UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

POTENCIAL ENERGÉTICO EN 03 TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANA INTEGRADAS A UN HUMEDAL CONSTRUIDO (CW-MFC)

Tesis para optar el título profesional de

INGENIERO AMBIENTAL

RADAI CORAIMA, BARRERA RENGIFO

SAMANTHA MILAGROS, MAGALLANES SANTA CRUZ

Pucallpa – Perú

2024

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
COMISIÓN DE GRADOS Y TÍTULOS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°186-2024-CGT-FCFyA-UNU

En la ciudad de Pucallpa, siendo las 11:00 a.m. horas del día viernes 02 de agosto del 2024, de acuerdo con el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Ucayali se reunieron los miembros del Jurado Evaluador en el Auditorio de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, siendo designados con Memo Múltiple 031-2024-UNU-FCsFyA – CGT, conformado por los siguientes docentes.

Dr. Gabriel Mercado Jauregui	Presidente
Dr. Noé Klever Guadalupe Baylón	Miembro
Dra. Zenayda Emilia Estrada Tuesta	Miembro

Se procedió a evaluar la sustentación de la tesis denominado: **POTENCIAL ENERGÉTICO EN 03 TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANA INTEGRADAS A UN HUMEDAL CONSTRUIDO (CW-MFC),** presentado por las Bachilleres **RADAI CORAIMA BARRERA RENGIFO** y **SAMANTHA MILAGROS MAGALLANES SANTA CRUZ**; asesoradas por el **Dr. DAVID LEÓN MORENO**. Habiendo finalizando la sustentación, se procedió a la formulación de preguntas por parte del jurado evaluador, las que fueron absueltas por las sustentantes, en consecuencia, la tesis fue **APROBADA** por **UNANIMIDAD,** y recomendación quedando expedito para el otorgamiento del **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL**, después de las correcciones respectivas de la tesis.
Siendo las 12:23 p.m. horas del mismo día se dio por culminado el acto académico, firmando los miembros en señal de conformidad.

Dr. Gabriel Mercado Jauregui

Dr. Noé Klever Guadalupe Baylón

Dra. Zenayda Emilia Estrada Tuesta

ACTA DE APROBACIÓN

La tesis fue aprobada por un Jurado Evaluador de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad Nacional de Ucayali, como requisito para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental.

Dr. Gabriel Mercado Jauregui
Presidente

Dr. Noé Klever Guadalupe Baylón
Miembro

Dra. Zenayda Emilia Estrada Tuesta
Miembro

Dr. David León Moreno
Asesor

Bach. Radai Coraima Barrera Rengifo
Tesista

Bach. Samantha Milagros Magallanes Santa Cruz
Tesista

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN INTELECTUAL

CONSTANCIA

ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

N° **V/0131-2024**.

La Dirección de Producción Intelectual de la Universidad Nacional de Ucayali, hace constar por la presente, que el trabajo académico de investigación, titulado:

"**POTENCIAL ENERGÉTICO EN 03 TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANA INTEGRADAS A UN HUMEDAL CONSTRUIDO (CW-MFC)**"

Autor(es)	:	**BARRERA RENGIFO, RADAI CORAIMA**
		MAGALLANES SANTA CRUZ, SAMANTHA MILAGROS
Facultad	:	**CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES**
Escuela	:	**ING. AMBIENTAL**
Asesor(a)	:	**Dr. LEON MORENO, DAVID**

Presenta un **porcentaje de similitud de 10%,** verificado en el Sistema Antiplagio COMPILATIO,

De acuerdo a los criterios de porcentaje establecidos en el artículo 9 de la DIRECTIVA DE USO DEL SISTEMA ANTIPLAGIO, el cual indica que todo trabajo de investigación no debe superar el 10%. **En tal sentido, se declara, que el presente trabajo de investigación: SI Contiene un porcentaje aceptable de similitud,** procediéndose a emitir la presente Constancia de Originalidad de Trabajo de Investigación (COTI) a solicitud del asesor.

En señal de conformidad se firma y sella el presente documento.

Fecha: 12/03/2024

Mg. JOSÉ MANUEL CÁRDENAS BERNAOLA
Director de Producción Intelectual

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN INTELECTUAL

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Repositorio de la Universidad Nacional de Ucayali

Yo, Radai Coraimo Barrera Rengifo

Autor de la tesis titulada : Potencial energético en 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC)

Sustentada el año 2024

Asesor(a): David Leon Moreno

Facultad: Ciencias Forestales y Ambientales

Escuela Profesional: Ingeniería Ambiental

Autorizo la publicación:

PARCIAL [ ] TOTAL [X]

De mi trabajo de investigación en el Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ucayali (www.repositorio.unu.edu.pe), bajo los siguientes términos:

Primero: Otorgo a la Universidad Nacional de Ucayali licencia no exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público en general mi tesis (incluido el resumen) a través del Repositorio Institucional de la UNU, en formato digital sin modificar su contenido, en el Perú y en el extranjero; por el tiempo y las veces que considere necesario y libre de remuneraciones.

Segundo: Declaro que la tesis es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, por tanto me encuentro facultado a conceder la presente autorización, garantizando que la tesis no infringe derechos de autor de terceras personas, caso contrario, me hago único(a) responsable de investigaciones y observaciones futuras, de acuerdