaica**, previo a la obtención de título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, de la autoría del estudiante **Luis Alfredo Azuero Jaramillo, con cédula de identidad Nro. 1105634008**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja para el efecto, autorizo la presentación para la respectiva sustentación y defensa.

Ing. Christian Hernán Campoverde Ramírez, Mg. Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **Luis Alfredo Azuero Jaramillo**, declaro ser el autor del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi Trabajo de Titulación en el Repositorio Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:

Cédula de Identidad: 1105634008

Fecha: 30 de julio 2024

Correo electrónico: luis.azuero@unl.edu.ec

Teléfono: 0980083380

Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total, y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Titulación.

Yo, **Luis Alfredo Azuero Jaramillo**, declaro ser el autor del Trabajo de Titulación denominado: **Prototipo de lámpara LED sustentable con energía biofotovoltaica**, como requisito para optar por el título de **Ingeniero En Electrónica y Telecomunicaciones**; autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja, para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los treinta días del mes de julio de dos mil veinticuatro:

Firma:

Autor: Luis Alfredo Azuero Jaramillo

Cédula: 1105634008

Dirección: Catamayo – (Barrio Nueva Esperanza)

Correo electrónico: luis.azuero@unl.edu.ec

Teléfono: 0980083380

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Titulación: Ing. Christian Hernán Campoverde Ramírez, Mg. Sc.

Dedicatoria

Dedico esta investigación a mis padres, Germán Azuero y Carmen Jaramillo, quienes han sido lo más importante en la vida con su amor inquebrantable y su sacrificio. Su constante aliento y guía iluminaron mi camino, dándome la fortaleza para alcanzar este logro.

A mi hermana Karina, cuyo amor, paciencia y apoyo incondicional me han inspirado profundamente. Su comprensión y motivación han sido fundamentales para superar cada obstáculo y continuar con mucho ímpetu.

A mi hermano Daniel, cuyo compromiso y valentía me llenan de orgullo. Sus palabras de ánimo han sido una fuente inagotable de motivación.

A mis amigos y compañeros de la universidad, quienes han compartido conmigo cada etapa de este viaje académico. Agradezco profundamente su amistad, apoyo y compañerismo. Las palabras de aliento, las interminables horas de estudio en conjunto y las risas compartidas.

A todos ustedes, les debo gran parte de mis logros y aprendizajes. Gracias por ser mi fuerza, mi inspiración y mi familia. Los estimo profundamente y valoro cada instante que hemos compartido juntos.

Luis Alfredo Azuero Jaramillo

Agradecimiento

En primer lugar, agradezco a Dios por haberme dado la fuerza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para llevar a cabo este trabajo investigativo. Sin Su guía y bendiciones, no habría sido posible alcanzar este logro.

A mi familia, mi más profundo agradecimiento por su incondicional apoyo, paciencia y amor. Sus palabras de aliento y comprensión han sido fundamentales en cada paso de este camino.

Deseo expresar mi gratitud a los docentes de la Universidad Nacional de Loja por compartir sus conocimientos y brindarme su orientación durante todo este proceso académico. Su vocación y compromiso con la educación han sido una inspiración constante.

Un agradecimiento muy especial al Ing. Christian Campoverde, director de mi Trabajo de Titulación, por su invaluable apoyo y guía. Su experiencia y paciencia han sido cruciales para la realización de este proyecto.

Asimismo, quiero agradecer al Ing. Jonathan González del campus I2tec por su ayuda con las impresiones en 3D. Su colaboración y disposición para asistir en esta parte técnica del trabajo han sido esenciales.

A todos, mi más sincero agradecimiento por haber contribuido a la culminación de este trabajo investigativo. Gracias por creer en mí.

Luis Alfredo Azuero Jaramillo

Índice de contenidos

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenidos	vii
Índice de tablas	x
Índice de figuras.....	xi
Índice de anexos	xiii
1. Título	1
2. Resumen.....	2
Abstract.....	3
3. Introducción	4
4. Marco teórico	6
4.1 Fotosíntesis.....	6
4.1.1 Fase Luminosa	7
4.1.2 Fase Oscura o Ciclo de Calvin	8
4.2 Fundamentos de la Energía Biofotovoltaica (BPV).....	9
4.2.1 Celda de Combustible Microbiana Basada en Plantas (P-MFC)	9
4.2.2 Mecanismos de Transferencia de Electrones	10
4.3 Componentes de la celda Biofotovoltaica (BPV) Basada en PMFC.....	12
4.3.1 Material Fotosensible	12
4.3.2 Electrodo.....	13
4.3.3 Electrolito	14

4.3.4	Tipos de Suelos	15
4.3.5	Membrana de Intercambio de Protones (PEM).....	17
4.3.6	Sustrato (mediadores)	18
4.4	Criterios de Diseño de un PMFC	18
4.4.1	Selección de Electroodos	19
4.4.2	Selección de Membrana de Intercambio de Protones	22
4.4.3	Selección de Configuración PMFC	24
4.5	LEDs	25
4.5.1	Microled.....	25
4.5.2	Led COB	26
4.5.3	Led SMD.....	26
4.5.4	Dip SMD	27
4.6	Supercapacitores	28
4.6.1	Características de los Supercapacitores	29
4.6.2	Tipos de Supercapacitores.....	29
5.	Metodología	31
5.1	Área de estudio.....	31
5.2	Procedimiento	32
5.3	Recursos	34
5.3.1	Recursos Científicos.....	34
5.3.2	Recursos Técnicos.....	35
5.4	Consideraciones Experimentales de Celdas PMFC	35
5.5	Diseño de Celdas PMFC	37
5.5.1	Estructura de Electroodos	40
5.5.2	Cultivo de Musgo	41
5.5.3	Preparación del Suelo con Sustrato.....	43
5.5.4	Propiedades Físicas y Químicas del Suelo.....	44
5.5.5	Electrolito	46
5.6	Diseño del Prototipo de Lámpara LED	46

5.6.1	Voltaje y Corriente de Celdas PMFC	47
5.6.2	Balaceo de celdas PMFC	49
5.6.3	Almacenamiento.....	52
5.6.4	Selección y dimensionamiento de luces LED	53
5.6.5	Diagrama del Circuito Esquemático.....	53
5.7	Construcción E Impresión en 3D.....	54
5.7.1	Diseño y Estructura.....	55
5.7.2	Funcionamiento.....	56
6.	Resultados	57
6.1	Potencia y Corriente Eléctrica Generada	57
6.2	Análisis de Carga entre Supercapacitores y Batería.....	58
6.3	Análisis del Sistema Almacenamiento Híbrido.....	59
7.	Discusión	63
8.	Conclusiones.....	65
9.	Recomendaciones.....	67
10.	Bibliografía.....	68
11.	Anexos.....	75

Índice de tablas:

Tabla 1. Parejas de electrodos para sistemas biofotovoltaicos (BPV).....	20
Tabla 2. Propiedades de los electrodos	22
Tabla 3. Comparación del rendimiento de varias PMFC basadas en membranas a base de arcilla.....	24
Tabla 4. Características de leds SMD	27
Tabla 5. Propiedades físicas y químicas del suelo con compost experimental	45
Tabla 6. Propiedades físicas y químicas del suelo del parque universitario “Francisco Vivar Castro”	45
Tabla 7. Rendimiento de Potencia de cada celda PMFC.....	49
Tabla 8 Balanceo de cargas en celdas PMFC en función de su resistencia interna.....	51

Índice de figuras:

Figura 1. Proceso de la fotosíntesis	6
Figura 2. Fases de la fotosíntesis	7
Figura 3. Ciclo de Calvin.....	8
Figura 4. Diagrama esquemático de una celda de combustible microbiana basada en plantas (PMFC).....	10
Figura 5. Ubicación de cargas positivas y negativas en la superficie de la partícula de arcilla.....	16
Figura 6. Tipos de membranas de arcilla.....	23
Figura 7. Diagrama esquemático Led COB	26
Figura 8. Tipos de LEDs SMD	27
Figura 9. Esquema básico de un supercondensador	28
Figura 10. Representación gráfica de los tipos de supercondensadores	30
Figura 11. Ubicación del centro I2TEC (Investigación Innovación Tecnología)	31
Figura 12. Electrodo de PLA de carbono conductivo.....	36
Figura 13. Electrodo de varilla de carbono con cable coaxial	37
Figura 14. Representación esquemática de la PMFC (Plant-Microbial Fuel Cells)	39
Figura 15. Representación gráfica de electrodos: Ánodo y Cátodo.....	40
Figura 16. Interacción complementaria de cámaras anódica y catódica	41
Figura 17. Ubicación geográfica del Parque Universitario “Francisco Vivar Castro”	42
Figura 18. Dispersión de musgo Polytrichum mediante atomizador a celdas PMFC ...	43
Figura 19. Proceso de compostaje a partir de materia orgánica.....	44
Figura 20. Identificación y valorización individual de las trece celdas PMFC	47
Figura 21. Fotografía de la celda PMFC, voltaje (VOC) y corriente (ISC)	48
Figura 22. Representación gráfica del balanceo de celdas PMFC de arcilla	50
Figura 23. Diagrama esquemático del circuito de iluminación leds	54
Figura 24. Prototipo de lámpara led con energía biofotovoltaica	55
Figura 25. Diseño y modelado 3D con Fusion 360	56
Figura 26. Potencia y corriente eléctrica generada en el transcurso de cinco meses..	57
Figura 27. Relación de tiempo de carga entre supercondensadores y batería.....	59

Figura 28. Sistema de almacenamiento híbrido antes y después del riego.....	60
Figura 29. Voltaje en (OCV) y corriente (ISC) del circuito de 13 celdas PMFC	61
Figura 30. Voltaje y corriente aplicando resistencia externa $100\ \Omega$ al circuito de 13 celdas PMFC.....	62

Índice de anexos:

Anexo 1. Descripción técnica de los materiales utilizados.....	75
Anexo 2. Registro del procedimiento en la construcción de las celdas PMFC.....	78
Anexo 3. Registro del diseño e impresión 3D del prototipo	80
Anexo 4. Certificado de traducción del resumen al idioma inglés.....	82

1. Título

Prototipo de lámpara LED sustentable con energía biofotovoltaica

2. Resumen

El presente trabajo de investigación se centra en el diseño y construcción de una lámpara biofotovoltaica, en el cual se busca explorar la viabilidad y eficiencia de la energía producida por las plantas y microorganismos para encender una lámpara LED. El prototipo integra principalmente celdas PMFC de arcilla con electrodos de carbono, grafito y aluminio. Además, implementa diversas tecnologías de vanguardia como son los supercondensadores, que se destacan por su tiempo de carga ultrarrápido, y luces LED SMD, que brindan una iluminación armoniosa con bajo consumo energético. Sin embargo, el gran desafío de la energía biofotovoltaica son las bajas corrientes de salida, debido a que la energía se obtiene a través de la oxidación de biomasa (exudados) en lugar de recolectar la energía directamente de los fotosistemas. Este último método es más complejo y en la mayoría de los casos perjudica directamente a la especie fotosintética, siendo un área de estudios aún en desarrollo. Los resultados de esta investigación impulsarán a desarrollar nuevas técnicas de recolección de energía biofotovoltaica basadas en el efecto redox, tipo de membrana, posicionamiento y tipo de electrodos, expandiendo así el campo de las energías renovables y sostenibles.

Palabras clave: Biofotovoltaica, BPV, electrodos, PMFC, MFC, redox.

Abstract

The present research work focuses on the design and construction of a biophotovoltaic lamp, which seeks to explore the feasibility and efficiency of the energy produced by plants and microorganisms to light an LED lamp. The prototype mainly integrates clay PMFC cells with carbon, graphite and aluminum electrodes. In addition, it implements several cutting-edge technologies such as super capacitors, which stand out for their ultra-fast charging time, and SMD LED lights, which provide harmonious illumination with low energy consumption. However, the big challenge of biophotovoltaics is the low output currents, because the energy is obtained through the oxidation of biomass (exudates) rather than collecting energy directly from the photosystems. The latter method is more complex and in most cases directly harms the photosynthetic species, being an area of study still under development. The results of this research will encourage the development of new biophotovoltaic energy harvesting techniques based on the Redox effect, type of membrane, positioning and type of electrodes, thus expanding the field of renewable and sustainable energies.

Keywords: Biophotovoltaics, BPV, electrodes, PMFC, MFC, redox.

3. Introducción

El reciente protagonismo de las energías renovables presenta un modelo alternativo, ecológico e innovador en la generación de electricidad a través del biosistema. La energía biofotovoltaica (BPV) resulta novedosa, en comparación con la energía obtenida por dispositivos fotovoltaicos sintéticos basados en silicio, ya que, incorpora células solares biológicas que utilizan las propiedades fotosintéticas de las plantas para convertir la luz en corriente eléctrica.

La energía BPV, mediante el principio de la fotosíntesis, utiliza plantas, algas, musgos, cianobacterias, entre otros microorganismos fotosintéticos, expertos en absorber la energía solar para convertirla en energía química (Durgawati Vishwavidyalya & Kumar Jawre, 2018). Las plantas y los organismos fotosintéticos son recursos naturales que están ampliamente disponibles en todo el mundo y no emiten gases de efecto invernadero en el proceso de generación de energía. Además, la energía eléctrica producida por estas células se puede utilizar directamente para alimentar dispositivos electrónicos o se puede almacenar en baterías para su uso posterior.

Empresas como *Plant-e* y *Bioo* son pioneras en el desarrollo de baterías, sensores, lámparas y paneles que obtienen energía de la descomposición de sustancias orgánicas producidas por las raíces de las plantas tras la fotosíntesis (Marta Sader, 2021). De igual manera, Paolo Bombelli, científico de la Universidad de Cambridge ha conseguido alimentar un microprocesador (Arm Cortex M0+) ampliamente utilizado en aplicaciones de Internet de las cosas mediante algas marinas, agua y luz solar (Bombelli et al., 2022).

El objetivo principal de esta investigación es diseñar y construir un prototipo de lámpara LED sustentable por medio de energía biofotovoltaica. Para alcanzar el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos: primero, realizar una revisión bibliográfica acerca de la energía obtenida por los fotosistemas presentes en las plantas y microorganismos en el proceso de la fotosíntesis; segundo, diseñar y modelar un prototipo de lámpara sustentable haciendo uso de software especializado; por último, construir un prototipo de luminaria sustentable aprovechando el potencial de las células microbianas fotosintéticas del musgo. El prototipo debe ser capaz de conservar y preservar el desarrollo de microorganismos y musgos.

Este proyecto expande una de las aplicaciones de la energía biofotovoltaica, demostrando que es posible alimentar una lámpara LED con la energía producida por exudados de musgos y plantas, impulsando así, otra alternativa viable y sostenible a las fuentes de energía tradicionales. Además, se explorarán las limitaciones y los desafíos que presenta esta forma de energía, con el fin de identificar posibles áreas de mejora e innovación.

En los siguientes capítulos, se abordarán los aspectos teóricos y conceptuales relacionados con la obtención de energía a partir de los fotosistemas y el efecto redox, así como los métodos y procedimientos empleados en el diseño y construcción de las celdas PMFC. Finalmente, se presentarán las conclusiones finales y las recomendaciones para futuras investigaciones en este campo.

4. Marco teórico

La energía biofotovoltaica basada en plantas, documentada también como celdas de combustible microbiana basada en plantas (PMFC) por sus siglas en inglés, es una tecnología innovadora que combina la capacidad natural de las plantas para realizar la fotosíntesis y generar energía con la captura y conversión de esta energía en electricidad utilizable.

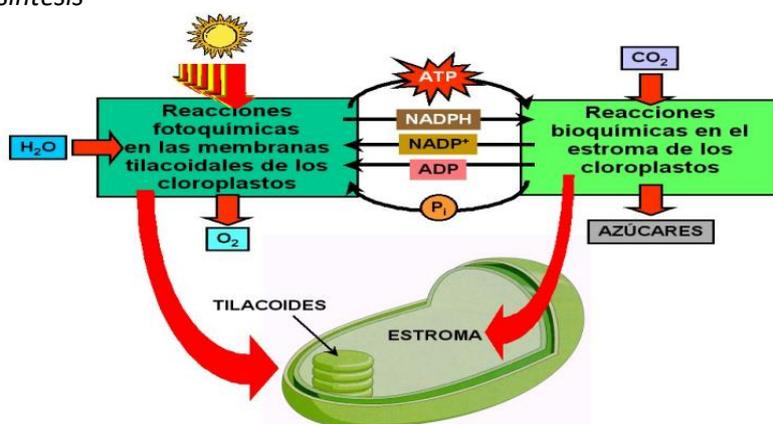
4.1 Fotosíntesis

La fotosíntesis es un proceso físico-químico que ocurre en las células de los organismos fotoautótrofos, como plantas, algas y algunas bacterias fotosintéticas, en el cual la energía de la luz solar se utiliza para convertir dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O) en glucosa y oxígeno como subproducto, este proceso se observa en la Figura 1, y, se entrará a detalle en cada una de sus fases más adelante (Pérez & Carril, 2009).

La fotosíntesis se lleva a cabo en organelos celulares especializados llamados cloroplastos que contienen pigmentos fotosintéticos, estos pigmentos son: clorofila (verde), xantofila (amarillo) y carotenoides (anaranjados), el pigmento más importante es la clorofila debido a que es capaz de absorber la energía de la luz en las longitudes de onda azul y roja. Los pigmentos xantofila y carotenoides actúan como protectores y ayudan a absorber y disipar el exceso de energía luminosa, protegiendo a la planta de posibles daños causados por la sobreexposición a la luz solar intensa (Trudy McKee & James R. McKee, 2014).

Figura 1.

Proceso de la fotosíntesis

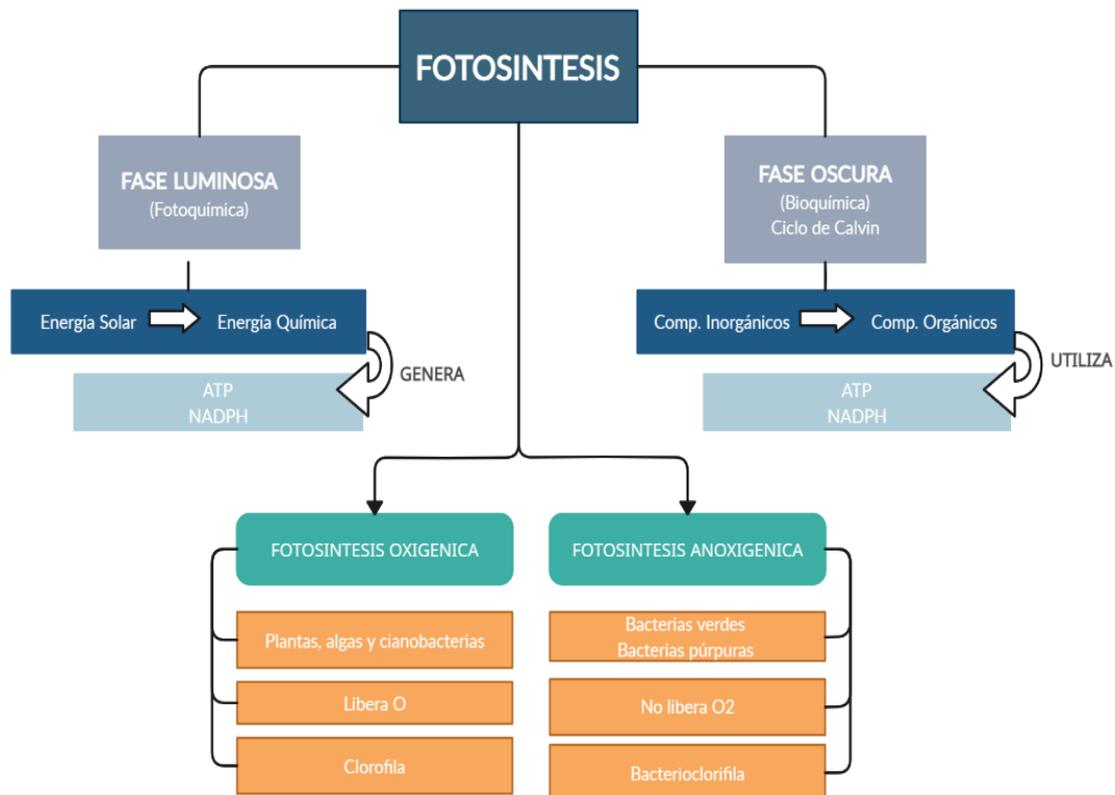


Nota. Adaptado de *Fotosíntesis* (p.4), por Natalia Ocampo Fernández, 2014, UAEH.

Este proceso es uno de los principales procesos anabólicos de la naturaleza, ya que la materia orgánica sintetizada durante la fotosíntesis es responsable de la producción de oxígeno y la captura de dióxido de carbono, regula el clima y mantiene la biosfera en equilibrio (Natalia Ocampo Fernández, 2014).

En la Figura 2, podemos ver de manera simplificada la fotosíntesis, consta de dos fases: una luminosa, denominada también fase fotoquímica, y otra oscura, conocida como fase oscura o ciclo de Calvin. En ellas se produce la transformación no sólo de materia inorgánica en orgánica, sino también de energía lumínica en energía química de enlace.

Figura 2.
Fases de la fotosíntesis



Nota. En la fase luminosa, la energía de la luz solar es capturada por los cloroplastos y se convierte en energía química en forma de ATP y NADPH, mientras que, en la fase oscura, el dióxido de carbono se convierte en glucosa utilizando el ATP y NADPH producidos en la fase luminosa, Fuente. Elaboración Propia.

4.1.1 Fase Luminosa

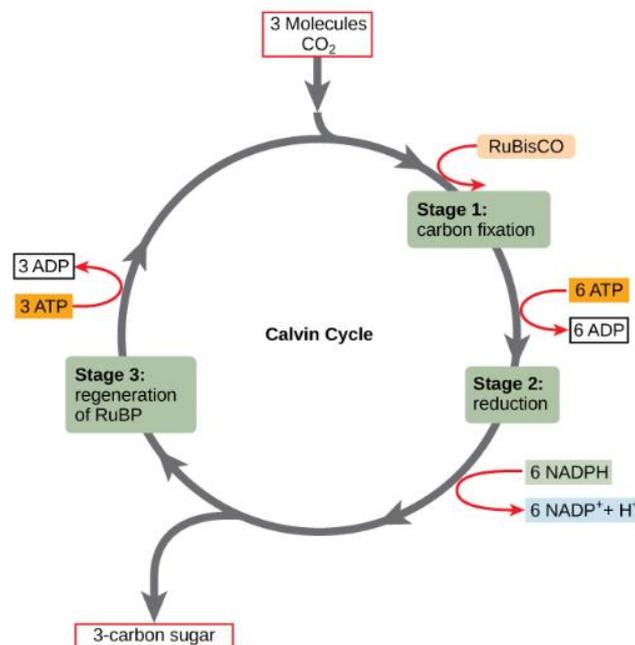
Durante la fase luminosa es en donde se transforma la energía lumínica en química que es usada por todos los seres vivos. Los organismos vegetales son los únicos seres vivos capaces de producir su propio alimento, lo que los convierte en el primer y único eslabón productor de la cadena trófica. Esta fase depende de la presencia de luz, que es capturada por la clorofila presente en los cloroplastos de las células vegetales. La energía lumínica absorbida es utilizada para dividir el agua en oxígeno e hidrógeno. El oxígeno se libera al ambiente y los electrones generados por la división del agua se mueven de un nivel energético a otro, liberando energía que se utiliza para producir la molécula de ATP (trifosfato de adenosina) y

la molécula reductora NADPH (adenin dinocluótido fosfato de nicotinamida reducido). Estas moléculas aportarán la energía química necesaria en la fase siguiente para la transformación del dióxido de carbono (CO_2) en carbohidratos o llamados también hidratos de carbono (Trudy McKee & James R. McKee, 2014).

4.1.2 Fase Oscura o Ciclo de Calvin

La fase oscura de la fotosíntesis se realiza dentro del estroma, la luz ya no es necesaria y las moléculas generadas en la fase luminosa, el ATP y el NADPH, se utilizan para reducir el dióxido de carbono (CO_2) en un conjunto de reacciones conocidas como el “Ciclo de Calvin” como podemos observar en la Figura 3.

Figura 3.
Ciclo de Calvin



Nota: El ciclo de Calvin tiene tres etapas: Etapa 1, Fijación del carbono. Etapa 2, Reducción. Etapa 3, Regeneración. Adaptado de *The Calvin Cycle*, por Fowler Samantha et al., 2017.

Fijación del carbono. La enzima RuBP, también conocida como RuBP carboxilasa/oxigenasa, estimula la reacción en la cual una molécula de dióxido de carbono se combina con una molécula receptora de cinco carbonos, ribulosa-1,5-bisfosfato (RuBP), para producir un compuesto de seis carbonos que se divide para dar lugar a dos moléculas de un compuesto de tres carbonos, ácido 3-fosfoglicérico (3-PGA).

Reducción. En esta etapa, se emplea el ATP y el NADPH para transformar las moléculas de ácido 3-fosfoglicérico (3-PGA) en azúcares de tres carbonos conocidos como gliceraldehído-3-fosfato (G3P). Esta etapa recibe su nombre debido a que el NADPH debe ceder sus electrones o reducir un intermediario de tres carbonos para generar el G3P.

Regeneración. En esta última etapa, solo una parte del G3P se emplea en la síntesis de glucosa, mientras que el resto debe reciclarse para regenerar el aceptor de cinco carbonos, RuBP. Este proceso de regeneración consume ATP y comprende una serie de reacciones complejas.

En resumen, son necesarias seis iteraciones del ciclo de Calvin para asimilar seis átomos de carbono provenientes del CO₂. La realización de estos seis ciclos exige la contribución de 12 moléculas de ATP y 12 moléculas de NADPH en la etapa de reducción, además de 6 moléculas de ATP en la etapa de regeneración. (Fowler Samantha et al., 2017).

4.2 Fundamentos de la Energía Biofotovoltaica (BPV)

Los sistemas biofotovoltaicos (BPV) se sitúan en la intersección de los sistemas fotovoltaicos y bioelectroquímicos, donde la captura o liberación de energía depende de la transferencia de electrones entre diversos intermediarios bioquímicos (McCormick et al., 2015). En los sistemas BPV se pueden obtener dos tipos de corriente eléctrica. El primero es la fotocorriente, que se genera durante el proceso de fotosíntesis utilizando la luz solar como fuente de iluminación. El segundo tipo es la corriente oscura, también conocida como fotocorriente retardada, que se produce en ausencia de luz, donde los microorganismos presentes en las raíces de las plantas utilizan los carbohidratos excedentes producidos durante el proceso de fotosíntesis para la generación de la misma (Sayed et al., 2021). Además, existe la intervención de sustratos orgánicos que son añadidos externamente para impulsar o acelerar la actividad metabólica de los microorganismos.

Las celdas de combustible (FC) que contienen bacterias heterótrofas y son alimentadas por sustratos orgánicos se definen como celdas de combustible microbianas o microbial fuel cell (MFC). En cambio, se denominan sistemas biofotovoltaicos (BPV) o photoMFC a los sistemas fotovoltaicos que generan corriente eléctrica, de forma directa o indirecta, a partir de la energía luminosa capturada por componentes biológicos fotoactivos (McCormick et al., 2015).

4.2.1 Celda de Combustible Microbiana Basada en Plantas (P-MFC)

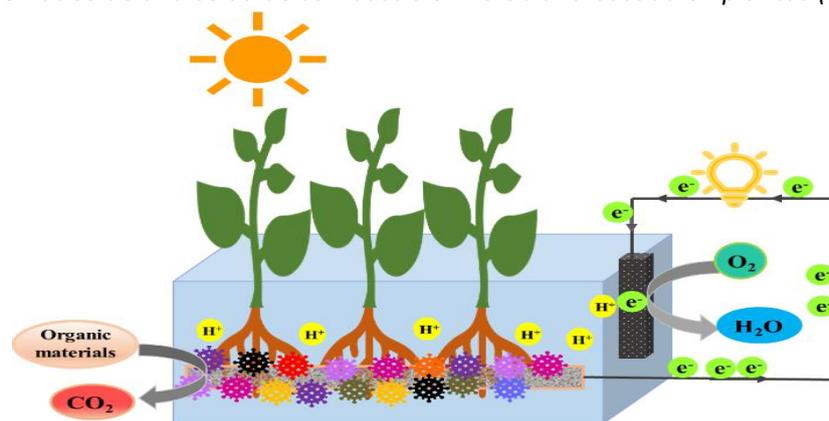
Estas celdas utilizan la interacción entre las raíces de las plantas y las bacterias electroactivas presentes en el suelo para producir electricidad a partir de la desintegración de compuestos orgánicos. En la Figura 4 se ilustra el proceso de fotosíntesis oxigénica, donde las células captan dióxido de carbono del aire circundante de la atmósfera, mientras que el agua

actúa como sustrato en la fotólisis, generando electrones, protones y oxígeno (Anam et al., 2021).

Un sistema MFC (Microbial Fuel Cell) funciona mediante la conversión de energía química en energía eléctrica, gracias a la actividad metabólica de ciertos microbios. La generación de electricidad en las MFC se basa en la oxidación biológica en la región anódica y la reducción de oxígeno en la región catódica. En el ánodo, los microbios funcionan como biocatalizadores, descomponiendo los sustratos y generando electrones y protones a través de la respiración celular (J. Wang et al., 2022).

Figura 4.

Diagrama esquemático de una celda de combustible microbiana basada en plantas (PMFC)



Nota. Adaptado de Progress in plant-based bioelectrochemical systems and their connection with sustainable development goals (p.2), por Sayed et al., 2021.

4.2.2 Mecanismos de Transferencia de Electrones

De manera general, las plantas suministran materia orgánica a los microbios presentes en las raíces en forma de rizodepósitos, que consisten en excreciones, secreciones, material vegetal en descomposición y gases. El colector de corriente anódica se ubica cerca de las raíces de la planta, donde recibe los electrones donados por la materia orgánica a través de las bacterias electroquímicamente activas, generando electricidad como resultado (Sathish-Kumar et al., 2017).

El proceso exacto de mayor influencia se realiza en presencia de la luz solar, donde la energía de los fotones se utiliza para impulsar la separación de carga dentro de los fotosistemas y generar electrones de alta energía, donde solo aquellos electrones que se encuentran excitados son dirigidos por procesos celulares hacia el metabolito NADPH, el cual se utiliza posteriormente para suministrar energía a la fijación de carbono. Mientras que, en ausencia de luz, los nutrientes de carbono almacenados, generados durante los periodos

iluminados, son oxidados por el metabolismo respiratorio de los microorganismos (Anam et al., 2021).

Los mecanismos de transferencia de electrones en las P-MFC también pueden involucrar la respiración microbiana en las bacterias electroactivas y la utilización de enzimas como los citocromos. La transferencia de estos electrones excitados desde las células microbianas en un ánodo a un circuito externo puede ocurrir a través de mecanismos de transferencia directos o indirectos (Sayed et al., 2021).

Transferencia Directa de Electrones (DEET). En la transferencia directa de electrones, los electrones generados por la fotosíntesis en las plantas se transportan directamente a los electrodos sin la necesidad de mediadores químicos adicionales.

La ausencia de mediador ha demostrado proporcionar diversas ventajas electroquímicas, que incluyen: mayores niveles de potencia debido al contacto directo entre las células y el electrodo, así como una reducción en las pérdidas potenciales internas, especialmente en relación a las limitaciones del transporte de masa (McCormick et al., 2011). Sin embargo, hasta la fecha no se ha desarrollado ninguna BPV sin mediador (McCormick et al., 2011). Puesto que, durante un largo periodo de tiempo se consideró que la mayoría de los microbios carecían de capacidad de conducción eléctrica, lo que implicaba que la transmisión de electrones fuera imposible. No obstante, se ha descubierto que la presencia de proteínas de transporte de electrones, como los citocromos, que se encuentran unidas a la membrana celular, posibilita que los electrones se desplacen desde el interior de la celda BPV hacia el exterior. Esta revelación demuestra que los microbios pueden participar en la conducción eléctrica mediante ciertos mecanismos específicos (Phour et al., 2022).

Transferencia Indirecta de Electrones (IET) o Mediada. En la transferencia indirecta de electrones, se utilizan mediadores químicos u orgánicos para facilitar el transporte de electrones desde las plantas a los electrodos. Dicha transferencia puede tener lugar mediante el uso de mediadores que son solubles o insolubles en lípidos y que requieren ser reducidos por proteínas presentes en la membrana citoplasmática o tener la capacidad de oxidar sustratos en las bicapas lipídicas, respectivamente.

Los mediadores endógenos de electrones, como fenazinas, flavinas y quinonas, pueden ser cruciales para la capacidad exoelectrogénica de microorganismos fotosintéticos, ya que algunos microorganismos pueden sintetizar y secretar estos mediadores

biológicamente (Zhu et al., 2023). Además, se pueden agregar mediadores exógenos, como el ferricianuro (McCormick et al., 2015). Aunque se han investigado más de cincuenta especies de microorganismos fotosintéticos en sistemas BPV, aún no hay consenso sobre cuál es la más adecuada o tiene el mejor rendimiento (Zhu et al., 2023).

La capacidad electrogénica de las BPV generalmente depende de los sustratos, las propiedades de los electrodos y las condiciones de operación (J. Wang et al., 2022). Así mismo, de la rizodeposición y la actividad fotosintética de la planta (Nitorisavut & Regmi, 2017).

4.3 Componentes de la celda Biofotovoltaica (BPV) Basada en PMFC

Las celdas biofotovoltaicas (BPV) basadas en celdas de combustible microbiana de plantas (PMFC) están compuestas por varios componentes fundamentales. A continuación, se describen los principales componentes utilizados:

4.3.1 *Material Fotosensible*

Cuando hablamos de material fotosensible se hace referencia al conjunto de microalgas, cianobacterias, musgos, plantas o cualquier otro pigmento fotosintético. En las PMFC, plantas como *Polytrichum* y diversas microalgas se emplean para captar la luz solar y generar electricidad. Por otro parte, las celdas de combustible microbiano tradicionales (MFC) no utilizan directamente la luz solar, pero los microorganismos que las componen pueden ser influenciados por la presencia de luz. Bacterias como *Geobacter* y *Shewanella* contienen componentes fotosensibles que facilitan la transferencia de electrones.

Clorofila y Bacterioclorofila. La clorofila es el pigmento responsable de la captación de luz en las plantas. La clorofila a y b son los principales tipos utilizados en las PMFC. Estos pigmentos son altamente eficientes en la absorción de la luz solar en el rango visible. En cambio, las bacterias fotosintéticas contienen pigmentos fotosintéticos distintos de la clorofila, como la bacterioclorofila que se encuentra en bacterias fotosintéticas, como las bacterias púrpuras y verdes, que no liberan oxígeno (anoxigénicas). Existen varias formas de bacterioclorofila (a, b, c, d, e, f, g), cada una adaptada a diferentes condiciones de luz. Este pigmento absorbe luz en diferentes longitudes de onda, especialmente en el espectro del infrarrojo cercano, permitiendo la fotosíntesis en condiciones de luz baja o en profundidades donde la luz visible es escasa (Zhu et al., 2023).

4.3.2 Electroodos

Ánodo. El ánodo debe tener características específicas para permitir el transporte de electrones a través de un circuito externo, desde el ánodo hasta el cátodo (Nitorisavut & Regmi, 2017). Los ánodos están compuestos por un material conductor como por ejemplo el grafito, que es un material que presenta un buen rendimiento en las celdas de combustible microbianas basadas en plantas (PMFC) debido a su naturaleza no oxidativa, que garantiza una durabilidad a largo plazo, y también proporciona un entorno favorable para el desarrollo de comunidades microbianas cercanas (Pérez Aracelli, 2019).

El ánodo al estar en contacto directo con el electrolito, debe ser compatible químicamente, térmicamente y mecánicamente (Nitorisavut & Regmi, 2017). Aunque la conductividad eléctrica del grafito no es muy alta, es ampliamente utilizada en las aplicaciones de MFC debido a su alta área específica, porosidad y su precio asequible (Pérez Aracelli, 2019). También se debe considerar que una baja conductividad iónica en el ánodo conduce a una alta impedancia, lo cual representa una limitación fundamental para lograr una alta densidad de potencia en un sistema de celdas biofotovoltaicas (BPV) (Anam et al., 2021). En general el ánodo debe de cumplir los siguientes requisitos:

- Conductividad eléctrica: El ánodo debe ser un buen conductor eléctrico para permitir el flujo de corriente generado por los procesos de oxidación o reducción en la celda PMFC.
- Porosidad: El ánodo debe tener una estructura porosa que permita la difusión de los reactivos hacia la superficie activa, facilitando así los procesos electroquímicos y mejorando la eficiencia de la celda.
- Estabilidad química: Debe ser químicamente estable en el entorno electroquímico en el que opera la celda, evitando reacciones no deseadas.
- Baja resistencia eléctrica: El ánodo debe tener una baja resistencia eléctrica para facilitar el flujo de corriente y minimizar las pérdidas de energía en la celda.
- Compatibilidad con el electrolito: El ánodo debe ser compatible con el electrolito utilizado en la celda, tanto desde un punto de vista químico como mecánico, asegurando una interfaz estable y un buen contacto eléctrico.

Cátodo. En el cátodo se reduce el oxígeno a iones de oxígeno (Nitisoravut & Regmi, 2017). La selección del material del cátodo tiene un gran impacto en el rendimiento de la celda PMFC. Se han obtenido buenos resultados al utilizar materiales como ferricianuro, carbono, grafito, aluminio y platino (Pérez Aracelli, 2019). Los catalizadores de platino pueden utilizarse en el cátodo para aumentar la actividad de reducción de oxígeno. Sin embargo, su uso en aplicaciones a gran escala está limitado debido a su alto costo y baja estabilidad (J. Wang et al., 2022). Algunos requerimientos que debe cumplir el cátodo son los siguientes:

- Alta actividad catalítica: El cátodo debe tener una superficie que sea capaz de catalizar la reacción de reducción en la celda. Debe tener materiales o recubrimientos que actúen como catalizadores para facilitar la reacción electroquímica en la interfaz cátodo-electrólito.
- Estabilidad química: Debe ser químicamente estable y resistente a la corrosión en las condiciones de funcionamiento de la celda. Debe mantener su estructura estructural y propiedades catalíticas a lo largo del tiempo.
- Reducción eficiente: El cátodo debe tener una alta eficiencia en la reducción de los compuestos químicos que se encuentran en la celda. Esto implica una alta capacidad para aceptar electrones y participar en reacciones de reducción.
- Buena conductividad eléctrica: El cátodo debe tener una alta conductividad eléctrica para permitir el flujo eficiente de corriente durante el proceso electroquímico.
- Baja porosidad: Es preferible que el cátodo tenga baja porosidad para evitar la pérdida de producto de la reacción y garantizar una alta eficiencia de conversión.

4.3.3 *Electrolito*

El electrolito es un medio líquido o gel que facilita el flujo de iones entre el ánodo y el cátodo. Su función principal es proporcionar los iones necesarios para mantener el equilibrio de carga en la celda BPV. Con el objetivo de mejorar la comunicación electroquímica entre los microorganismos y los electrodos, se ha explorado el uso de hidrogeles conductores de electrones redox. Estos hidrogeles buscan aumentar la eficiencia de transferencia de electrones y mejorar el rendimiento de la celda.

Para una celda biofotovoltaica (BPV), el electrolito ideal debe tener una conductividad suficiente para facilitar el intercambio de iones entre los electrodos y minimizar las resistencias internas. Además, debe mantener un entorno estable para las reacciones electroquímicas deseadas, respaldando así la viabilidad de la celda. Se ha demostrado que la dureza de un pH alcalino puede beneficiarse de las cianobacterias en el proceso de concentración de CO₂, lo cual reduce el costo energético y mejora la acumulación de biomasa en la BPV (Tschörtner et al., 2019).

El electrolito desempeña un papel dual en las celdas bioelectroquímicas. Por un lado, mantiene separadas las reacciones anódicas y catódicas, impidiendo el paso de electrones y gases no deseados. Por otro lado, permite el transporte de iones entre los electrodos, cerrando así el circuito necesario para el funcionamiento de la celda (Asensio et al., 2011).

4.3.4 Tipos de Suelos

La comunidad bacteriana del suelo es influenciada por diversos factores, entre los que se encuentran la estructura y textura del suelo, la disponibilidad de nitrógeno y el pH. La descomposición de la materia orgánica y los componentes inorgánicos del suelo, como el azufre, el ácido húmico y el hierro, también juegan un papel crucial en el potencial redox del suelo, ya que pueden liberar electrones a través de procesos de reducción (Nitorisravut & Regmi, 2017).

La estructura del suelo, que se refiere a la disposición organizada de las partículas primarias como arena, limo y arcilla en forma de agregados, es fundamental para determinar la actividad microbiana. Estos agregados están delimitados por superficies naturales de fragilidad o disyunción, conocidas como superficies de ruptura, que facilitan la circulación del aire y el agua, así como el intercambio de nutrientes. La interacción entre la estructura del suelo y los factores químicos, como el pH y la disponibilidad de nutrientes, crea un ambiente que puede favorecer o inhibir el crecimiento bacteriano, afectando directamente la fertilidad del suelo (Weil & Brady, 2016).

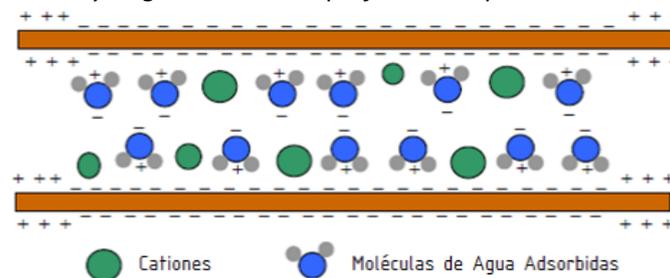
Arcilloso. Los suelos arcillosos se caracterizan por tener una alta proporción de partículas de arcilla, las cuales son pequeñas y tienen una estructura laminar. Estas partículas se forman a través del proceso de meteorización y erosión de rocas que contienen minerales como caolinitas y esmectitas, y su tamaño se sitúa por debajo de los 0,005 mm (Kumari et al., 2021).

La plasticidad de las arcillas está determinada por su tamaño de partícula, geometría y contenido de agua. Cuando las arcillas retienen agua, adquieren una textura maleable y pueden ser moldeadas en diversas formas. Sin embargo, al secarse o ser cocidas, las arcillas se vuelven rígidas y no plásticas. La composición química del material presente en la arcilla afecta su plasticidad y dureza (Kumari et al., 2021).

La estructura laminar de las partículas de arcilla contribuye a una alta superficie específica, que es la suma de todas las superficies expuestas de las partículas en un gramo de material seco. A medida que el tamaño de las partículas disminuye, la superficie específica aumenta significativamente. Esta característica de las arcillas resulta en una importancia considerable de las fuerzas electromagnéticas presentes en su superficie. Las cargas negativas se encuentran en las caras de las láminas de arcilla, mientras que las cargas positivas se ubican en los contornos de las mismas como se muestra en la Figura 5 (Zapata Rodrigo, 2018).

Figura 5.

Ubicación de cargas positivas y negativas en la superficie de la partícula de arcilla.



Nota. Adaptado de *Caracterización de suelos arcillosos*, por Zapata Rodrigo, 2018.

Debido a su alta capacidad de retención de agua, los suelos arcillosos tienden a retener más humedad, lo que puede afectar el drenaje y la aireación del suelo. Los suelos arcillosos pueden presentar una amplia gama de colores, desde el blanco hasta el gris opaco, o desde el marrón hasta el rojo anaranjado intenso, dependiendo del contenido del suelo. Los minerales arcillosos actúan como “esponjas químicas”, ya que tienen la capacidad de retener agua y nutrientes disueltos para las plantas. Estos minerales se componen principalmente de silicatos complejos con iones como aluminio, magnesio y hierro (Kumari et al., 2021).

Arenoso. Los suelos arenosos están compuestos predominantemente por partículas de arena, que representan más del 70 % de su estructura. Estas partículas son de mayor tamaño y tienen una forma redondeada, lo que permite un excelente drenaje debido a los grandes espacios entre ellas. Esta característica facilita el rápido movimiento del agua a través del suelo, reduciendo el riesgo de encharcamiento, pero también resultando en una baja

capacidad de retención de agua y nutrientes. Por esta razón, los suelos arenosos requieren un riego y fertilización más frecuentes para mantener un crecimiento saludable de las plantas. A pesar de esta limitación, los suelos arenosos ofrecen una excelente aireación, lo que beneficia el desarrollo de las raíces. En general, estos suelos son menos fértiles que los suelos arcillosos, pero su facilidad de manejo y la rapidez con que se calientan en la primavera los hacen valiosos para ciertos tipos de cultivos (Isao & Hemanta, 2015).

Humífero. El suelo humífero es rico en materia orgánica, principalmente humus, que resulta de la descomposición de plantas y animales. Esta alta concentración de materia orgánica le confiere una excelente capacidad de retención de agua, manteniendo la humedad durante períodos más largos y proporcionando un entorno óptimo para el crecimiento de las plantas. Los suelos humíferos son extremadamente fértiles debido a que el humus contiene nutrientes esenciales y mejora la estructura del suelo. Esta mejora se traduce en una textura suelta y friable que facilita la penetración de las raíces y la aireación del suelo. Además, la materia orgánica en los suelos humíferos actúa como un agente quelante, ayudando a retener y liberar nutrientes de manera gradual, lo que resulta en un crecimiento vegetal más saludable y sostenido. Estos suelos son ideales para una amplia variedad de cultivos y son especialmente valorados en la agricultura ecológica y sostenible (Hans, 1953).

4.3.5 Membrana de Intercambio de Protones (PEM)

En ciertas celdas biofotovoltaicas (BPV) basadas en celdas de combustible microbiana (MFC), se utiliza una membrana de intercambio de protones (PEM) para separar los compartimentos del ánodo y el cátodo. Esta membrana permite el paso de protones generados en el ánodo hacia el cátodo, manteniendo a los microorganismos y los productos de la reacción separados (Tschörtner et al., 2019).

Utilizar una membrana de intercambio de protones, presenta varias desventajas asociadas, estas incluyen un aumento en la resistencia interna del dispositivo, la posibilidad de ensuciamiento, degradación u obstrucción de la membrana durante un funcionamiento prolongado y su elevado costo. En contraste, se ha demostrado que una configuración sin PEM presenta una menor resistencia interna cuando la distancia entre los electrodos es mayor que el grosor de la zona de interdifusión en una pila de combustible microfluídica (Nitorisavut & Regmi, 2017). Sin embargo, cuando se aplican mediadores electroquímicos, es importante

proteger el electrodo para garantizar que las moléculas interactúen únicamente con el electrodo de trabajo y la biomasa en la configuración (Tschörtner et al., 2019).

4.3.6 *Sustrato (mediadores)*

Los mediadores redox son moléculas que tienen la capacidad de aceptar y liberar electrones de manera repetida, lo que les permite actuar como un puente entre una celda y un electrodo. Estos mediadores pueden ser añadidos externamente al sistema, pero también pueden ser producidos por los propios microorganismos presentes en la rizosfera de las plantas (Tschörtner et al., 2019).

En la producción de energía en celdas de combustible microbiana, el sustrato juega un papel fundamental, ya que es el combustible a partir del cual se genera la energía. En la literatura científica, se han utilizado diversos sustratos que van desde compuestos puros hasta mezclas complejas. En los primeros años, los sustratos simples como la glucosa y el acetato eran muy utilizados, pero en investigaciones más recientes, se ha puesto énfasis en el uso de sustratos menos convencionales, aprovechando la biomasa presente en aguas residuales para su depuración y generación de energía (Revelo et al., 2013).

Los compuestos puros son más fáciles de degradar, lo que permite una mayor generación de energía e hidrógeno. Por ejemplo, algunos estudios han empleado acetato debido a su falta de actividad en procesos microbianos como la fermentación y la metanogénesis. Además del acetato, se han utilizado otros sustratos como la glucosa, la sacarosa, el almidón y el lactato (Revelo et al., 2013). Sin embargo, los sustratos puros suelen ser más costosos debido a los procesos de obtención implicados. Por otro lado, los sustratos complejos idénticos anteriormente, que son subproductos industriales o residuos domésticos, están muy disponibles, son fáciles de obtener y, por lo tanto, más económicos.

4.4 Criterios de Diseño de un PMFC

Un sistema biofotovoltaico (BPV, por sus siglas en inglés) generalmente consta de dos partes: la parte biológica, donde las plantas, algas o cianobacterias realizan la fotosíntesis, y la parte tecnológica, que recoge los electrones producidos por la fotosíntesis y los usa para generar electricidad.

En el marco de este estudio, se diseñó un prototipo de celda BPV llamado PMFC (Plant Microbial Fuel Cell) que se deriva de las controversiales celdas de combustible microbianas (MFC). Aunque existen diversas variantes y configuraciones de celdas BPV, las más comunes

son las PMFC y MFC. Las MFC funcionan exclusivamente con la intervención de microorganismos que descomponen el sustrato en el ánodo, generando electrones y protones. En cambio, las PMFC combinan la acción de plantas y microorganismos (Alshehri & Fitch, 2020).

Estudios realizados por Tay et al. (2022) demuestran que la densidad de potencia máxima obtenida por las PMFC resulta superior que las MFC. A pesar de que este resultado es notable, el autor aclara que no siempre será el caso. Los estudios pueden estar influenciados por variables como el tamaño de la celda, los materiales de los electrodos y los microorganismos utilizados, lo que hace que determinar un promedio sea una tarea compleja.

4.4.1 Selección de Electroodos

El material del electrodo desempeña un papel crucial en la eficiencia y los costos asociados con las pilas de combustible microbianas basadas en plantas (PMFC). Uno de los principales objetivos es mejorar la producción de corriente y asegurar una adecuada adhesión de las bacterias al electrodo, lo que potencia el rendimiento óptimo de las MFC, según Alshehri & Fitch (2020).

Recientes estudios experimentales se han enfocado en potenciar la eficiencia de las celdas BPV, explorando el uso de distintos y novedosos materiales de construcción. Para la selección de los electrodos, tanto ánodo como cátodo, se ha recopilado información basada en características esenciales, como la adhesión bacteriana que refiere a la adaptabilidad con el medio y la transferencia de electrones, que se manifiesta en la densidad de potencia o corriente máxima alcanzada.

El tamaño del ánodo y cátodo es uno de los factores clave en la eficiencia de las MFCs. Agüero-Quiñones et al. (2022) reportaron mejores resultados utilizando placas de electrodos de aluminio de 0,02 cm de espesor y 64 cm² de superficie, logrando obtener valores pico aproximados de 0,22 V, 0,08 mA y 1,05 mS/cm en voltaje, corriente eléctrica y conductividad, respectivamente. Es relevante mencionar que este prototipo de MFC emplea aguas residuales como sustrato. En este contexto, Anam et al. (2021) subrayan que no se puede pasar por alto la influencia del material biológico, ya que factores como el contenido de clorofila pueden variar según las condiciones ambientales, mutaciones, respuestas al estrés y diferencias entre organismos. Por esta razón, los datos presentados en la Tabla 1 no se centran específicamente en diseños o configuraciones particulares de celdas BPV.

El objeto de estudio de la Tabla 1 es ofrecer una referencia sobre la potencia máxima o densidad de corriente que se puede lograr con las celdas BVP, considerando la combinación de pares de electrodos, las especies fotosintéticas tratadas y su configuración, por lo que no fue necesario añadir otras características.

Tabla 1.

Parejas de electrodos para sistemas biofotovoltaicos (BPV)

Ánodo	Cátodo	Especies fotosintéticas o sustratos	Configuración BPV	Potencia máxima o densidad de corriente	Fuente
Zinc	Cobre	Residuos orgánicos de tomate	MFC, sin membrana de una cámara	509 $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$	(Rojas Flores et al., 2020)
Cobre	Zinc	Agua residual	MFC, sin membrana de una cámara	2,02 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 8,871 $\text{mA} \cdot \text{m}^{-2}$	(Prasad & Tripathi, 2017)
Platino	Platino	<i>Spirulina platensis</i>	MFC, sin membrana de una cámara	5 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$	(Fu et al., 2010)
Oro	Grafito de carbono	<i>Spirulina platensis</i>	PMFC (photosynthetic microbial fuel cell)	10 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$	(Lin et al., 2013)
Acero inoxidable	Acero inoxidable	<i>Chlorella vulgaris</i>	PMMFC (photosynthetic microalgae microbial fuel cell)	126 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-3}$	(Bazdar et al., 2018)
Filtro de carbono	Fibra de carbono	<i>Chlorella vulgaris</i>	B-PAMFC (bubbling-type photosynthetic microalgae microbial fuel cell)	1108,9 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-3}$	(Li et al., 2019)
Filtro de grafito	Filtro de grafito	<i>Spartina anglica</i>	PMFC	679 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$	(Wetser et al., 2015)
Escobillas de carbón (cepillo)	Tela de carbono	Estanque de algas	PMFC (Photosynthetic microbial fuel cells)	2,34 $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$	(Yang et al., 2019)
Tela de carbono	Tela de carbono	<i>Chlorella vulgaris</i>	SPMFC (single chamber photosynthetic MFC)	4,06 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$	(C. T. Wang et al., 2018)

Varillas de grafito modificado con polímero redox de osmio	Barra de grafito	<i>Cyanobacterias filamentosas Leptolyngbya sp.</i>	MFCs (microbial fuel cells)	47,2 $\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$	(Hasan et al., 2017)
Tela de carbono	Papel de carbono recubierto de platino	<i>Sodium acetate</i>	MFCs (microbial fuel cells)	49 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 2,5 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-3}$	(Lefebvre et al., 2008)
Escobillas de carbón (cepillo)	Escobillas de carbón (cepillo)	<i>Chlorella sorokiniana + P. erubescens</i>	PMFC (Photosynthetic microbial fuel cells) - three chamber	26,42 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$	(Sarma & Mohanty, 2023b)
ITO (óxido de indio y estaño)	ITO (óxido de indio y estaño) con películas de arcilla	<i>Shewanella oneidensis</i>	MFCs (microbial fuel cells)	1,40 $\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$	(Alshehri & Fitch, 2020)
ITO (óxido de indio y estaño)	Escobillas de carbón (cepillo)	<i>Shewanella loihica</i>	MFCs (microbial fuel cells)	418,8 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$	(Jiang et al., 2018)

Nota. Las configuraciones BPV y los valores de potencia máxima o densidad de corriente varían según los materiales utilizados y las especies fotosintéticas o sustratos empleados. Esta tabla proporciona una comparación detallada de diferentes estudios y sus resultados.

De primera mano, los materiales que han demostrado ser más eficaces son el PET revestido con ITO y el fieltro de grafito. Ambos, al tener superficies planas no porosas, muestran un potencial significativo de éxito en las MFC, según (Anam et al., 2021). Los electrodos de oro, por su parte, ofrecen propiedades estables, tales como una buena conductividad y resistencia a la corrosión (Lin et al., 2013).

El cobre y el zinc destacan por su atractivo precio en comparación con otros materiales, como el plomo, oro, platino y el óxido de indio y estaño (ITO), siendo este último junto con el grafeno los más costosos. Prasad & Tripathi (2017) evidenciaron que el uso conjunto de electrodos de cobre y zinc en una MFC permite una mayor generación de energía en comparación con materiales a base de carbón, como el grafito. Sin embargo, el cobre tiende a erosionarse por oxidación, lo que podría limitar su uso a largo plazo. Por otra parte, estudios realizados con material de acero inoxidable presentan lecturas de corriente y voltaje muy

bajas debido a propiedades antiestáticas y una alta impedancia interna, que impiden la transferencia de electrones (Lin et al., 2013).

El platino también ha sido explorado como material para electrodos debido a su notable capacidad catalítica. Sin embargo, su alto costo, al igual que el del oro y el grafeno, restringe su aplicación a nivel comercial (Sarma & Mohanty, 2019). No obstante, los electrodos de carbono son ampliamente utilizados por su excelente conductividad eléctrica, resistencia química, asequibilidad y compatibilidad biológica (Anam et al., 2021).

Tras este análisis comparativo y de carácter investigativo se ha decidido optar por materiales a base de carbón, como el fieltro de grafito y barras de carbono, complementados con placas de aluminio. Sus características se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2.

Propiedades de los electrodos

Propiedad	Fieltro de Grafito	Barra de Carbono	Aluminio
Conductividad (S/m)	Aprox. $10^4 - 10^5$	Aprox. 10^3	Aprox. $3,5 \times 10^7$
Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Aprox. 10^{-5}	Aprox. 10^{-3}	Aprox. $2,82 \times 10^{-8}$
Ductilidad	Baja	Baja	Alta
Corrosión	Resistente	Moderadamente resistente	Susceptible a la oxidación

Fuente. Elaboración propia.

4.4.2 Selección de Membrana de Intercambio de Protones

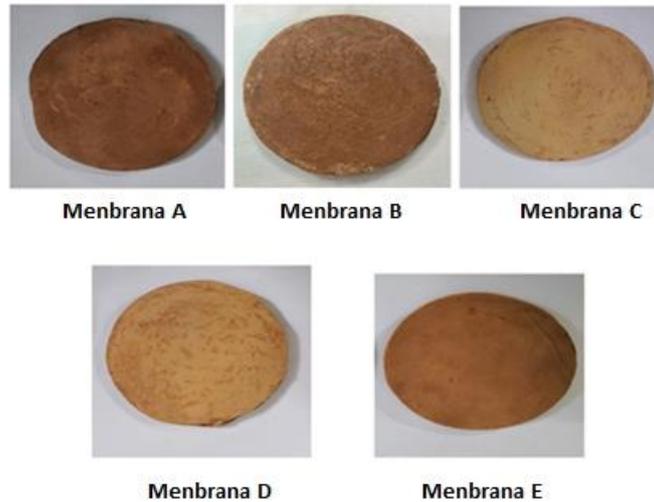
Se optó por el uso del modelo de membrana de intercambio de protones basada en arcilla debido a sus características favorables, como su baja resistencia interna y su conductividad eléctrica en estado húmedo. En una investigación llevada a cabo por Sarma & Mohanty (2023a), se evidenció que la incorporación de bentonita, fly ash, Na_2CO_3 , Na_2SiO_3 y H_3BO_3 a la arcilla potencia la capacidad de transporte de cationes en la membrana. Esta combinación reduce de manera significativa la difusión de oxígeno y, por consiguiente, su resistencia interna.

Por otro lado, Alshehri & Fitch (2020) observaron que, al aumentar el grosor de la película de arcilla con un alto contenido de hierro, la densidad de corriente máxima también se incrementaba. Este hallazgo sugiere que el aumento en la densidad de corriente podría estar asociado a una transferencia de carga facilitada por el hierro. Además, respalda la hipótesis de que la transferencia de electrones se produce a través del ion férrico (Fe^{3+}) presente en la arcilla.

Es común que las arcillas ricas en hierro férrico presenten tonalidades rojizas o amarillentas como se puede ver en la Figura 6. El ion férrico (Fe^{3+}) en la arcilla puede intervenir en reacciones redox, desempeñando el papel de aceptor de electrones bajo determinadas condiciones. En contraste, la materia orgánica en el medio de crecimiento actúa como donante de electrones, según lo señalado por (Sarma & Mohanty, 2023^a)

Figura 6.

Tipos de membranas de arcilla



Nota. Una tonalidad rojiza o amarillenta indica la presencia de óxidos de hierro, calcio, potasio y magnesio; Una tonalidad blanca o grisácea es indicador de una menor cantidad de minerales. Tomado de *Development and comprehensive characterization of low-cost hybrid clay based ceramic membrane for power enhancement in plant based microbial fuel cells (PMFCs)*, por Sarma & Mohanty, 2023a.

En la Tabla 3, se presenta el rendimiento de diversas PMFC que utilizan distintos tipos de membranas de arcilla. Cada una de estas membranas posee características únicas, tales como su contenido mineral y su forma. Al elaborar una celda PMFC, se prioriza la membrana que presenta una baja resistencia interna, como es el caso de la membrana de mezcla de arcilla, seguida de la olla cilíndrica de barro. Es importante destacar que estas membranas tienen un costo de producción significativamente menor en comparación con las membranas de nafion.

Tabla 3.

Comparación del rendimiento de varias PMFC basadas en membranas a base de arcilla

Planta	Membrana	Electrodos	Densidad de potencia máx. ($\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$)	Resistencia interna (Ohm, Ω)
<i>Oriza Sativa</i>	Tubo basado en arcilla	Filtro de grafito	16,8	188
<i>Brassica juncea</i>	Recipiente de mezcla de arcilla (clay, kaolinite, montmorillonite)	Escobilla de carbón (ánodo)	69,32	138
<i>Trigonella foenumgracum</i>		Tela de carbón (cátodo)	80,26	33
<i>Canna stuttgart</i>			222,54	23
<i>Oriza Sativa</i>	Loza de barro	Fibra de carbón	60	
<i>O.ficus-indicaO.</i>	Barra de cerámica	Filtro de grafito(ánodo)	6,60	
<i>joconostleO.</i>		Hoja de zinc(cátodo)	5,76	
<i>robustaO. albicarpa</i>			2,01	
<i>Vetiveria zizaniodes</i>	Olla cilíndrica de barro	Fibra de carbono	68	60
<i>Epipremnum aurium</i>	Membrana cerámica (clay, bentonite, Fly ash)	Escobillas de fibra de carbono	24,56	200

Nota. Esta tabla destaca cómo la combinación de diferentes membranas de arcilla y electrodos afecta el rendimiento de las PMFC. Tomado de *Development and comprehensive characterization of low-cost hybrid clay based ceramic membrane for power enhancement in plant based microbial fuel cells (PMFCs)*, por Sarma & Mohanty, 2023a.

4.4.3 Selección de Configuración PMFC

Para determinar la configuración de la PMFC, consideramos diversos principios que, según investigaciones de varios autores, influyen en el desempeño de estas celdas. Entre estos principios destacan: la distancia entre electrodos, la configuración de la celda y estructura del suelo.

Existen diversas configuraciones de PMFC. Una de las más sencillas es la PMFC de una sola cámara (single chamber PMFC), en la que el ánodo y el cátodo se ubican en el mismo compartimento. A pesar de su simplicidad y menor costo, puede presentar problemas de interferencia entre los procesos anódicos y catódicos. Por otro lado, las PMFC de dos cámaras (Two-chamber PMFC) separan la cámara del ánodo y la del cátodo mediante una única membrana, lo que permite un mayor control de cada proceso y reduce la interferencia entre ambos. Además, Sarma & Mohanty (2023b) mencionan la existencia de PMFC de múltiples

cámaras, diseñadas para tratar diferentes tipos de desechos o para optimizar distintas etapas del proceso.

Sarma & Mohanty (2023b) demostraron que, al posicionar el ánodo entre 2 y 7 cm bajo el suelo, y al acercarlo más a las membranas, se mejora el transporte iónico a través de la membrana. De manera similar, Fu et al. (2010) enfatizaron que cuando la distancia entre los electrodos es menor, tanto el voltaje como la densidad de corriente aumentan.

La presencia de comunidades microbianas en el suelo, cercanas a la rizosfera de la planta y del musgo son fundamentales en las PMFC (Plant-Microbial Fuel Cells), y, diversos factores, como la estructura y textura del suelo, la disponibilidad de nutrientes y el pH del suelo, pueden afectar su composición. Además, la existencia de materia orgánica e inorgánica en el suelo incide en el potencial redox del mismo, aspecto fundamental para la producción de electricidad en las PMFC (Sarma & Mohanty, 2019).

4.5 LEDs

LED son las siglas de Light Emisión Diode, (diodo emisor de luz), son componentes electrónicos constituidos por la unión de materiales semiconductores de diferentes características, capaces de convertir la energía eléctrica directamente en energía luminosa cuando son polarizados por medio de un campo eléctrico. Los sistemas de iluminación LED presentan varias ventajas sobre la iluminación convencional, incluyendo una larga vida útil, bajo consumo energético, y mínima emisión de calor y rayos ultravioleta. Además, no contienen gases ni metales pesados, lo que los hace menos contaminantes en comparación con otras tecnologías de iluminación que utilizan mercurio (Guaman Miguel & Murillo Norman, 2015).

Las lámparas LED destacan por diversas ventajas como el bajo voltaje de operación, larga vida útil, alta eficiencia, bajos costos de mantenimiento, flexibilidad de instalación y ausencia de radiaciones. Existen varios tipos de diodos LED, entre ellos:

4.5.1 *Microled*

Los MicroLED son una tecnología emergente que utiliza diminutos LEDs individuales (de micrómetros) como píxeles. Esta tecnología ofrece alta eficiencia energética y tiempos de respuesta rápidos, características que incluyen alta resolución, mayor brillo, menor consumo de energía y excelente tiempo de respuesta. Los MicroLED se utilizan en pantallas de alta resolución, dispositivos portátiles, y aplicaciones de realidad aumentada y virtual. Aunque

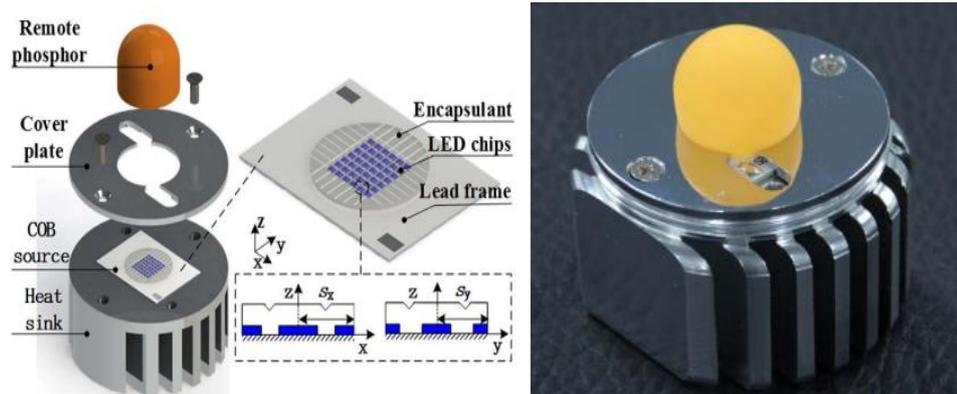
prometen numerosos beneficios, enfrentan desafíos significativos en términos de fabricación y costos, ya que la producción requiere procesos precisos para manejar y colocar millones de microLEDs en sustratos. Sus aplicaciones potenciales abarcan desde dispositivos móviles y televisores de alta gama hasta pantallas de gran formato y dispositivos AR/VR, destacándose por su eficiencia, brillo y durabilidad (Zhang et al., 2023).

4.5.2 Led COB

Los LED COB (Chip on Board) representan una tecnología avanzada en diodos emisores de luz, donde múltiples chips LED se integran en un solo módulo como se ilustra en la Figura 7. Este diseño optimiza la densidad de luz y mejora la gestión térmica en comparación con los LED tradicionales. Son reconocidos por su alta eficiencia, larga vida útil y capacidad para proporcionar una iluminación uniforme, los LED COB ofrecen una relación costo-beneficio favorable. Aunque el costo inicial y los costos de fabricación pueden ser más altos en comparación con otros tipos de LED, los beneficios a largo plazo, como la eficiencia energética y la durabilidad, resultan en ahorros significativos en costos operativos y de mantenimiento. Los LED COB se utilizan ampliamente en diversas aplicaciones, desde iluminación industrial y comercial hasta aplicaciones en automóviles y equipos electrónicos (Zongtao Li et al., 2017).

Figura 7.

Diagrama esquemático Led COB



Nota. Adaptado de *High-efficiency LED COB*, por Zongtao Li et al., 2017.

4.5.3 Led SMD

Los LED SMD (Surface-Mount Device) son diodos emisores de luz instalados directamente en la superficie de un circuito impreso, reconocidos por su alta eficiencia y tamaño compacto. Los LED SMD, como los modelos ilustrados en la Figura 8, proporcionan un flujo luminoso que oscila entre 7 y 30 lúmenes, con una eficiencia que varía entre 50 y 150 lúmenes por vatio. Estos LED son extremadamente versátiles y se utilizan en diversas

aplicaciones, que incluyen la iluminación de fondo, dispositivos electrónicos, señales de tráfico y aplicaciones automotrices. Su diseño permite una gestión térmica superior y una distribución uniforme de la luz, siendo ideales tanto para iluminación continua como intermitente. No obstante, su resistencia al calor varía según el modelo, y las características de los modelos más comerciales se presentan en la Tabla 4 (Lumenetics, 2017).

Figura 8.
Tipos de LEDs SMD



Nota. Adaptado de *Tipos de lámparas LED: SMD y COB*, por Lumenetics, 2017.

Tabla 4.
Características de leds SMD

LED chip	Flujo Luminoso (LM)	Corriente (mA)	Potencia (W)	Área de Disipación Térmica	Ángulo del Haz	Área Emisora (mm)	Grosor (mm)	Eficiencia (LM/W)
2835	28 - 30	60	0,2	Grande	120°	9,18	0,8	130 - 150
3014	10 - 12	30	0,1	Pequeña	100°	3,64	0,8	75 - 95
3528	7 - 8	20	0,06	No	90°	4,5	2,2	50 - 70

Nota. Esta tabla muestra cómo las características físicas y eléctricas de los chips LED afectan su rendimiento y eficiencia. Adaptado de *La Tecnología de Iluminación LED*, por electro, 2015.

4.5.4 Dip SMD

Los LED DIP (Dual In-Line Package) son un tipo básico de LED utilizado principalmente como indicadores visuales en productos electrodomésticos. Estos LEDs son conocidos por su eficiencia energética baja y son populares por su fácil accesibilidad y bajo costo, siendo ideales para estudiantes y practicantes de electrónica. Construidos con un diodo alojado dentro de una cubierta de plástico resistente y transparente, con dos pines de conexión paralelos, los LEDs DIP pueden emitir luz en diferentes tonalidades según el color de la cubierta. Se utilizan

comúnmente en letreros exteriores debido a su durabilidad y resistencia a la intemperie. Estas bombillas tienen una salida de luz baja y son adecuadas para aplicaciones donde la visibilidad limitada y la durabilidad son importantes.

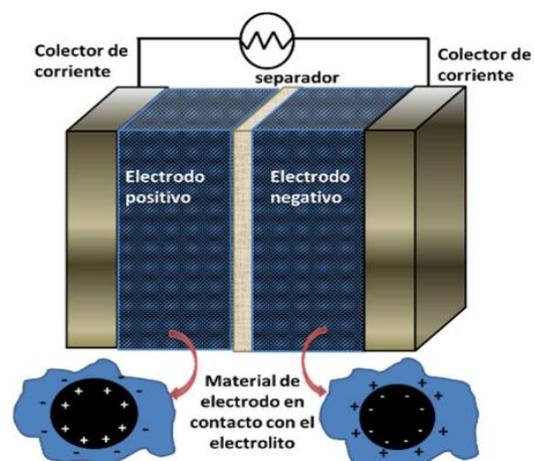
Las bombillas DIP, que suelen ser fabricadas de manera duradera, son resistentes a condiciones adversas y a la intemperie, lo que las hace adecuadas para letreros exteriores y otras aplicaciones donde la resistencia es crucial (Grande, n.d.).

4.6 Supercapacitores

Los supercapacitores (SCs) son dispositivos de almacenamiento de energía que tienen propiedades distintivas como una larga vida útil, alta resistencia y ser amigables con el medio ambiente. Son similares a los capacitores tradicionales, pero utilizan materiales de electrodos con áreas de superficie específicas más altas y dieléctricos más delgados para lograr capacitancias más altas (Jalal et al., 2021).

Figura 9.

Esquema básico de un supercondensador



Nota. Adaptado de Supercondensadores híbridos asimétricos con especies redox inorgánicas, por Díaz, 2016.

El funcionamiento de los supercondensadores se basa en el almacenamiento de carga eléctrica a través de la formación de capas eléctricas dobles en la interfaz electrodo/electrolito como se puede visualizar en la Figura 9. Y, a diferencia de las baterías, que almacenan energía mediante reacciones químicas, los supercapacitores almacenan energía electrostáticamente, lo que permite una carga y descarga más rápida y una mayor vida útil.

En un supercapacitor, la carga eléctrica se almacena en la interfaz entre un electrodo poroso de carbono y una solución electrolítica. Cuando se aplica una diferencia de potencial entre los electrodos, los iones de la solución electrolítica se acumulan en la superficie del electrodo, formando una capa eléctrica doble. Esta acumulación de cargas opuestas en la

interfaz electrodo/electrolito permite almacenar una gran cantidad de energía (Méndez et al., 2020).

El rendimiento de un supercondensador depende de varios factores, incluidos el área superficial del electrodo, la naturaleza del electrolito y la distancia entre los electrodos. Los supercapacitores tienen una densidad de energía de 5-10 Wh/kg, una densidad de potencia de 0.5-20 kW/kg, y una eficiencia coulombica cercana al 100%. También tienen una baja autodescarga y un perfil de descarga inclinado.

4.6.1 Características de los Supercapacitores

- Tiempos de carga/descarga: De milisegundos a segundos.
- Temperatura de operación: De -40°C a 85°C.
- Voltaje de operación: 1V a 5V para electrolitos acuosos y 2-3V para electrolitos orgánicos.
- Capacitancia: De 1mF a más de 10,000F.
- Vida útil de operación: De 5,000 a 50,000 horas.
- Densidad de potencia: De 0.01 a 10 kW/kg.
- Densidad de energía: De 0.05 a 10 Wh/kg.
- Carga de pulso: De 0.1 a 10 A.
- Potencial de contaminación: No contiene metales pesados (Kumar Singh et al., 2021).

4.6.2 Tipos de Supercapacitores

Se describen tres tipos principales de supercapacitores basados en el mecanismo de almacenamiento de energía, en la Figura 10 se puede observar el diagrama esquemático de cada tipo.

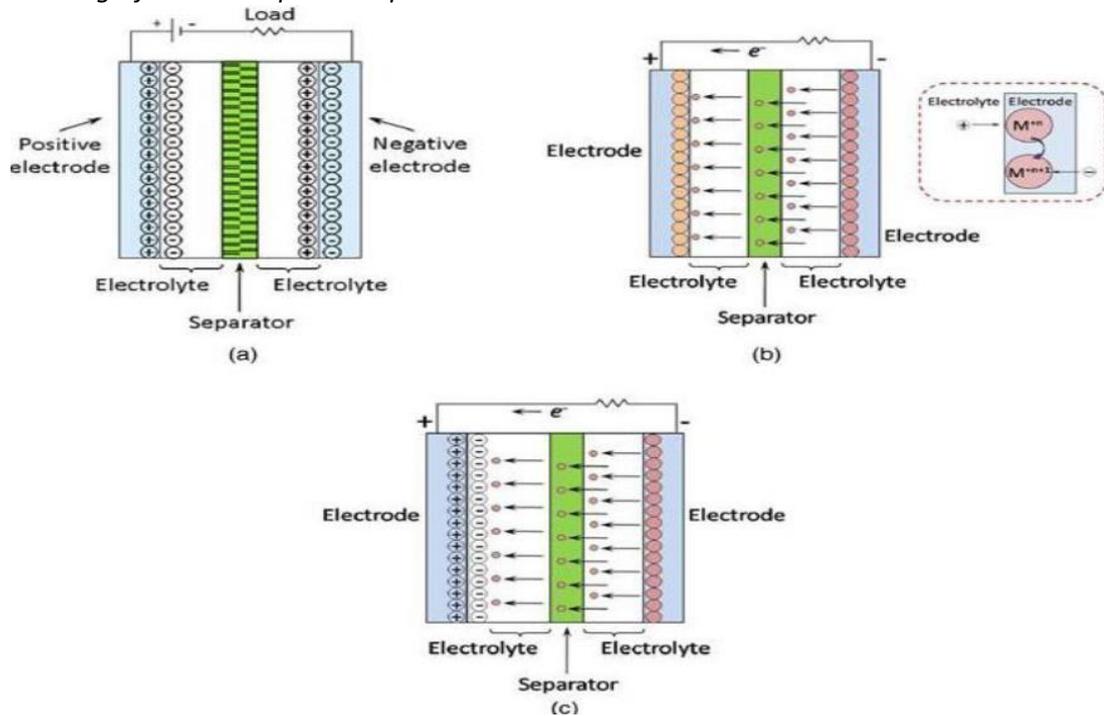
Supercapacitores de Doble Capa Electroquímica (EDLC). Utilizan un electrolito, dos materiales de carbono utilizados como electrodos y un separador. Almacenan cargas electrostáticamente o mediante un proceso no Faradaico que no requiere transferencia de carga entre el electrolito y el electrodo (Kurra & Jiang, 2022).

Supercapacitores Pseudocapacitivos. Utilizan electrodos de óxido metálico o polímero conductor con material de pseudocapacitancia electroquímica alta. El mecanismo de almacenamiento de carga es Faradaico, involucrando reacciones de oxidación-reducción y transferencia de carga entre el electrolito y el electrodo.

Supercapacitores Híbridos. Tienen electrodos asimétricos, uno principalmente electrostático y el otro electroquímico. Combinan las mejores características de los pseudocapacitores y EDLCs en un solo SC (Jalal et al., 2021).

Figura 10.

Representación gráfica de los tipos de supercondensadores



Nota. Diagrama esquemático del almacenamiento de energía de los tipos de SCs: (a) Capacitores de Doble Capa Eléctrica (EDLCs); (b) pseudocapacitores; (c) capacitores híbridos. Adaptado de A review on Supercapacitors: types and components, por Jalal et al. (2021).

5. Metodología

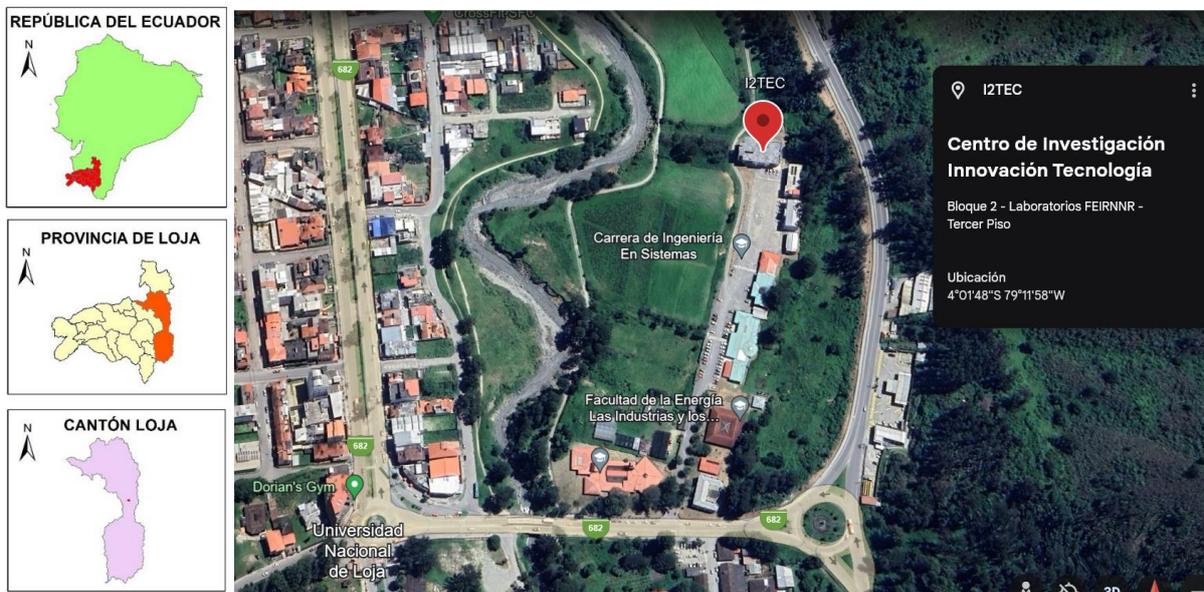
En el siguiente apartado, se detallan los materiales y métodos utilizados para llevar a cabo el presente Trabajo de Titulación. Aquí se menciona el entorno de implementación, el procedimiento general de ejecución, los recursos utilizados y los colaboradores involucrados en el desarrollo del trabajo investigativo.

5.1 Área de estudio

El presente trabajo de Titulación, se desempeñó en el **centro de investigación I²TEC de la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables de la Universidad Nacional de Loja (Ecuador)**, con la colaboración de personal docente enfocado en el área de Energías Renovables y Sostenibilidad Energética. En la Figura 11 se ilustra la información georreferencial del centro de investigación I2TEC.

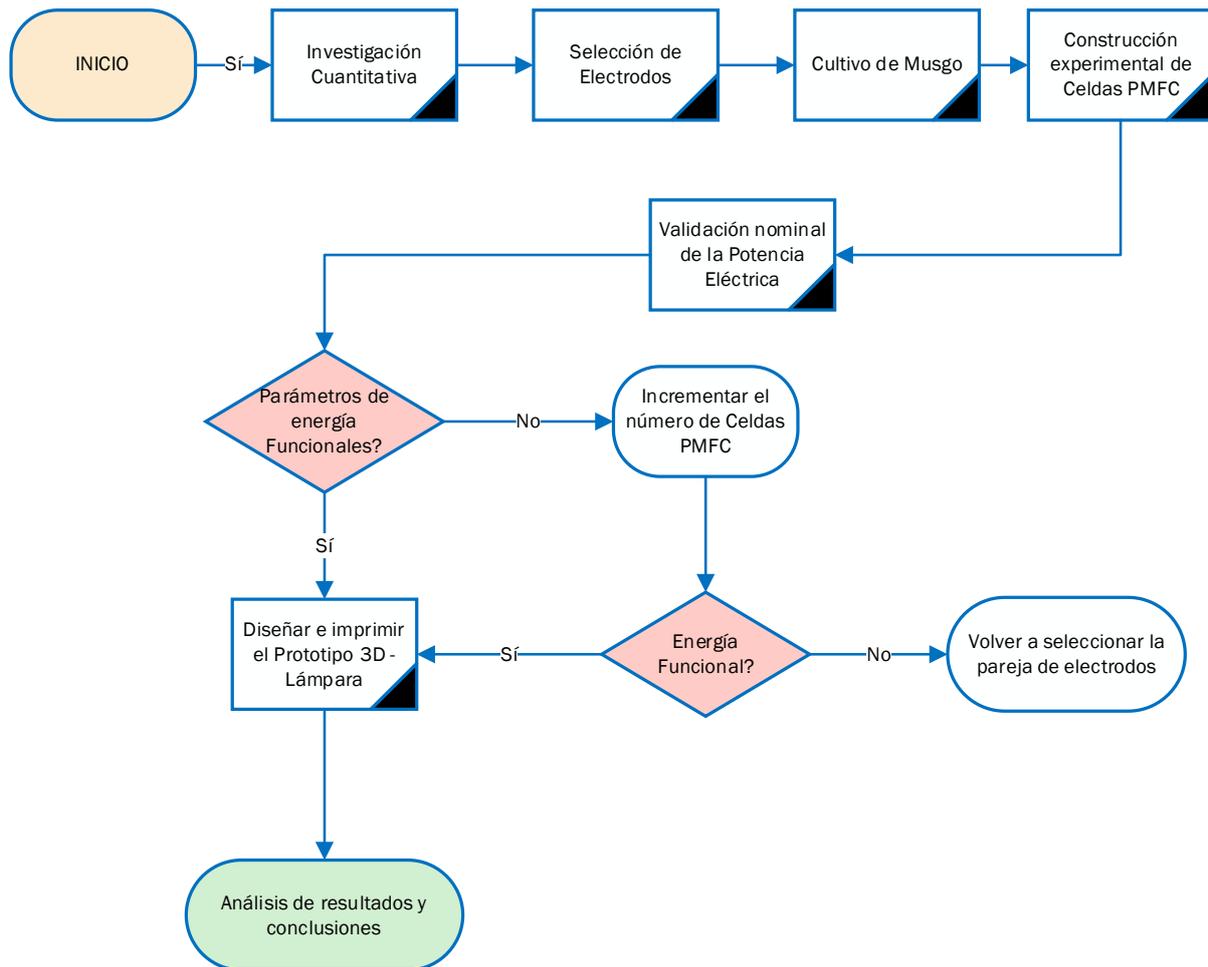
Figura 11.

Ubicación del centro I2TEC (Investigación Innovación Tecnología)



Fuente. Google Earth (2024).

5.2 Procedimiento



Se empleó como referencia metodológica, la investigación cuantitativa, debido a sus características destacables como la recolección y análisis de datos que apoyan a probar hipótesis previamente establecidas. La metodología utilizada en el presente proyecto se divide en tres fases, la primera consiste en la revisión bibliográfica del tema en convenio con las actuales prestaciones que brinda la tecnología biofotovoltaica, la siguiente fase reside en realizar el diseño del sistema, esbozando un número determinado de celdas BPV de musgo conectadas con electrodos de mayor eficiencia que me permitan comprobar las hipótesis mediante el uso de estrategias estadísticas basadas en la medición numérica y finalmente se da paso a la construcción del prototipo de la lámpara con los materiales requeridos.

Fase 1: Revisión bibliográfica acerca de la energía obtenida por los fotosistemas presentes en las plantas y microorganismos en el proceso de la fotosíntesis.

- a. Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura científica y académica relacionada con la energía obtenida mediante la fotosíntesis llevada a cabo en plantas y microorganismos.
- b. Se evaluó los artículos, libros y documentos encontrados para determinar su relevancia y calidad científica, se seleccionó aquellos que aportaban información confiable y actualizada sobre el tema.
- c. Se definieron los criterios de diseño básicos de un sistema biofotovoltaico para la generación de energía eléctrica en relación a las propiedades fotosintéticas y microbianas del musgo y del suelo, respectivamente.

Fase 2: Diseñar y modelar un prototipo de lámpara sustentable haciendo uso de software especializado.

- a. Se seleccionó el software de diseño y modelado 3D adecuado para el tipo de lámpara sustentable que se desea crear. Se consideraron aspectos como la facilidad de uso, las capacidades de simulación y la precisión en el modelado.
- b. Para el diseño, se llevó a cabo el detallado del prototipo de la lámpara sustentable, considerando factores como el tamaño, la forma, los materiales y la integración del sistema biofotovoltaico con las celdas microbianas fotosintéticas del musgo.
- c. Se realizaron los cálculos de energía necesaria para el dimensionamiento y cantidad luces LED con relación a las celdas biofotovoltaicas (BPV).
- d. Se realizaron mediciones para evaluar el desempeño del prototipo en diferentes escenarios, permitiendo de esta manera optimizar su eficiencia y funcionalidad.
- e. Finalmente, se emplearon las herramientas de modelado 3D para ejecutar un diseño estructurado, sencillo y eficiente. Aquí se abordaron tanto las características físicas como la organización de sus componentes.

Fase 3: Construir un prototipo de luminaria sustentable aprovechando el potencial de las células microbianas fotosintéticas del musgo.

- a. Se recolectó los materiales necesarios para la construcción del prototipo, incluyendo las celdas BPV, los componentes electrónicos, circuito esquemático, las estructuras de soporte y los elementos de la lámpara LED.
- b. Se procedió a armar la luminaria, siguiendo el diseño previamente establecido en el objetivo específico 2. Se integraron las celdas BPV de manera adecuada con el sistema de iluminación LED.
- c. Se realizaron pruebas para evaluar el desempeño del prototipo en términos de generación de energía y eficiencia lumínica. Si es necesario, se realizarán ajustes para mejorar su funcionamiento, como la instalación de un sensor PIR o un circuito fotosensible.
- d. Se analizaron los datos obtenidos de las pruebas para evaluar el éxito del prototipo en la obtención de energía a partir de las celdas biofotovoltaicas.

5.3 Recursos

Dentro del contexto del desarrollo, se emplearon los siguientes recursos:

5.3.1 Recursos Científicos

- **Enfoque Cuantitativo:** Según Arturo et al. (2011), una investigación de tipo cuantitativa considera que el conocimiento debe ser objetivo, y que este se genera a partir de un proceso deductivo de cuatro fases como: hipótesis, observación y recolección de datos, análisis estadístico inferencial e interpretación de resultados que prueban hipótesis previamente formuladas. Dado que el desarrollo del presente proyecto implicó el análisis de variables que pueden ser medidas, su enfoque se considera de naturaleza cuantitativa.

- **Método Experimental:**

En la investigación experimental el investigador controla y manipula deliberadamente una o más variables independientes que determinan la aparición del fenómeno, todo ello en un entorno controlado (Diaz Bazo & Gonzáles, 2016). El desarrollo del prototipo de lámpara led, implica manipular variables como los materiales utilizados, el diseño de la lámpara, la integración de especies microbianas y fotosintéticas, entre otros.

- **Estudio del estado del arte:** En el campo científico, el análisis del conocimiento actual es una oportunidad para interactuar con la información en el área de investigación examinando publicaciones similares o vinculadas (Bernal, 2010). Se realizó una búsqueda en bases de datos académicas, bibliotecas digitales, repositorios científicos y revistas científicas como ScienceDirect, ResearchGate MDPI, Taylor & Francis, entre otras. Se emplearon términos de búsqueda relevantes, como “fotosíntesis”, “BPV” “fotosistemas”, “energía en plantas”, “PMFC”, “microorganismos fotosintéticos” y “MFC”.

5.3.2 Recursos Técnicos

- **Herramientas Colaborativas:** Se hizo uso de herramientas colaborativas en línea como: Correo electrónico, Google Drive, WhatsApp, para facilitar una comunicación fluida entre todos los participantes involucrados en el TT.
- **Software de diseño electrónico:** Se utilizó herramientas digitales de diseño y simulación de los dispositivos electrónicos como Tinkercad.
- **Software de modelado 3D:** Se utilizó la herramienta Autodesk Fusion 360 para la elaboración del prototipo estructural en 3D de la lámpara led.
- **Impresora 3D:** Durante la fase de construcción, resultó crucial adquirir la carcasa y estructura personalizada fabricada en plástico mediante tecnología de impresión 3D.

5.4 Consideraciones Experimentales de Celdas PMFC

Se determinó y ejecutó una serie de experimentos iniciales, dentro de ellos la combinación de pareja de electrodos con materiales conductores que se encuentran ampliamente al alcance de todos.

Comúnmente, tenemos el uso del cobre y zinc, los cuales en un principio presentaron ventajas significativas a corto plazo, generando tensiones entre 0,6 – 1,1 volts. No obstante, el zinc tiende a corroerse rápidamente limitando su vida. Así mismo, el cobre, aunque un poco más lento, termina de igual forma por degradarse además de afectar seriamente la formación de biopelículas microbianas debido a su toxicidad.

Posteriormente, se exploró el uso del filamento PLA conductivo de carbono Figura 12, con la intención de realizar el diseño de la maceta e imprimirla en impresora 3D. Sin embargo, debido a la naturaleza del filamento y a pesar de las múltiples calibraciones y configuraciones

de la impresora, el prototipo no se imprimió correctamente, dañando frecuentemente los obstructores por lo que, se decidió abortar la impresión.

Figura 12.

Electrodo de PLA de carbono conductivo



(a)



(b)



(c)

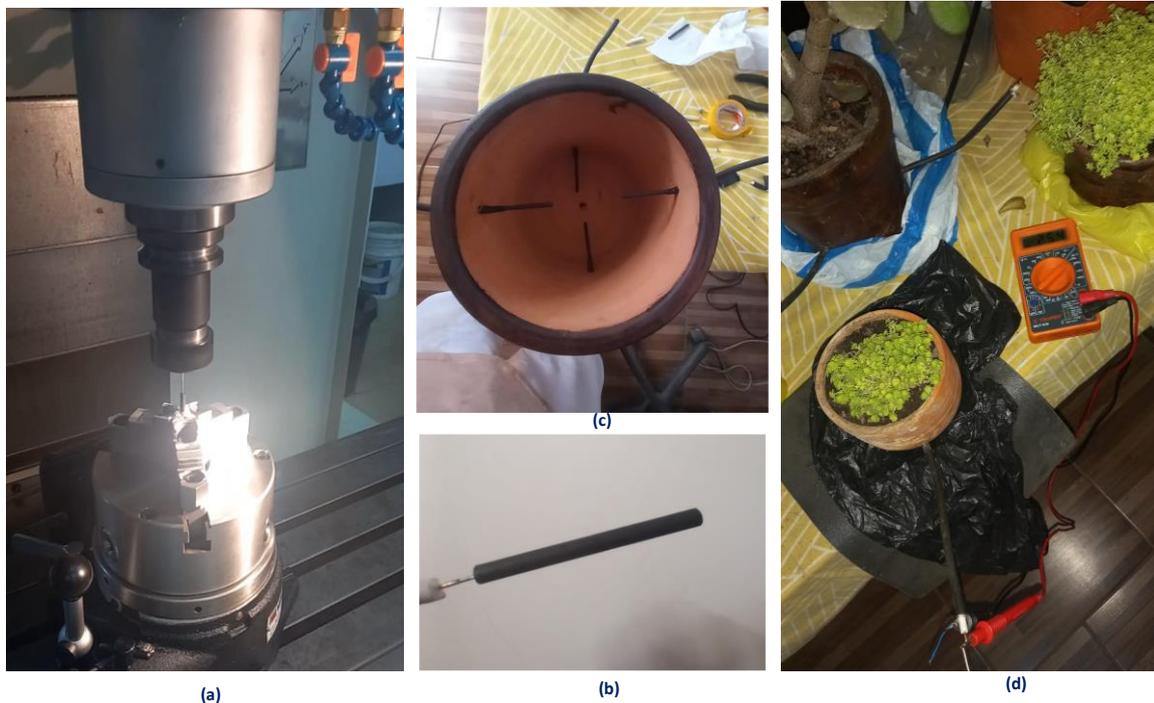
Nota. Reemplazo de obstructores de impresora 3D dañados (a), impresión fallida con PLA conductivo de carbono (b), y segunda impresión fallida (c). Fuente. Elaboración propia.

Testeando aún más el carbono, se emplea electrodos con varillas de carbono. Su construcción se llevó a cabo mediante el uso de un cable coaxial y una pequeña perforación de la varilla de carbono, como se visualiza en la Figura 13a. Los electrodos de carbono son

generalmente biocompatibles, lo que significa que no afectan negativamente a las comunidades microbianas como el zinc. Además, son más estables y resistentes a la corrosión. Los valores de voltaje obtenidos mostrados en la Figura 13d, fueron notablemente bajos, del orden de los 200 a 400 mV. El análisis de estos resultados implica continuar rebuscando la combinación de electrodos.

Figura 13.

Electrodo de varilla de carbono con cable coaxial



Nota. Perforación de varilla de carbono con fresadora CNC (a), electrodo de carbono con cable coaxial (b), celda PMFC con 4 electrodos de carbono (c), y voltaje de 0,3V PMFC (d). Fuente. Elaboración propia.

Debido a ello y a la estructura del cable coaxial, se decidió utilizar directamente el recubrimiento externo fabricado de malla de aluminio como cátodo y el cable de cobre insertado dentro de la varilla de carbono como ánodo. Esta configuración permitió obtener tensiones que oscilaban entre 0.9 y 1.1 voltios, identificando claramente la combinación de electrodos de carbono y aluminio como la más prometedora.

5.5 Diseño de Celdas PMFC

Para el diseño de las celdas, se han empleado dos especies vegetales fotosintéticas: el musgo *Polytrichum* y la planta *Crassulaceae*, conocida comúnmente como “patas de rana”. Debido a la presencia de estas dos especies diferentes, se utilizan suelos distintos para cada una; el musgo *Polytrichum* requiere un ambiente de alta humedad para su supervivencia,

mientras que la *Crassulaceae* necesita condiciones de suelo menos húmedas. Los microorganismos y minerales presentes en cada suelo también varían considerablemente.

Este diseño aprovecha una relación de simbiosis comensal entre los microorganismos y la planta *Crassulaceae*, utilizando los exudados de la planta como fuente de nutrientes. Al mismo tiempo, se establece una simbiosis mutualista entre el musgo *Polytrichum* y microorganismos (cianobacterias), donde los microorganismos juegan un papel crucial en la fijación de nitrógeno y fósforo, haciendo estos nutrientes disponibles para la planta y el musgo. En estudios sobre la eficiencia de las celdas microbianas, se ha observado que los musgos como *Polytrichum* pueden formar biopelículas con bacterias electrogénicas que facilitan la transferencia de electrones. Esta relación es esencial en aplicaciones bioelectroquímicas, donde el musgo actúa como un medio para el crecimiento y establecimiento de microorganismos generadores de electricidad (Carmen et al., 2017).

Para este estudio, se diseñaron y ensamblaron trece celdas PMFC de doble cámara catódica, utilizando membranas de intercambio de cationes hechas de arcilla. Los electrodos de grafito, carbono y aluminio se colocaron en vasijas de arcilla, tema que se detallará en la sección de *estructura de electrodos*. Posteriormente, se llenaron aproximadamente dos tercios de las macetas de arcilla con tierra franco arenosa arcillosa recolectada del parque PUEAR de la UNL, sobre la cual se germinó el musgo *Polytrichum*, como se ilustra en la Figura 14a.

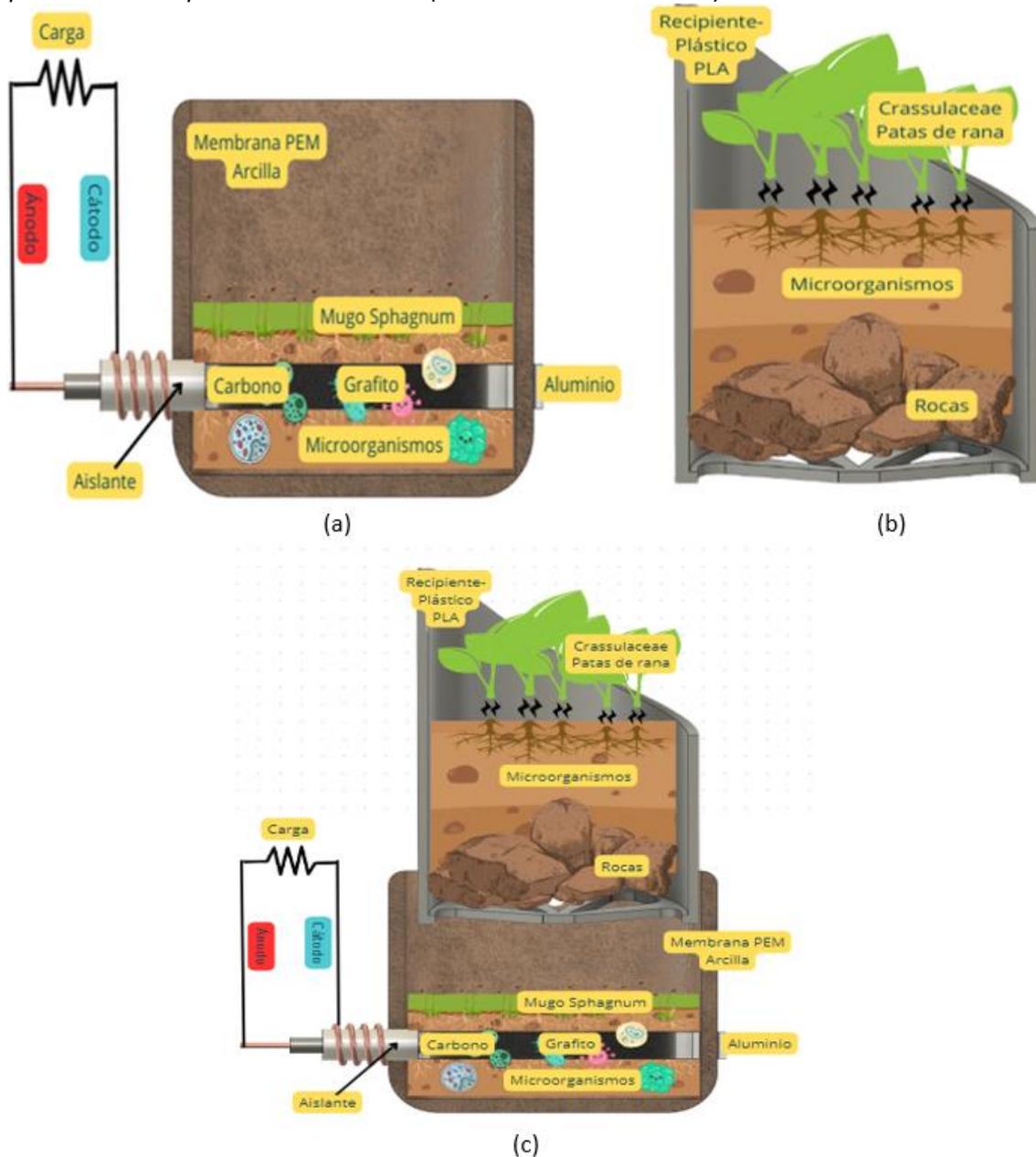
Por otro lado, la planta *Crassulaceae* “patas de rana”, que actúa como captadora de energía lumínica, se plantó en un suelo humífero (preparado con sustrato). Para este propósito, se utilizaron trece recipientes impresos en plástico PLA mediante una impresora 3D, como se muestra en la Figura 14b, estos recipientes permiten un filtrado eficaz y el flujo de agua hacia las celdas de arcilla PMFC situadas en la parte inferior.

En la figura 14c, se proporciona una visión completa del diseño y disposición de las celdas, incluyendo tanto las de arcilla como las de plástico PLA, y su integración en el proceso de generación de energía. Cada celda de arcilla tiene aproximadamente 10 cm de alto y 10 cm de diámetro, lo que facilita una interacción eficiente entre los componentes bióticos y abióticos. Entre estos componentes destacan las EAMs (bacterias exoelectrogénicas presentes en el suelo), que juegan un papel fundamental en el proceso de generación de energía. Estas bacterias se encargan de metabolizar la materia orgánica, liberando protones y electrones.

Los protones atraviesan la membrana PEM de arcilla hacia la cámara catódica, donde ocurre una reacción de reducción de oxígeno, mientras que los electrones viajan desde el ánodo a través de un circuito externo hacia el cátodo, generando electricidad. Este diseño restringe la pérdida de oxígeno proveniente de las raíces, favoreciendo el desarrollo de la biopelícula bacteriana, como se menciona en (Sarma & Mohanty, 2023b).

Figura 14.

Representación esquemática de la PMFC (Plant-Microbial Fuel Cells)



Nota. Este diseño PMFC aprovecha al máximo las dos fases de la fotosíntesis y, al contar con una cámara catódica doble, reduce las moléculas de oxígeno tanto del agua como del aire.

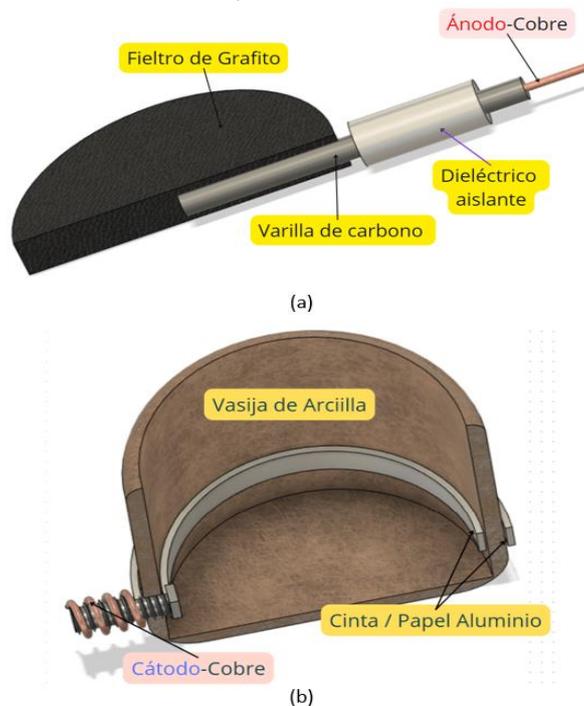
Fuente. Elaboración propia.

5.5.1 Estructura de Electroodos

Al ser el ánodo el electrodo donde ocurre el proceso de oxidación, es decir, donde los microorganismos oxidan la materia orgánica y liberan electrones y protones. Es importante que tenga una alta área para capturar electrones, una buena conductividad eléctrica y una superficie que permita la adhesión de los microorganismos. Para garantizar estas características, se ha recubierto el hilo de cobre, que actúa como ánodo con varilla de carbono Eisco Labs de 5 cm de largo y 4 mm de diámetro, junto con el fieltro de grafito de 5mm de espesor y 8 cm de diámetro como se muestra en la Figura 15a.

En la cámara del electrodo cátodo, se utilizó cinta de aluminio de 0,12 mm de espesor y 2 cm de ancho, junto con cinta de aluminio, recubriendo tanto el interior como el exterior de la vasija de arcilla, como se observa en la Figura 15b. Este diseño, en complemento con el ánodo previamente descrito, forma una celda PMFC de dos cámaras. Aunque, en la mayoría de los casos, el cátodo suele estar expuesto directamente al aire o sumergido en agua, en este diseño particular, el cátodo se encuentra en sectores compartidos aire-agua para promover la reducción del aceptor de electrones, como lo son el oxígeno y el agua.

Figura 15.
Representación gráfica de electrodos: Ánodo y Cátodo



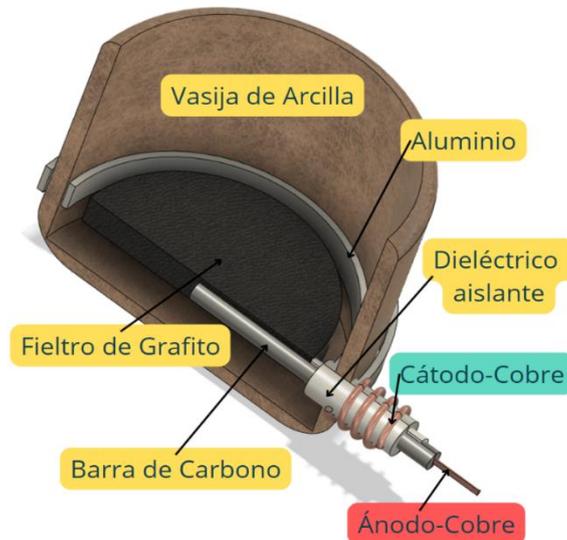
Nota. Esquema de la sección transversal del ánodo (a), y cámara catódica (b).
Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 16, se muestra la ubicación del ánodo y el cátodo separados por una distancia próxima de 0,8 cm, con el fin de disminuir la resistencia interna de la celda. No

obstante, tal distancia puede conducir a interferencias e inversión de tensión, razón por la cual se empleó un diodo shockley al final de la conexión total de las celdas. Con este arreglo se pretende optimizar el rendimiento de la celda, garantizando una correcta adherencia del cátodo a la celda y promoviendo una correcta transferencia de electrones.

Figura 16.

Interacción complementaria de cámaras anódica y catódica

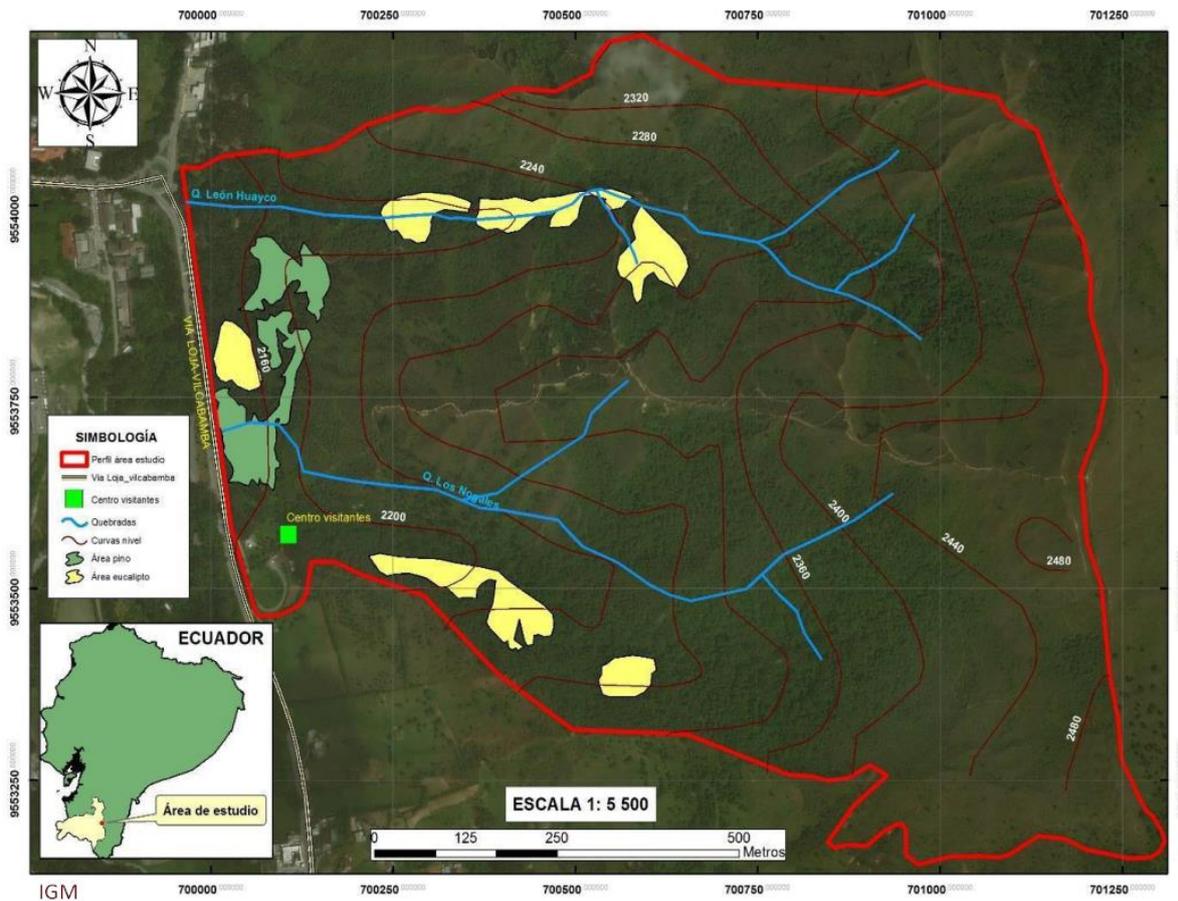


Nota. Posición de los electrodos en la PMFC. Fuente. Elaboración propia.

5.5.2 Cultivo de Musgo

Se cultivó la especie de musgo *Polytrichum juniperinum* perteneciente al grupo de las *Bryophytas*. Dentro de este grupo, los musgos representan más de 12,000 especies a nivel mundial (Villalobos Fabricio & Dáttilo Wesley, 2020). Se aplicó el método de reproducción asexual conocido como fragmentación, en el cual partes de la especie se separan para desarrollar nuevos individuos completos (Goffinet Bernard & Shaw Jonathan A., 2008). La especie fue recolectada del parque universitario de educación ambiental y recreacional “Ing. Francisco Vivar Castro” Figura 17, de la Universidad Nacional de Loja ubicado 5 km al sur del centro de la ciudad de Loja (Muñoz et al., 2022).

Figura 17.
Ubicación geográfica del Parque Universitario “Francisco Vivar Castro”



Nota. Tomado de Dinámica sucesional de la vegetación natural bajo plantaciones forestales de *Pinus sp.* y *Eucalyptus globulus Labill.*, en el parque universitario “Francisco Vivar Castro”, Loja, por E. Díaz, 2019.

Los cultivos se prepararon mezclando 250 gramos de musgo *Polytrichum* en un vaso de licuadora con 1 litro de agua, y se dispersó con ayuda de un atomizador sobre cada celda de arcilla dos veces al día durante dos semanas como se ilustra en la Figura 18. Los cultivos se mantuvieron a una temperatura ambiente de aproximadamente 28,8 °C, durante doce semanas. Es esencial que los cultivos tengan un periodo de luz-oscuridad adecuado para su crecimiento. Se reveló que un ciclo de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad es el ideal para maximizar la productividad de las PMFC sin generar estrés operativo en la especie (Sarma & Mohanty, 2023b).

Figura 18.

Dispersión de musgo Polytrichum mediante atomizador a celdas PMFC



Fuente. Elaboración propia.

El riego en cada celda, se lo hizo mediante una jeringuilla hipodérmica de 20 cm³ de acuerdo a la capacidad de absorción del musgo, es la cantidad de agua adecuada para mantener húmedo el musgo, es importante mencionar que el riego se lo hizo dos veces por semana (Aldaz & Ochoa, 2011).

5.5.3 Preparación del Suelo con Sustrato

Para asegurar el desarrollo óptimo de la especie Crassulaceae, es esencial proporcionar un sustrato rico en nutrientes y minerales. Con este propósito, se elaboró un compost utilizando residuos orgánicos como cáscaras de huevo, cáscaras de naranja, cebolla, plátano, papa y tomate. Estos residuos son ricos en carbono, zinc, fósforo entre otros nutrientes, lo que los convierte en un sustrato ideal para fomentar la actividad microbiana (Sarma & Mohanty, 2019).

El proceso de compostaje comenzó con la recolección y mezcla de los residuos orgánicos antes mencionados en un balde de 20 litros de capacidad. Esta mezcla se enterró durante doce semanas para acelerar la descomposición como se muestra en la Figura 19.

Durante este período, los microorganismos presentes en el suelo descomponen la materia orgánica, transformándola en compost (Alshehri & Fitch, 2020).

Figura 19.

Proceso de compostaje a partir de materia orgánica



Fuente. Elaboración propia.

El uso de compost como sustrato en las PMFC presenta múltiples ventajas. Primordialmente, el compost, al ser una fuente abundante y diversa de materia orgánica, proporciona un alimento rico y variado para los microorganismos en la rizosfera de las plantas promoviendo una comunidad microbiana diversa y activa (Sarma & Mohanty, 2019). Además, el compost mejora significativamente la estructura del suelo, aumentando su porosidad y capacidad de retención de agua, lo que facilita el transporte de electrones y nutrientes. También optimiza el pH del suelo, creando un ambiente más favorable para la actividad microbiana y, por ende, para la operación óptima de las PMFC (Alshehri & Fitch, 2020). La mejora en la estructura del suelo y la capacidad de retención de agua son cruciales para asegurar que los microorganismos tengan un entorno estable y nutritivo, lo que resulta en estabilidad y eficacia a largo plazo de la PMFC.

5.5.4 Propiedades Físicas y Químicas del Suelo

La Tabla 5 muestra las propiedades químicas del suelo tratado con compost, derivadas de un compost experimental elaborado con residuos orgánicos similares a los previamente mencionados, tales como cáscaras de huevo, cebolla, plátano, papa y tomate, entre otros. Estas propiedades reflejan la composición nutricional del compost y su influencia en la calidad del suelo.

Tabla 5.*Propiedades físicas y químicas del suelo con compost experimental*

Propiedades del suelo	Suelo con Compost
Materia orgánica total	51,20 %
pH	7,32
Nitrógeno total	3,12 %
Relación C/N	9,52
Fósforo	0,85 %
Calcio	1,85 %
Magnesio	2,05 %
Sodio	0,76 %
Potasio	1,10%

Nota. Esta tabla ilustra el impacto del compost en el suelo, mostrando un aumento significativo en la materia orgánica, mejorando así su fertilidad y equilibrio químico. Tomado de *Análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo tras la adición de compost procedente de RSU*, por Paz-González, 2008.

Para el suelo recolectado del Parque Universitario de Educación Ambiental y Recreacional “Ing. Francisco Vivar Castro”, conocido como PUEAR, el análisis de las propiedades físicas y químicas fue realizado por (Ruiz, 2020) en el laboratorio de Suelos, Aguas y Bromatología de la Facultad Agropecuaria y Recursos Naturales Renovables de la UNL. En la Tabla 6 se expresa el contenido de Materia orgánica, pH, Nitrógeno, Potasio, Calcio, Magnesio, Manganeso, Cobre y Hierro.

Tabla 6.*Propiedades físicas y químicas del suelo del parque universitario “Francisco Vivar Castro”*

Propiedades y características del suelo	Bosque nativo	Representación
pH	6,28	Ligeramente ácido
MO (%)	7,42	Alto
Nitrógeno (N) ppm	160,56	Alto
Potasio (K) ppm	417,54	Alto
Calcio (Ca) meq/100ml	8,06	Alto
Magnesio (Mg) meq/100ml	3,07	Alto
Manganeso (Mn) ppm	26,74	Alto
Hierro (Fe) ppm	395,26	Alto
Cobre (Cu) ppm	1,66	Medio

Nota. Esta tabla destaca la composición del suelo y su fertilidad en el bosque nativo. Adaptado de *Influencia del tipo de suelo sobre el crecimiento diamétrico anual de Juglans neotropica Diels y*

Eriotheca ruizii (K. Shum.) A. Robyns en los sectores del Parque Universitario Francisco Vivar Castro y la Reserva El Chilco, al sur de Ecuador, por (Ruiz, 2020).

Este suelo es ligeramente ácido, con alto contenido de materia orgánica que indica gran cantidad de carbono presente, su textura es franco arcillosa y arenosa (FoAcAo). Los valores de nutrientes como N, K, Ca, Mg, Mn y Fe varían de medios a altos, revelando una alta conductividad iónica y presumiblemente una alta conductividad eléctrica.

5.5.5 Electrolito

El electrolito empleado directamente es el agua, utilizado para regar las plantas *Crassulaceae*. Esta agua se mezcla con las sales disponibles en el suelo como el NaCl (cloruro de sodio), K₂SO₄ (sulfato de potasio) y CaCl₂ (cloruro de calcio), creando una solución altamente efectiva para mejorar la conductividad iónica. Estas sales son componentes comunes en muchos tipos de suelo y su presencia producen un electrolito que facilita la transferencia de protones y electrones, optimizando la generación de energía en las celdas PMFC donde se encuentra el musgo. Utilizar sales naturales del suelo para generar energía bioelectroquímica puede integrarse de manera armoniosa con prácticas agrícolas y de gestión del suelo, fomentando un enfoque holístico y sostenible para el manejo de recursos naturales.

5.6 Diseño del Prototipo de Lámpara LED

Para diseñar la lámpara LED, primero es necesario medir y estimar la potencia generada por cada celda PMFC. Para ello se identifica cada celda desde la C1 hasta C13 como se ilustra en la Figura 20. Esto permite asignar y dimensionar adecuadamente el tipo de luces LED y un sistema de almacenamiento eficiente.

Figura 20.

Identificación y valoración individual de las trece celdas PMFC

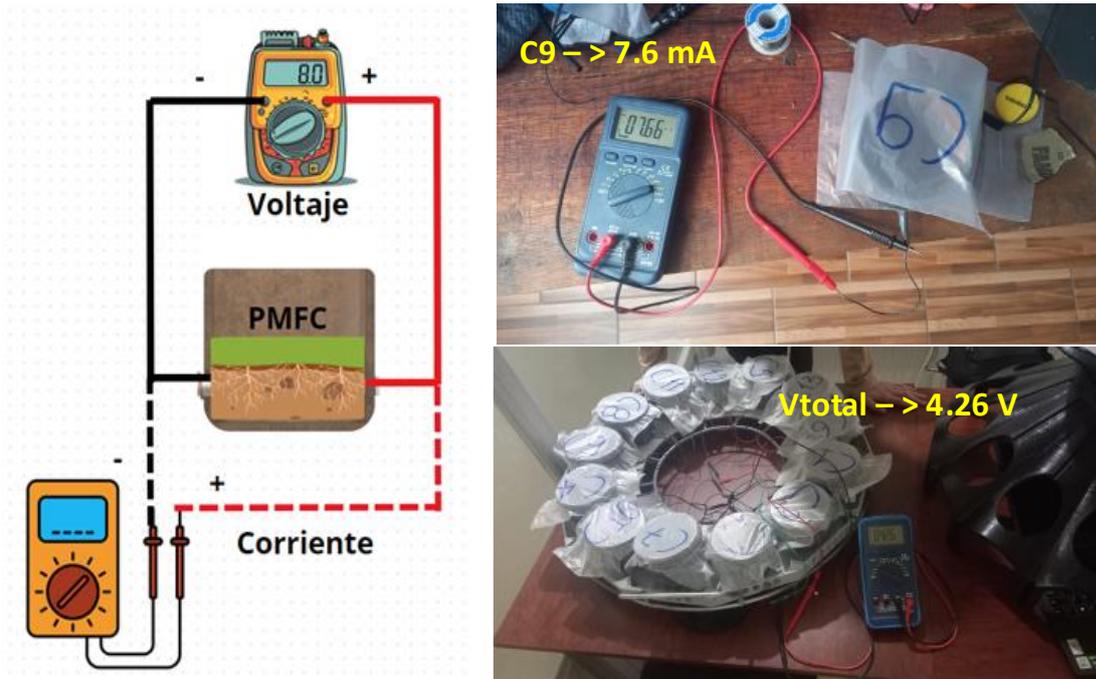


Fuente. Elaboración propia.

5.6.1 Voltaje y Corriente de Celdas PMFC

Para evaluar la producción máxima de voltaje de cada celda PMFC se aplicó el método de circuito abierto (OCV), el cual consiste en conectar directamente los terminales del multímetro a la celda sin conectar ninguna carga en el circuito. Para la corriente, cada celda se midió en cortocircuito (ISC) con el objeto de obtener la corriente máxima, procedimiento que implica desconectar la celda PMFC de cualquier carga externa y conectar los terminales positivo y negativo de la celda al amperímetro o multímetro digital (Kwon & Park, 2021). La tensión en circuito abierto y la corriente en cortocircuito se calcularon utilizando un multímetro digital MY68 como se observa en la Figura 21.

Figura 21.
Fotografía de la celda PMFC, voltaje (VOC) y corriente (ISC)



Nota. Como la corriente máxima se mide en cortocircuito el valor de celda C9 de 7,6 mA decrece considerando para la tabla 7 un valor de 6,2 mA. Fuente. Elaboración propia.

La variabilidad en la resistencia de las celdas, atribuida a la humedad del suelo, se calculó aplicando la Ley de Ohm: ecuación (1).

$$\frac{V}{I} = R \quad (1)$$

Con base en los datos recolectados y la ecuación (2) de la Potencia Eléctrica – Ley de Watt, se calcula la potencia generada por las tres celdas PMFC, como se presenta en la Tabla 7. Estos valores son registrados 16 horas después del riego a los cinco meses desde la fabricación de las celdas.

$$P = V * I \quad (2)$$

Tabla 7.*Rendimiento de Potencia de cada celda PMFC*

Celda	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Resistencia (Ohm)	Potencia (mW)
C1	0,858	0,62	1384	0,53
C2	0,973	2,4	405	2,34
C3	1,033	1,4	738	1,45
C4	1,006	0,75	1341	0,75
C5	0,957	3,2	299	3,06
C6	0,887	1,45	612	1,29
C7	0,895	1,5	597	1,34
C8	0,958	1,8	532	1,72
C9	0,992	6,22	159	6,17
C10	0,837	2,52	332	2,11
C11	0,916	0,93	985	0,85
C12	0,992	3,3	301	3,27
C13	0,959	0,69	1390	0,66
Total				16.60

Nota. Estos valores fueron recolectados 16 horas después del riego, donde la excitación de los electrones es mínima y las mediciones son más estables. Fuente. Elaboración propia.

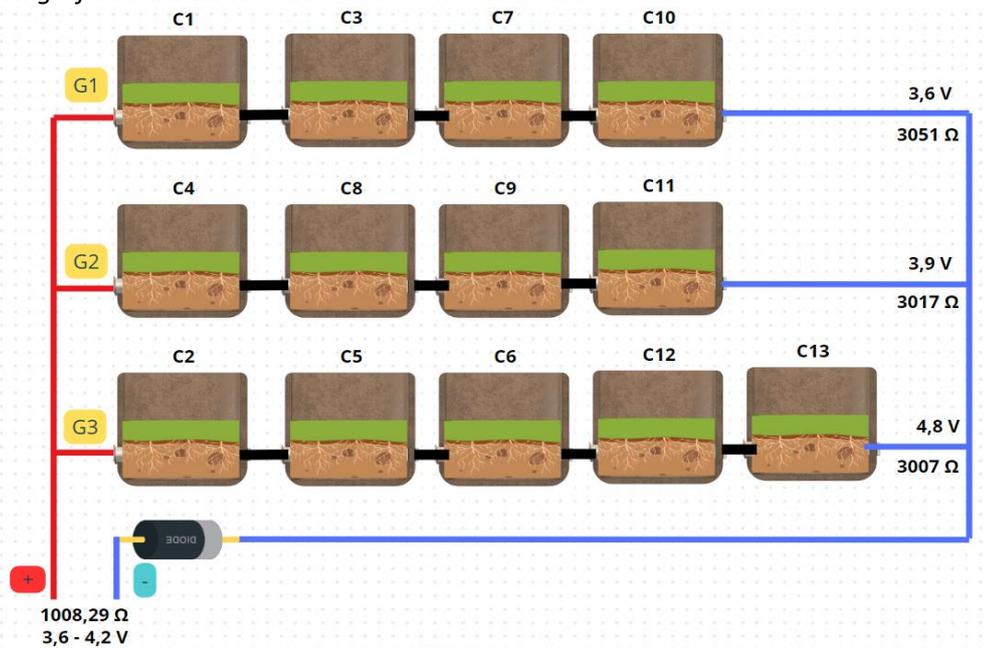
Los datos presentados en la Tabla 7 revelan una variabilidad en la potencia generada, a pesar de que el diseño de cada celda es idéntico. Esta variabilidad se atribuye principalmente a la resistencia interna de la arcilla y del suelo. Al sumar en serie las potencias individuales de cada celda, se obtiene un total aproximado de 16,6 mW. Por ende, para mejorar la potencia eléctrica se emplean circuitos mixtos y balanceos de carga que ofrecen una mayor eficiencia al sistema PMFC.

5.6.2 Balanceo de celdas PMFC

En el conjunto de las 13 celdas, se observó que algunas celdas producen una cantidad significativa de energía, mientras que otras apenas generan 1 mW, aunque la mayoría de ellas comparten un umbral de 0.8 voltios, la corriente se ve afectada en cada celda.

Para garantizar una óptima transferencia de energía hacia los supercondensadores y batería, se lleva a cabo un proceso de balanceo de las celdas en función de su resistencia interna. El presente balanceo se divide en tres agrupaciones, donde se procura que la resistencia total de cada grupo sea aproximadamente igual, tal como se muestra en la Figura 22. Sin embargo, se analiza en la Tabla 8 que, a pesar de que las resistencias en los tres grupos son comparables, el voltaje generado en serie presenta variaciones significativas.

Figura 22.
Representación gráfica del balanceo de celdas PMFC de arcilla



Nota. La figura muestra el balanceo de celdas PMFC de arcilla, organizadas en un circuito mixto con conexiones en serie y paralelo. De esta manera los grupos G1, G2 y G3 tienen resistencias similares alrededor de los 3 kΩ. Fuente. Elaboración propia.

Tabla 8*Balanceo de cargas en celdas PMFC en función de su resistencia interna*

G1 C1+C3+C7+C10	G2 C4+C8+C9+C11	G3 C2+C5+C6+C12+C13
1384 Ω	1341 Ω	1390 Ω
738 Ω	985 Ω	612 Ω
597 Ω	532 Ω	05 Ω
332 Ω	159 Ω	299 Ω
		301 Ω
3051 Ω	3017 Ω	3007 Ω
3,623 V	3,872 V	4,768 V
1,19 mA	1,28 mA	1,59 mA

Nota. Esta tabla muestra cómo se distribuyen las celdas PMFC agrupadas en tres grupos (G1, G2 y G3) según su resistencia interna total, además presenta la suma total de los valores de voltaje y corriente para cada grupo. Fuente. Elaboración propia.

Al conectar en paralelo los tres grupos, se establece un rango de voltaje que oscila entre 3,6 y 4,2 voltios, considerando los 0,6 V del diodo para prevenir la polarización inversa.

La resistencia equivalente del circuito final se calcula aplicando la ecuación (3) de resistencias en paralelo, lo que arroja un resultado aproximado de 1KΩ. Respecto a la corriente total, se determina con la ecuación (4), considerando que el valor mínimo de voltaje en el peor escenario posible es de 3,6 voltios, resultando una corriente de 3,57 mA.

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_{G1}} + \frac{1}{R_{G2}} + \frac{1}{R_{G3}} \quad (3)$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{3051} + \frac{1}{3017} + \frac{1}{3007}$$

$$R_{eq} = 1008,29 \Omega \approx 1 K\Omega$$

$$I_{total} = \frac{V}{R_{eq}} \quad (4)$$

$$I_{total} = \frac{3.6 V}{1008.29 \Omega}$$

$$I_{total} = 3,57 mA$$

5.6.3 Almacenamiento

Una vez establecidos y ponderados los requisitos de suministro de energía del sistema de celdas PMFC, se procede a abordar el almacenamiento de energía. Se reconoce que la corriente mínima total de carga es de 3,57 mA, cantidad insuficiente para cargar eficientemente una batería con una capacidad considerable de almacenamiento como una de 2000 mAh. Incluso con esta corriente, sería excesivo utilizar esa batería de tal capacidad, ya que el tiempo estimado para cargarla sería de aproximadamente 23,34 días, como se explica en la ecuación (5) de tiempo de carga.

$$\text{Tiempo de carga (h)} = \frac{\text{Capacidad batería (mAh)}}{\text{Corriente de carga mA}} \quad (5)$$

$$\text{Tiempo de carga batería (h)} = \frac{2000 \text{ mAh}}{3,57 \text{ mA}}$$

$$\text{Tiempo de carga (h)} = 560,22 \text{ horas} \approx 23 \text{ días}$$

Por ende, se ha optado por emplear una batería de litio de 3,7 V a 200 mAh, que podría cargarse en aproximadamente 2 días, como se resalta en la ecuación (6). Sin embargo, incluso con una batería de menor capacidad, el tiempo de carga sigue siendo considerablemente elevado.

$$\text{Tiempo de carga batería (h)} = \frac{200 \text{ mAh}}{3,57 \text{ mA}} \quad (6)$$

$$\text{Tiempo de carga (h)} = 56,022 \text{ horas} \approx 2 \text{ días}$$

Para mejorar aquello, se emplea un sistema de almacenamiento híbrido con supercondensadores, los cuales, a diferencia de las baterías, ofrecen tiempos de carga significativamente más rápidos debido a su baja resistencia y su capacidad para almacenar energía electrostática.

Se agregaron 5 Supercapacitores en paralelo de 1F a 5,5V, con finalidad de incrementar el almacenamiento a 5F, con su tiempo de carga definido por la ecuación (7) de la Ley de capacitancia.

$$Q = C * V \quad (7)$$

Q es la cantidad de carga en culombios (C)

C es la capacidad del supercondensador en faradios (F)

V es la tensión de carga en voltio (V)

$$Q = 5F * 3,6V$$

$$Q = 18C$$

$$\text{Tiempo de carga (s)} = \frac{Q}{I}$$

$$\text{Tiempo de carga (s)} = \frac{18}{0,00357 A}$$

$$\text{Tiempo de carga (s)} = 5042,01 s \approx 1,4 \text{ horas} = 1h 24min$$

Finalmente, el sistema híbrido de almacenamiento, compuesto por una batería de 200 mAh y cinco supercondensadores de 5 Faradios conectados en paralelo, tendría un tiempo de carga total de 57 horas y 24 minutos, según estimaciones en el peor de los casos.

5.6.4 Selección y dimensionamiento de luces LED

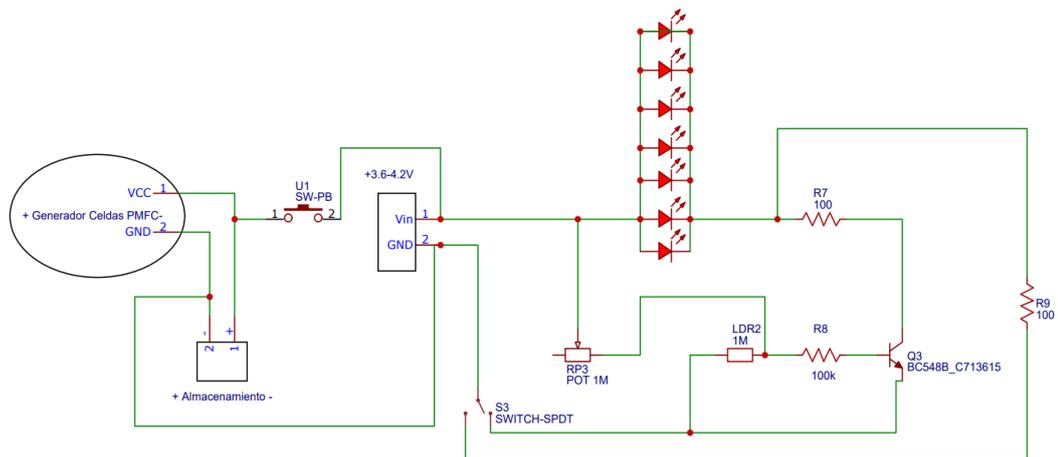
Se optó por emplear diodos LEDs white del tipo SMD 3528, los cuales presentan un consumo de 0.064 W y un flujo luminoso entre 6-7 lúmenes. Estos LEDs son ampliamente utilizados para perfilar la luz en contornos decorativos. Tienen un voltaje de típico de entrada a 3,2 V, pero, al igual que los leds convencionales, se activan a 2,6 V, hasta un voltaje máximo de 3,6 V. Por lo que, al exceder este voltaje, se estaría limitando la vida útil del led.

Entonces, dado que la potencia total generada es de 16,6 mW, según lo indicado en el apartado anterior, esta cantidad no es suficiente para alimentar eficientemente un LED que consume 64 mW. Por ello, se recurre al almacenamiento de energía mediante supercondensadores y batería de litio. Consecuentemente, para encender 7 LEDs, se necesitan aproximadamente 0,448 W a 49 lúmenes, cantidad que será suministrada por el sistema de almacenamiento.

5.6.5 Diagrama del Circuito Esquemático

El diagrama esquemático que se muestra en la figura 23 es una lámpara LED compuesta por 7 LEDs conectados en paralelo, controlados por un circuito con fotorresistencia para que la lámpara se cargue durante el día e ilumine durante la noche. El generador son las 13 celdas PMFC (Plant Microbial Fuel Cells) conectadas a su respectivo sistema de almacenamiento.

Figura 23.
Diagrama esquemático del circuito de iluminación leds



Fuente. Elaboración propia.

El funcionamiento de este sistema se basa en la variación de la resistencia de la fotorresistencia (LDR2) con la luz solar. Durante el día, la luz solar disminuye la resistencia de la LDR2, lo que mantiene apagados los LEDs y permite que la energía generada se almacene en los supercondensadores y la batería. Por la noche, la falta de luz aumenta la resistencia de la LDR2, lo que activa el transistor Q3 (BC548B). Este transistor permite que la corriente fluya desde el almacenamiento hacia los LEDs, encendiéndolos. El potenciómetro (RP3) ajusta la sensibilidad del circuito de detección de luz, determinando el umbral de activación para encender los LEDs, mientras que las resistencias (R7, R8, R9) limitan la corriente y estabilizan el funcionamiento del circuito, asegurando que los componentes operen dentro de sus rangos seguros.

5.7 Construcción E Impresión en 3D

El prototipo de lámpara LED mostrado en la Figura 24 es un dispositivo innovador que combina tecnología de generación de energía sostenible con un diseño estéticamente atractivo y funcional. La lámpara tiene una estructura cúpula invertida con una base ancha y estable. La parte superior se estrecha, dándole una forma que recuerda a una linterna moderna con un diseño futurista y elegante.

Figura 24.

Prototipo de lámpara led con energía biofotovoltaica



Fuente. Elaboración propia.

5.7.1 Diseño y Estructura

El diseño de la lámpara, con un radio total de 75 cm y una altura de 70 cm, fue creado utilizando el software Fusion 360 y está impreso en plástico PLA en colores negro y gris como se puede ver en la Figura 25. Su estructura es moderna y funcional, diseñada para maximizar tanto la eficiencia como la atracción visual. La cúpula cuenta con múltiples aberturas ovaladas que permiten la dispersión atractiva de la luz para la fotosíntesis de las plantas.

El prototipo integra 13 celdas PMFC de arcilla, que albergan musgo *Polytrichum*, y 13 celdas de plástico donde se encuentra la planta Crassulaceae conocida como “patas de rana”. Las celdas de arcilla están situadas en la parte inferior, mientras que las celdas de plástico van posicionadas a la vista del sol. Además, el diseño incorpora un sistema de riego innovador y ecológico que asegura un suministro eficiente de agua a cada una de las celdas, lo cual es vital para mantener la salud las plantas y el musgo. La lámpara también cuenta con un soporte fabricado en acero que proporciona la estabilidad necesaria para soportar el peso de las celdas PMFC, entre otros componentes.

Figura 25.

Diseño y modelado 3D con Fusion 360



Nota. Perfil frontal y transversal del prototipo diseñado en Fusion 360. Fuente. Elaboración propia.

5.7.2 Funcionamiento

El funcionamiento de esta lámpara se basa en el uso de un electrolito, en este caso, agua, que se emplea para regar directamente las celdas que contienen la especie *Crassulaceae*, asegurando su alimentación y supervivencia. La planta “patas de rana” está plantada en un suelo humífero, rico en nutrientes, minerales y sales como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio, y alberga diversos microorganismos, incluidas cianobacterias.

El electrolito, al disolverse en las sales minerales del suelo humífero, se enriquece con estos nutrientes. Estos nutrientes y sales son continuamente renovados por la acción de la fotosíntesis de la planta “patas de rana”, que fija ciertas sustancias con la ayuda de los microorganismos presentes en el suelo. Una vez disuelto, el electrolito rico en nutrientes y sales es conducido hacia las celdas de arcilla.

En las celdas de arcilla, se llevan a cabo una serie de reacciones químicas mediante actividad iónica y el efecto redox, en las que se produce la pérdida y ganancia de electrones. Estos electrones son liberados durante las reacciones y captados por los electrodos de grafito, carbono y aluminio, generando un voltaje que oscila entre 3,6 y 4,2 volts, suficiente para alimentar los LEDs del sistema.

La energía generada se almacena en un sistema híbrido que incluye supercapacitores de 5 Faradios y una batería de litio de 200 mAh, garantizando un suministro constante y eficiente de energía. Además, un sensor con fotocelda optimiza el funcionamiento del dispositivo, asegurando que los LEDs se activen únicamente durante la noche, proporcionando iluminación solo cuando es necesario.

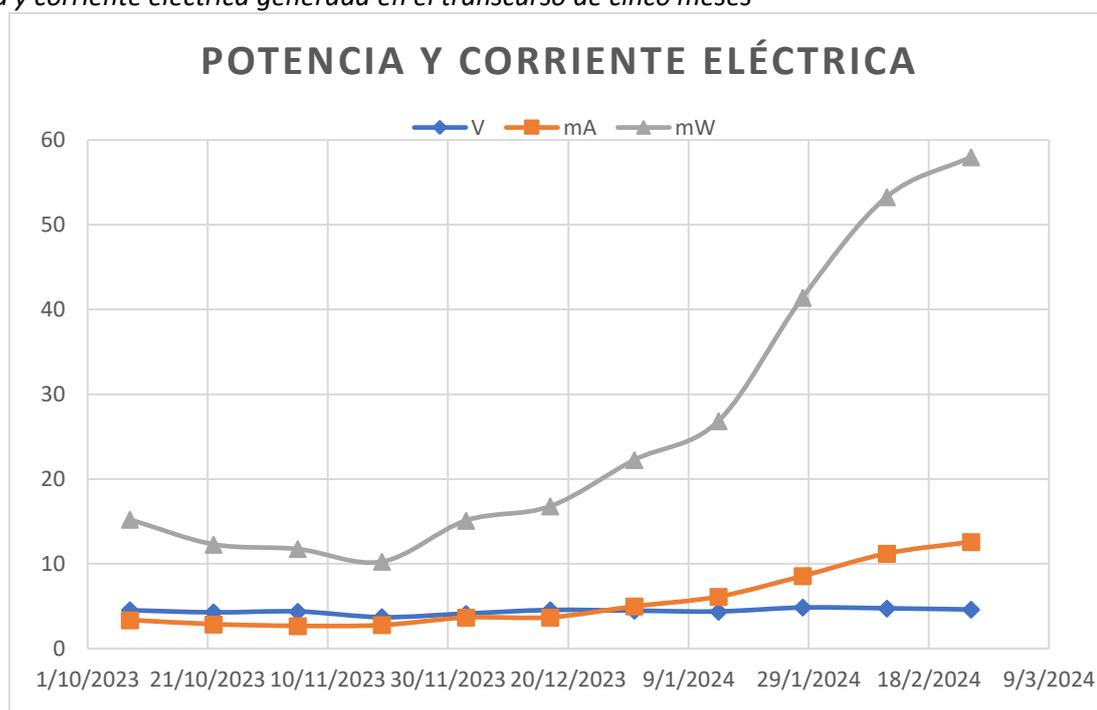
6. Resultados

6.1 Potencia y Corriente Eléctrica Generada

Durante los primeros dos meses posteriores a la plantación y fijación de las plantas y musgo, con un riego constante cada cuatro días, no se observaron cambios alarmantes en la generación de energía, manteniéndose el voltaje entre 3,10 V a 4,40 V y la corriente aproximadamente entre 2,7 mA y 3,8 mA. Sin embargo, a los cinco meses, se evidenció una variación clara en el patrón de generación de energía. A medida que las raíces de las plantas y musgos se fueron desarrollando, la actividad microbiana en el suelo también se fue proliferando, lo que dio lugar a un incremento en la corriente, oscilando entre 5 mA y, en el mejor de los casos, hasta 14 mA.

Figura 26.

Potencia y corriente eléctrica generada en el transcurso de cinco meses



Fuente. Elaboración propia.

El análisis detallado de la Figura 26 con datos recopilados cada 15 días, revela que, aunque el voltaje se mantuvo relativamente estable a lo largo del tiempo, la corriente se elevó significativamente, lo que desemboca un incremento en la potencia de hasta 58 mW. Este patrón confirma que, con el tiempo, la actividad microbiana y el crecimiento de las raíces mejoran la eficiencia del sistema biofotovoltaico PMFC.

La interacción sinérgica entre las raíces de las plantas y los microorganismos en la rizosfera es crucial para esta eficiencia. La rizosfera, que es la región del suelo que rodea las

raíces, se convierte en un entorno altamente activo microbiológicamente. Los microorganismos descomponen la materia orgánica y liberan nutrientes esenciales, lo que no solo mejora la salud de las plantas y musgos, sino que también incrementa la generación de energía del sistema. Además, las condiciones óptimas de luz y nutrientes contribuyen significativamente al rendimiento del sistema.

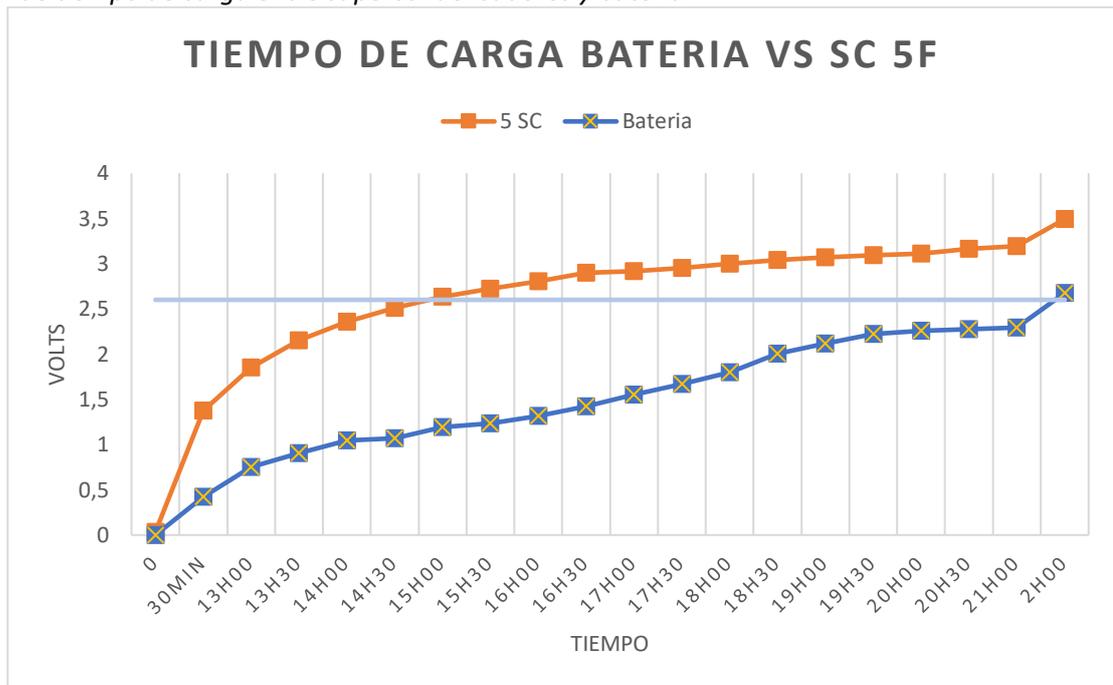
6.2 Análisis de Carga entre Supercapacitores y Batería

El análisis comparativo entre Supercapacitores (SC) de 5 Faradios y una batería de litio de 200 mAh revela diferencias significativas en sus comportamientos de carga. Es importante señalar que los datos fueron recolectados en intervalos de 30 minutos; no obstante, para los supercondensadores, las mediciones se realizaron 4 horas después del riego, mientras que, para la batería, se efectuaron 28 horas después del riego. Además, se debe considerar una caída de voltaje de 0.6 V debido a la presencia del diodo.

En la figura 27 se observa que, en los primeros 30 minutos, los SC alcanzan aproximadamente 1,4 V, mientras que la batería solo llega a 0,4 V. Esto indica que los supercondensadores se cargan más rápidamente que la batería en las etapas iniciales. Después de aproximadamente 5 horas (17h30), el voltaje de los supercapacitores se estabiliza en torno a los 3 V, indicando que han alcanzado un nivel de carga casi completo según la generación de voltaje de las celdas. Por otro lado, la batería continúa aumentando su voltaje de manera gradual y constante hasta las 21:00, alcanzando un máximo de 2,3 V, un voltio menos que los SC hasta ese entonces.

Figura 27.

Relación de tiempo de carga entre supercondensadores y batería



Fuente. Elaboración propia.

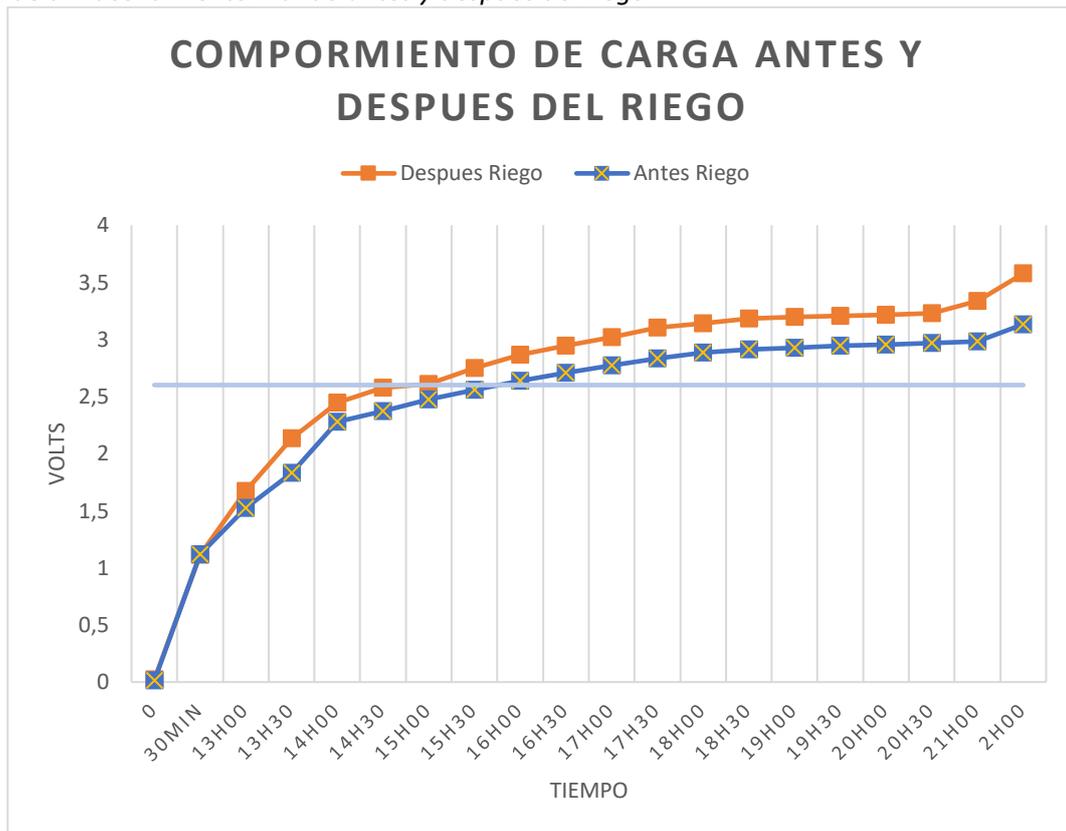
Este análisis revela que los supercondensadores presentan un ritmo de carga inicial más rápido que la batería, logrando niveles de voltaje más altos en menor tiempo. Por otro lado, la batería exhibe un aumento de voltaje más gradual y constante en comparación con los supercapacitores.

6.3 Análisis del Sistema Almacenamiento Híbrido

Luego de haber estudiado el comportamiento en la generación de energía y cómo esta se incrementa con el tiempo y de evaluar un almacenamiento basado en supercondensadores y baterías, se procede a analizar el sistema híbrido de almacenamiento final. El factor a evaluar es la humedad. Primeramente, se recolectarán datos cada 30 minutos antes y después del riego, recordando que el riego se lo realiza cada cuatro días.

La Figura 28, se nota que en los primeros 60 minutos, existe un pico de carga rápida aproximadamente a 1,5 V en ambos casos, pero a partir de ese instante la carga es gradual y progresiva compartiendo una diferencia aproximada de 0,25 V entre ellas. Pronunciando en el tiempo que el voltaje en el sistema de almacenamiento híbrido se almacena más rápidamente después del riego en comparación con el cuarto día antes del siguiente riego.

Figura 28.
Sistema de almacenamiento híbrido antes y después del riego



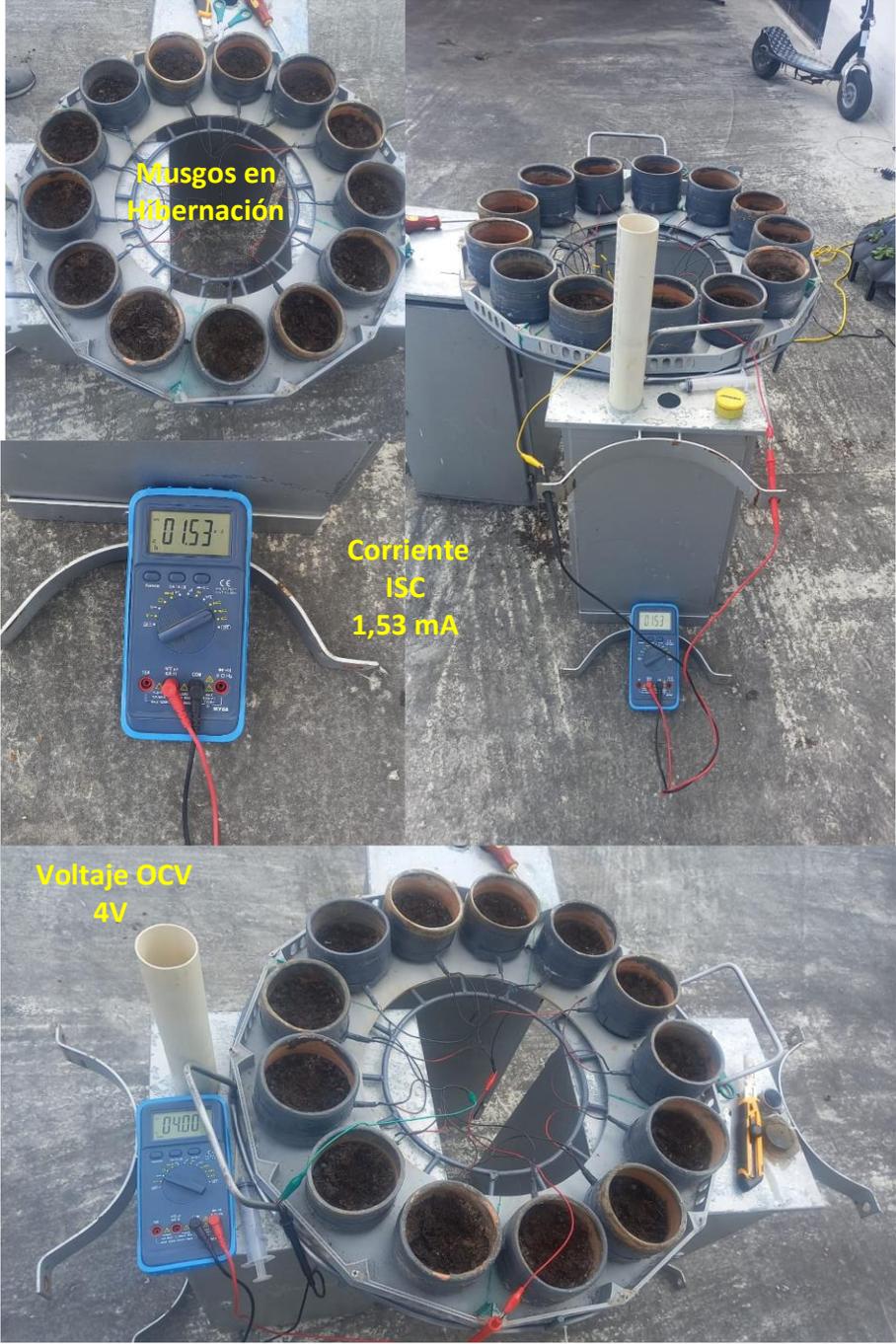
Fuente. Elaboración propia.

Esto demuestra que la humedad del suelo tiene un impacto significativo en la eficiencia del sistema de almacenamiento. La diferencia en los valores de voltaje entre las dos condiciones destaca la importancia de un riego regular para mantener un rendimiento óptimo del sistema y además con vida a las plantas y musgos. Además, la humedad del suelo afecta directamente la conductividad eléctrica y la actividad biológica en estos sistemas, influyendo en su capacidad para generar y almacenar energía. Un nivel de humedad óptimo maximiza la eficiencia de los procesos biológicos y electroquímicos involucrados.

Por otra parte, en un periodo de 30 días con un riego inhabitual se procede a tomar los valores de voltaje y corriente eléctrica total del circuito de trece celdas PMFC, donde de primera mano se observa que al no tener un riego constante existe resequead en el suelo y el musgo ha entrado en estado de hibernación.

Aplicando los métodos previamente descritos de circuito abierto (OCV) y de corriente en cortocircuito (ISC), se obtiene un voltaje máximo de 4V y una corriente de 1,53mA a la salida del conjunto de celdas como se visualiza en la Figura 29.

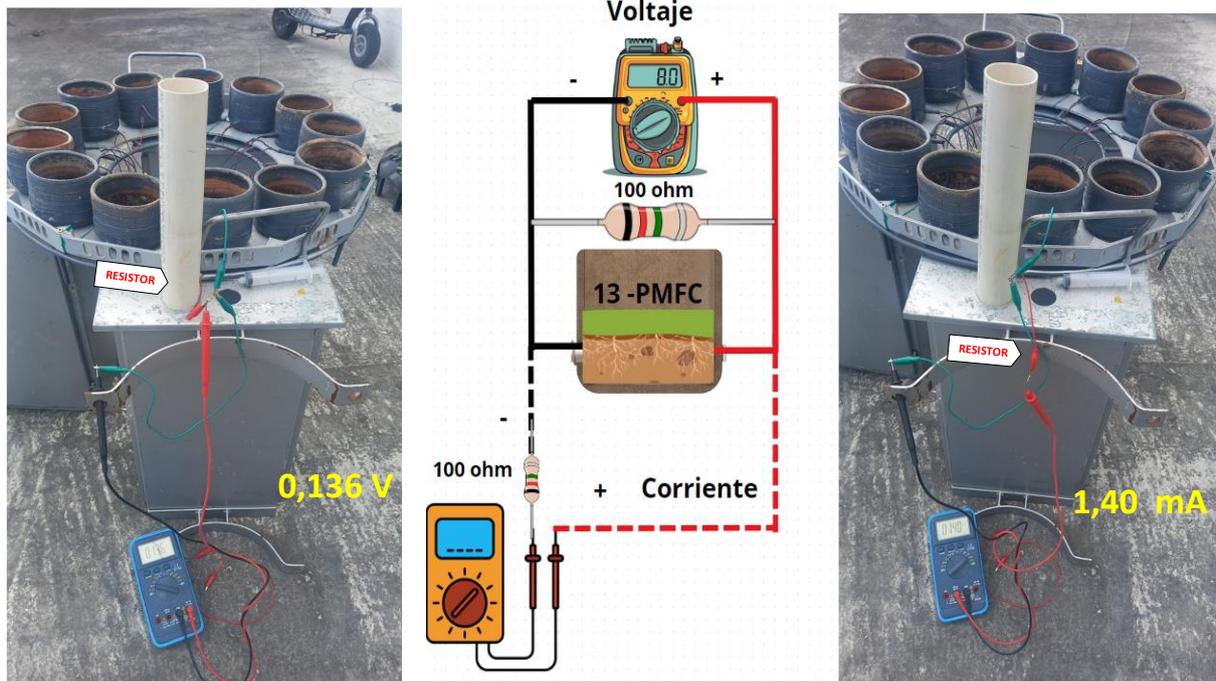
Figura 29.
Voltaje en (OCV) y corriente (ISC) del circuito de 13 celdas PMFC



Fuente. Elaboración propia.

Figura 30.

Voltaje y corriente aplicando resistencia externa $100\ \Omega$ al circuito de 13 celdas PMFC



Fuente. Elaboración propia.

Para respaldar estos resultados, se procede a medir el voltaje y la corriente utilizando una resistencia externa de $100\ \Omega$, tal como se muestra en el circuito de la Figura 30. El voltaje en paralelo a la resistencia es de $0,136\ V$ y la corriente que atraviesa la resistencia es de $1,40\ mA$. Aplicando la Ley de Ohm, se obtiene una resistencia de $97,14\ \Omega$, lo que confirma los resultados con cierto grado de tolerancia debido a la resistencia externa. En otras palabras, la corriente medida por ambos métodos es muy similar.

7. Discusión

Comparando los resultados obtenidos con estudios previos, se observa que el rendimiento de las celdas PMFC varía ampliamente dependiendo de los materiales utilizados y las condiciones experimentales. Por ejemplo, estudios han demostrado que el uso de electrodos de carbono y membranas de arcilla pueden mejorar la eficiencia de las celdas. La investigación realizada por Sarma y Mohanty (2023) muestra que las membranas de arcilla con adiciones de bentonita y fly mejoran significativamente la transferencia de electrones, lo que coincide con los resultados observados en esta tesis.

En estudios locales realizados en Manabí por Aguilar (2022) con electrodos de cobre y aluminio, las celdas biológicas tratadas con especies fotosintéticas como el Orégano, Dulcamara y Sábila generan entre 0,87 a 0,89 voltios con una corriente de 0,07 mA (+/-2) y al conectar en serie y paralelo el circuito final de 30 celdas tiene un voltaje total de 9,07 V con una corriente de 0,201 mA, demostrando que las diferentes especies de plantas no influyen como tal en la producción de energía. En contraste con mis celdas PMFC, he demostrado que mediante un estudio y análisis de las propiedades del suelo y el tipo de electrodos he obtenido valores significantes en cuanto a la corriente que van de 0,62 a 6,22 mA por celda PMFC, resultados que demuestran que mediante un estudio sistematizado se puede mejorar y a su vez brindar quizá otro enfoque de mayor índole a la energía biofotovoltaica obtenida a través de exudados y composición microbiana del suelo.

Uno de los retos en el desarrollo de celdas PMFC es manejar la variabilidad en la producción de energía. Las diferencias en la composición del suelo y la actividad microbiana pueden llevar a resultados inconsistentes. Esto se demuestra claramente tras el aumento de la corriente en algunas celdas después cinco meses, lo cual está estrechamente relacionado con la adhesión bacteriana en los electrodos con el tiempo. Sin embargo, a largo plazo, esto también genera preocupación, ya que la acumulación de productos de reacción y la posible degradación de los materiales pueden afectar el rendimiento de las celdas.

Las celdas con menor resistencia interna, como la C9, suelen producir mayor potencia, lo que demuestra que la reducción de la resistencia interna podría mejorar significativamente el desempeño del sistema. Las bajas corrientes de salida, vinculadas al posicionamiento de los electrodos y la formación de biopelículas, se pueden aprovechar mediante el uso de

supercondensadores para el almacenamiento. Sin dejar de lado que los futuros estudios podrían centrarse en optimizar la composición del suelo para reducir la resistencia interna.

8. Conclusiones

De acuerdo a los objetivos planteados y al marco investigativo desarrollado, a continuación, se presentan las conclusiones de este proyecto.

El desarrollo del prototipo de lámpara LED sustentable con energía biofotovoltaica demostró ser una alternativa viable y ecológica a los sistemas de iluminación tradicionales de bajo alcance. La utilización de celdas biofotovoltaicas basadas en plantas y musgos no solo proporcionan una fuente de energía renovable, sino que también contribuye a la reducción de emisiones de CO₂, promoviendo un entorno más limpio y sostenible.

La revisión bibliográfica realizada proporcionó una comprensión profunda de cómo los fotosistemas presentes en las plantas y microorganismos convierten la luz solar en energía química de enlace, que luego es recolectada por los electrodos. Este conocimiento fue esencial para establecer las bases teóricas necesarias para el desarrollo del prototipo. Además, se identificaron las ventajas y limitaciones de las diferentes tecnologías biofotovoltaicas, lo que permitió seleccionar los componentes más adecuados para el desarrollo de las celdas PMFC.

El uso de la herramienta de modelado 3D, Fusion 360, permitió prever y solucionar posibles problemas antes de la construcción física del prototipo, asegurando que el diseño final fuera funcional y eficiente, cumpliendo con los estándares de sostenibilidad, rendimiento y bajo costo.

La construcción del prototipo de luminaria, utilizando células microbianas fotosintéticas de musgo, fue exitosa. El prototipo no solo generó y almacenó suficiente energía para alimentar el sistema de iluminación LED, sino que también mostró un gran potencial como solución práctica y ecológica. El uso de musgo y microorganismos evidenció el potencial de estas celdas PMFC para aplicaciones en energías renovables.

La evaluación del prototipo indicó que, aunque la generación de energía es suficiente para aplicaciones de pequeña escala, la eficiencia del sistema puede mejorarse mediante la optimización de los componentes y condiciones de operación, como en este proyecto con el uso de supercondensadores y membranas de arcilla.

El diseño con doble cámara catódica en las celdas PMFC, presentó sus notables desventajas dado que, al evaluar su estado en el transcurso de cinco meses, se observó un notable deterioro en la cámara del cátodo de aluminio expuesto al aire, mientras que, en la cámara interior, el cátodo de aluminio se encontraba más preservado al igual que el ánodo de

fieltro de grafito y carbono. Sin embargo, a pesar de ello, la producción de energía no se vio afectada en absoluto.

En las celdas PMFC, la presencia y acumulación de exudados de savia o depósitos minerales, como las sales de calcio y magnesio, entre otras, provocaron un proceso de corrosión en el cátodo exterior de aluminio, que vio acelerado debido a su exposición al aire.

Como resultado final, la presente investigación ha logrado no solo cumplir con los objetivos planteados, sino que también ha aportado valiosa información sobre la integración de tecnologías biofotovoltaicas en sistemas de iluminación sustentable. Este avance abre nuevas posibilidades para el desarrollo de soluciones energéticas innovadoras y amigables con el medio ambiente.

9. Recomendaciones

Es recomendable continuar la investigación enfocada en la optimización de los componentes utilizados en las celdas biofotovoltaicas, especialmente en la selección de materiales para los electrodos y las membranas. La mejora en estos componentes puede incrementar la eficacia y la durabilidad del sistema.

Implementar sistemas automatizados de riego o regar cada 4 días las celdas PMFC con el propósito de mantener niveles ideales de humedad en el suelo, garantizando un flujo de electrones constante y reduciendo los tiempos de carga hacia los supercondensadores.

Investigar la posibilidad de integrar otras tecnologías renovables con las celdas biofotovoltaicas para crear sistemas híbridos que puedan aumentar la producción de energía y su estabilidad, como la combinación con paneles solares fotovoltaicos tradicionales.

Fomentar la colaboración entre universidades, centros de investigación y la industria para el desarrollo continuo de tecnologías biofotovoltaicas. La investigación aplicada y los proyectos piloto pueden proporcionar datos valiosos para la mejora y escalabilidad de estos sistemas.

10. Bibliografía

- Agüero-Quiñones, R., Coronado, J. D., Enriquez-Leon, R., Zelada-Cabellos, P., & Rojas-Flores, S. (2022). Electricity generation and wastewater treatment using microbial fuel cells with graphite and aluminum electrodes. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology, 2022-December*. <https://doi.org/10.18687/LEIRD2022.1.1.95>
- Aguilar, G. (2022). Energía Biofotovoltaica: Las Plantas como Fuente Alternativa de Energía Renovable en Portoviejo, Provincia de Manabí Biophotovoltaic Energy: Plants As An Alternative Source Of Renewable Energy In Portoviejo, Province Of Manabí. In *Revista Sinapsis* (Vol. 1). <https://www.itsup.edu.ec/sinapsis>
- Aldaz, L., & Ochoa, I. (2011). *PROPAGACIÓN ASEJUAL DE DIEZ ESPECIES FORESTALES Y ARBUSTIVAS EN EL JARDÍN BOTÁNICO "REINALDO ESPINOSA."*
- Alshehri, R., & Fitch, A. (2020). Electron Transfer of *Shewanella Oneidensis* MR-1 at Clay-Modified ITO Electrode. *ECS Meeting Abstracts, MA2020-01(47)*, 2688–2688. <https://doi.org/10.1149/ma2020-01472688mtgabs>
- Anam, M., Gomes, H. I., Rivers, G., Gomes, R. L., & Wildman, R. (2021). Evaluation of photoanode materials used in biophotovoltaic systems for renewable energy generation. In *Sustainable Energy and Fuels* (Vol. 5, Issue 17, pp. 4209–4232). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d1se00396h>
- Arturo, C., Álvarez, M., Surcolombiana, U., De, F., Sociales, C., Humanas, Y., de Comunicación Social, P., Periodismo, Y., & Monje Álvarez, C. A. (2011). *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN CUANTITATIVA Y CUALITATIVA Guía didáctica*.
- Asensio, J. A., Peña, J., Pérez-Coll, D., Carlos Ruiz-Morales, J., Marrero-Lopez, D., Nuñez, P., Ballesteros, B., Canales-Vazquez, J., Borrós, S., & Gómez-Romero, P. (2011). Pilas de combustible de Membrana polimérica. In *Afinidad LXVIII* (Vol. 554).
- Bazdar, E., Roshandel, R., Yaghmaei, S., & Mardanpour, M. M. (2018). The effect of different light intensities and light/dark regimes on the performance of photosynthetic microalgae microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 261, 350–360. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.026>

- Bernal, C. A. (2010). *Metodología de la investigación administración, economía, humanidades y ciencias sociales* (O. Fernández, Ed.; Tercera edición).
- Bombelli, P., Savanth, A., Scarampi, A., Rowden, S. J. L., Green, D. H., Erbe, A., Årstøl, E., Jevremovic, I., Hohmann-Marriott, M. F., Trasatti, S. P., Ozer, E., & Howe, C. J. (2022). Powering a microprocessor by photosynthesis. *Energy & Environmental Science*, 15(6), 2529–2536. <https://doi.org/10.1039/D2EE00233G>
- Carmen, D. M., Casañas, A., Emma, D., & Toste, S. (2017). “SPHAGNUM Y SUS MICROBIONTES, UNA FUENTE PROLÍFICA DE APLICACIONES” “SPHAGNUM AND ITS MICROORGANISMS, A PROLIFIC SOURCE OF APPLICATIONS.”
- Diaz Bazo, C., & Gonzáles, J. (2016). *Métodos de investigación en educación*.
- Díaz, E. (2019). DINÁMICA SUCESIONAL DE LA VEGETACIÓN NATURAL BAJO PLANTACIONES FORESTALES DE Pinus sp. y Eucalyptus globulus Labill, EN EL PARQUE UNIVERSITARIO “FRANCISCO VIVAR CASTRO”, LOJA. *Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables*, 1–40.
- Díaz, P. (2016). *SUPERCONDENSADORES HÍBRIDOS ASIMÉTRICOS CON ESPECIES REDOX INORGÁNICAS*.
- Durgawati Vishwavidyalya, R., & Kumar Jawre, A. (2018). Bio-Photovoltaic: The Future of Electricity with Natural Resources. *International Journal of Creative Research Thoughts*, 6(1), 2320–2882. <https://doi.org/10.1729/Journal.23507>
- electro, S. (2015). *TECNOLOGIA_ILUMINACION_LED*.
- Fowler Samantha, Rebecca Roush, & James Wise. (2017). *Concepts of Biology*.
- Fu, C. C., Hung, T. C., Wu, W. T., Wen, T. C., & Su, C. H. (2010). Current and voltage responses in instant photosynthetic microbial cells with Spirulina platensis. *Biochemical Engineering Journal*, 52(2–3), 175–180. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2010.08.004>
- Goffinet Bernard, & Shaw Jonathan A. (2008). *Bryophyte Biology* (Second Edition, Vol. 2). 2008. <https://www.cambridge.org/ec/universitypress/subjects/life-sciences/plant-science/bryophyte-biology-2nd-edition?format=PB&isbn=9780521693226>
- Grande, J. L. (n.d.). *ILUMINACION CON LEDS*.
- Guaman Miguel, & Murillo Norman. (2015). *DISEÑO DE ILUMINACIÓN CON LUMINARIAS TIPO LED BASADO EN EL CONCEPTO EFICIENCIA ENERGÉTICA Y CONFORT VISUAL*,

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10253/1/UPS-GT001344.pdf>

- Hans, J. (1953). *Grandes Grupos de Suelos en las Regiones Ecuatoriales. Universidad de California, 1.*
- Hasan, K., Grippo, V., Sperling, E., Packer, M. A., Leech, D., & Gorton, L. (2017). Evaluation of Photocurrent Generation from Different Photosynthetic Organisms. *ChemElectroChem, 4*(2), 412–417. <https://doi.org/10.1002/celc.201600541>
- Isao, I., & Hemanta, H. (2015). *Soil Mechanics Fundamentals and Applications.*
- Jalal, N. I., Ibrahim, R. I., & Oudah, M. K. (2021). A review on Supercapacitors: Types and components. *Journal of Physics: Conference Series, 1973*(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012015>
- Jiang, Q., Xing, D., Zhang, L., Sun, R., Zhang, J., Zhong, Y., Feng, Y., & Ren, N. (2018). Interaction of bacteria and archaea in a microbial fuel cell with ITO anode. *RSC Advances, 8*(50), 28487–28495. <https://doi.org/10.1039/c8ra01207e>
- Kumar Singh, R., Kumar Mishra, S., & Mehtre, V. V. (2021). Supercapacitor construction, principle, operation, characteristics, advantages, disadvantages and applications. *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering, 9.* <https://doi.org/10.17148/IJIREEICE.2021.9735>
- Kumari, N., Mohan, C., Kumari, N., & Mohan, C. (2021). Basics of Clay Minerals and Their Characteristic Properties. *Clay and Clay Minerals.* <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.97672>
- Kurra, N., & Jiang, Q. (2022). Supercapacitors. In *Storing Energy: with Special Reference to Renewable Energy Sources* (pp. 383–417). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824510-1.00017-9>
- Kwon, K. J., & Park, B. J. (2021). Efficiency of *Spathiphyllum* spp. as a plant-microbial fuel cell. *Ornamental Horticulture, 27*(2), 173–182. <https://doi.org/10.1590/2447-536x.v27i2.2264>
- Lefebvre, Olivier., Al-Mamun, A., Chua, D., & Yong Hg, H. (2008). An insight into cathode options for microbial fuel cells. *Water Science and Technology, 57*(12), 2031–2037. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.611>

- Li, M., Zhou, M., Luo, J., Tan, C., Tian, X., Su, P., & Gu, T. (2019). Carbon dioxide sequestration accompanied by bioenergy generation using a bubbling-type photosynthetic algae microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, *280*, 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.038>
- Lin, C. C., Wei, C. H., Chen, C. I., Shieh, C. J., & Liu, Y. C. (2013). Characteristics of the photosynthesis microbial fuel cell with a *Spirulina platensis* biofilm. *Bioresource Technology*, *135*, 640–643. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.138>
- Lumenetics, P. S. A. C. (2017). *Tipos de lámparas LED: SMD y COB. ¿Cuál elegir?*
- Marta Sader. (2021, January 24). *La empresa española que utiliza TIERRA para generar ELECTRICIDAD.*
- McCormick, A. J., Bombelli, P., Bradley, R. W., Thorne, R., Wenzel, T., & Howe, C. J. (2015). Biophotovoltaics: Oxygenic photosynthetic organisms in the world of bioelectrochemical systems. In *Energy and Environmental Science* (Vol. 8, Issue 4, pp. 1092–1109). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c4ee03875d>
- McCormick, A. J., Bombelli, P., Scott, A. M., Philips, A. J., Smith, A. G., Fisher, A. C., & Howe, C. J. (2011). Photosynthetic biofilms in pure culture harness solar energy in a mediatorless bio-photovoltaic cell (BPV) system. *Energy and Environmental Science*, *4*(11), 4699–4709. <https://doi.org/10.1039/c1ee01965a>
- Méndez, E., Arrobo, E., & Morocho, A. (2020). Supercapacitores como aporte al desarrollo energético eléctrico, análisis comparativo mediante herramientas computacionales de simulación aplicadas. *Espacios*, *41*, 1–12.
- Muñoz, J., Cuenca, H., Muñoz-Chamba, L., & Aguirre, Z. (2022). Identificación de tipos funcionales de plantas en el bosque andino del Parque Universitario Francisco Vivar Castro. *Bosques Latitud Cero*, *12*(2), 1–12. <https://doi.org/10.54753/blc.v12i2.1618>
- Natalia Ocampo Fernández. (2014). Fotosíntesis. *Universidad Autónoma Del Estado de Hidalgo*. <https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/handle/123456789/15794>
- Nitorisavut, R., & Regmi, R. (2017). Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 76, pp. 81–89). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.064>

- Paz-González, A. (2008). *ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO TRAS LA ADICIÓN DE COMPOST PROCEDENTE DE RSU*.
<https://www.researchgate.net/publication/266883243>
- Pérez Aracelli. (2019). "Evaluación de la celda de combustible planta-microbiana (PMFC) y las condiciones de su entorno en la generación de energía eléctrica."
<https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4228?show=full>
- Pérez, E., & Carril, U. (2009). Fotosíntesis: Aspectos Básicos. *Reduca (Biología). Serie Fisiología Vegetal*, 2(3), 1–47.
- Phour, M., Danish, M. S. S., Sabory, N. R., Ahmadi, M., & Senjyu, T. (2022). Electro-Microbiology: A Green Approach for Energy and Environment Sustainability. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 17). MDPI.
<https://doi.org/10.3390/su141710676>
- Prasad, J., & Tripathi, R. K. (2017). *Maximum Electricity Generation from Low Cost Sediment Microbial Fuel Cell using Copper and Zinc Electrodes*.
- Revelo, D. M., Hurtado, N. H., & Ruiz, J. O. (2013). Celdas de combustible microbianas (CCMs): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica. *Informacion Tecnologica*, 24(6), 17–28. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600004>
- Rojas Flores, S., Naveda, R. N., Paredes, E. A., Orbegoso, J. A., Céspedes, T. C., Salvatierra, A. R., & Rodríguez, M. S. (2020). Agricultural Wastes For Electricity Generation Using Microbial Fuel Cells. *The Open Biotechnology Journal*, 14(1), 52–58.
<https://doi.org/10.2174/1874070702014010052>
- Ruiz, C. (2020). Influencia del tipo de suelo sobre el crecimiento diamétrico anual de Juglans neotropica Diels y Eriotheca en los sectores del Parque Universitario Francisco Vivar Castro y la Reserva El Chilco, al sur de Ecuador. *Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables*.
- Sarma, P. J., & Mohanty, K. (2019). An insight into plant microbial fuel cells. In *Bioelectrochemical Interface Engineering* (pp. 137–148). wiley.
<https://doi.org/10.1002/9781119611103.ch8>
- Sarma, P. J., & Mohanty, K. (2023a). Development and comprehensive characterization of low-cost hybrid clay based ceramic membrane for power enhancement in plant based

- microbial fuel cells (PMFCs). *Materials Chemistry and Physics*, 296. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127337>
- Sarma, P. J., & Mohanty, K. (2023b). Effect of photoperiod, light source, growing media, anode placement and setup design on performance of plant microbial fuel cells (PMFCs) with oxygen reducing microalgal bio-cathode. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04265-y>
- Sathish-Kumar, K., Vignesh, V., & Caballero-Briones, F. (2017). Sustainable power production from plant-mediated microbial fuel cells. In *Sustainable Agriculture towards Food Security* (pp. 85–107). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6647-4_6
- Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Obaideen, K., Elsaid, K., Wilberforce, T., Maghrabie, H. M., & Olabi, A. G. (2021). Progress in plant-based bioelectrochemical systems and their connection with sustainable development goals. In *Carbon Resources Conversion* (Vol. 4, pp. 169–183). KeAi Publishing Communications Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2021.04.004>
- Tay, Z. H. Y., Ng, F. L., Ling, T. C., Iwamoto, M., & Phang, S. M. (2022). The use of marine microalgae in microbial fuel cells, photosynthetic microbial fuel cells and biophotovoltaic platforms for bioelectricity generation. In *3 Biotech* (Vol. 12, Issue 7). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s13205-022-03214-2>
- Trudy McKee, & James R. McKee. (2014). *Fotosíntesis | Bioquímica. Las bases moleculares de la vida, 5e | AccessMedicina | McGraw Hill Medical*. Bioquímica. Las Bases Moleculares de La Vida, 5e. <https://accessmedicina.mhmedical.com/content.aspx?bookid=1960§ionid=148096471>
- Tschörtner, J., Lai, B., & Krömer, J. O. (2019). Biophotovoltaics: Green power generation from sunlight and water. In *Frontiers in Microbiology* (Vol. 10, Issue APR). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00866>
- Villalobos Fabricio, & Dáttilo Wesley (Eds.). (2020). Briofitas. In *Biodiversidad del Santuario del Bosque de Niebla Xalapa, Veracruz* (Primera Edición, pp. 51–59). <https://libros.inecol.mx/index.php/libros/catalog/view/497/604/3051>

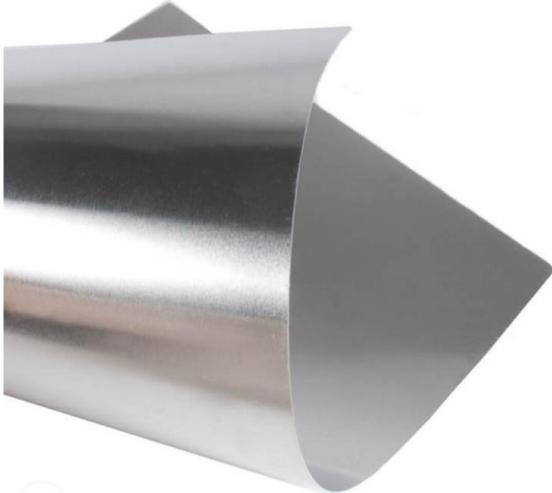
- Wang, C. T., Huang, Y. S., Sangeetha, T., Chen, Y. M., Chong, W. T., Ong, H. C., Zhao, F., & Yan, W. M. (2018). Novel bufferless photosynthetic microbial fuel cell (PMFCs) for enhanced electrochemical performance. *Bioresource Technology*, *255*, 83–87. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.086>
- Wang, J., Ren, K., Zhu, Y., Huang, J., & Liu, S. (2022). A Review of Recent Advances in Microbial Fuel Cells: Preparation, Operation, and Application. In *BioTech* (Vol. 11, Issue 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/biotech11040044>
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2016). *The nature and properties of soils*.
- Wetser, K., Sudirjo, E., Buisman, C. J. N., & Strik, D. P. B. T. B. (2015). Electricity generation by a plant microbial fuel cell with an integrated oxygen reducing biocathode. *Applied Energy*, *137*, 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.006>
- Yang, Z., Zhang, L., Nie, C., Hou, Q., Zhang, S., & Pei, H. (2019). Multiple anodic chambers sharing an algal raceway pond to establish a photosynthetic microbial fuel cell stack: Voltage boosting accompany wastewater treatment. *Water Research*, *164*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114955>
- Zapata Rodrigo. (2018). *Tipos de suelos: Caracterización de suelos arcillosos y limosos*. <https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/TIPOS%20DE%20SUELO.pdf>
- Zhang, S., Zheng, H., Zhou, L., Li, H., Chen, Y., Wei, C., Wu, T., Lv, W., Zhang, G., Zhang, S., Gong, Z., Jia, B., Lin, H., Gao, Z., Xu, W., & Ning, H. (2023). Research Progress of Micro-LED Display Technology. In *Crystals* (Vol. 13, Issue 7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/cryst13071001>
- Zhu, H., Wang, H., Zhang, Y., & Li, Y. (2023). Biophotovoltaics: Recent advances and perspectives. In *Biotechnology Advances* (Vol. 64). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108101>
- Zongtao Li, Z. L., Huiyu Wang, H. W., Binhai Yu, B. Y., Xinrui Ding, X. D., & and Yong Tang, and Y. T. (2017). High-efficiency LED COB device combined diced V-shaped pattern and remote phosphor. *Chinese Optics Letters*, *15*(4), 042301–042304. <https://doi.org/10.3788/col201715.042301>

11. Anexos

Anexo 1. Descripción técnica de los materiales utilizados

<p>Filamentos PLA de 1K, color gris y negro</p> <ul style="list-style-type: none">- Diámetro de filamento 1,75mm- Tolerancia +/- 0,01mm- Empacado al vacío- Peso neto 1 kilogramo por rollo- Temperatura de fusión 185 a 220 grados centígrados- Rapidez de impresión 50 a 100 mm/s- Estabilidad, resistencia, tolerancia- Compatible con todas las marcas de impresoras 3D	 <p>Two spools of PLA filament are shown. The top one is black and the bottom one is grey. Next to each spool is a 3D printed bust of a man's head, demonstrating the material's use in 3D printing. A small magnifying glass icon is visible in the top right corner of the image area.</p>
<p>Supercondensadores 1F a 5.5 V</p> <ul style="list-style-type: none">- Capacidad: 1F- Diámetro: 19mm- Altura: 6,5 mm- Material: Aluminio- Estilo de montaje: A través del orificio- Temperatura de funcionamiento 25°C a +70°C- Tolerancia: ±20%- Voltaje: 5,5 V	 <p>A yellow supercapacitor is shown, featuring a metal tab for mounting. The text 'BICCVP' is visible on the yellow casing.</p>
<p>Led SMD 3528</p>	

<ul style="list-style-type: none"> - Tipo de LED: SMD3528 - Color: Blanco frio (>5500K). - Luz emitida: 6-7 lm. - Ángulo de visión: 120º. - Voltaje de funcionamiento: 3 - 3,4v DC. - Consumo corriente: 20mA. - Temperatura de funcionamiento: - 40ºC / 100ºC. - Temperatura de soldadura: +260ºC (3 seg). 	
<p>Filtro de Grafito</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tamaño: Diámetro 3.937 in/3.93 pulgadas - Grosor: 0.118 in - Contenido de carbono: 98% o más - Tasa de absorción de humedad: 2% - Ambiente de uso: aire 662.0 °F - Vacío: 3,272.0 °F - Gas inerte: 4,802.0 °F - Resistencia específica: (Ω.mm²/m) - Conductividad térmica: 10 - 200 W/m·K - Conductividad eléctrica: 0.02 - 0.05 Ω·cm. 	
<p>Varillas de Carbono</p>	

<ul style="list-style-type: none"> - Longitud: 47±0,15 mm - Diámetro: 4±0,03 mm - Resistencia eléctrica: 0,5 Ω cm - Fuerza de ruptura: 350 kg/cm² - Conductividad térmica: 20-150 W/m·K, - Contenido de cera: 6-12 % - Ventilación de gas: (P=4kg/cm²) cm³/minuto - Fe: 0,5 Máx. % - Carbono fijo: 90 min % - Ceniza: 10 Máx. % 	
<p>Lámina de Aluminio</p> <ul style="list-style-type: none"> - Aluminio (puro o aleaciones 1050, 1100, 3003, 5052) - Espesor: 0,1 mm - Ancho y Longitud: 100 mm a 1000 mm de ancho, longitudes variables - Resistencia a la tracción: 70 MPa - 200 MPa - Dureza: 20 - 70 HB - Elongación: 1% - 30% - Densidad: Aproximadamente 2.7 g/cm³ - Conductividad térmica: Alrededor de 235 W/m·K - Conductividad eléctrica: Aproximadamente 37.7 x 10⁶ S/m - Coeficiente de expansión térmica: Aproximadamente 23.1 μm/m·K 	

Anexo 2. Registro del procedimiento en la construcción de las celdas PMFC

<p>1. Recolección del Musgo <i>Polytrichum</i></p>	<p>2. Mezcla de 250 gr. musgo <i>Polytrichum</i> con 1 litro de agua</p>
	
<p>3. Ensamblado de celda PMFC con electrodos</p>	<p>4. Riego uniforme con atomizador para proliferación de las especies microbiónicas del musgo</p>
	
<p>5. Registro de corriente de 7.66 mA a celda 9 en circuito abierto (mejor de los casos)</p>	<p>6. Registro de corriente de 653 uA a celda 1 circuito abierto (peor de los casos)</p>
	

7. Rellenado de piedras volcánicas a recipiente de plástico PLA para mejorar el filtrado del agua.



8. Plantación de la especie Crassulaceae “Patitas de rana” sobre tierra rica en sustrato orgánico.



9. Registro de corriente del circuito mixto de celdas PMFC (5.97 mA)



10. Registro de Voltaje del circuito mixto de celdas PMFC (4.26 V)



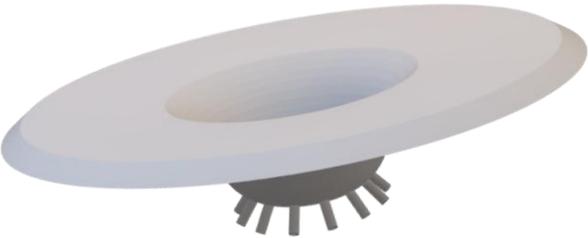
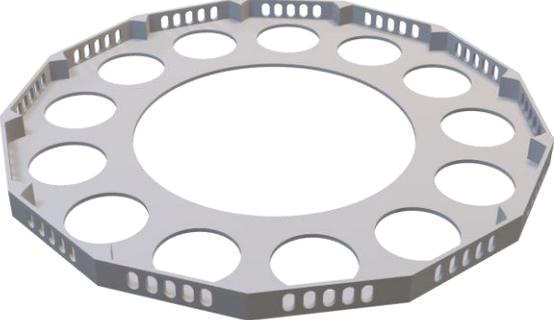
11. Montaje preliminar de la lámpara BPV



12. Lámpara BPV Final



Anexo 3. Registro del diseño e impresión 3D del prototipo

<p>1. Recipiente PLA 10cm - alto</p>	<p>2. Tapa superior tipo embudo para distribución de agua a las 13 macetas</p>
	
<p>3. Acople de la tapa superior tipo embudo</p>	<p>4. Cuerpo base para circuito y lámpara SMD</p>
	
<p>5. Soporte para los 13 Recipientes PLA</p>	<p>6. Base y Soporte del prototipo Final</p>
	

7. Impresión 3D por partes 40x40 cm



8. Pegado de las diferentes estructuras



Anexo 4. Certificado de traducción del resumen al idioma inglés



Dirección: Calle La Condamine 26-37 y Avenida PíoJaramillo Alvarado. Edificio Rosalía.
www.europeek.com.ec
europeekloja@gmail.com
Secretaría de Cualificaciones Profesionales y Gestión Artesanal Res. Nro. MDT-SCPGA-2023-0347
LOJA-ECUADOR

#YoSoyEuroPeek
I can do it

Loja 28 de Mayo de 2024

CERTIFICADO DE TRADUCCION

EUROpeek INSTITUTO DE IDIOMAS

CERTIFICA:

Haber realizado la traducción de español a inglés del resumen de la Tesis titulada: "**PROTOTIPO DE LAMPARA LED SUSTENTABLE CON ENERGIA BIOFOTOVOLTAICA**" de autoría de Luis Alfredo Azuero Jaramillo, portador de la cédula de identidad nro. 1105634008.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, facultando al interesado hacer uso del presente documento en lo que creyere conveniente.



Mg.Sc. Noralma Ordóñez Ortega
REPRESENTANTE LEGAL
EUROpeek INSTITUTO DE
IDIOMAS

R.U.C.: 1102404553001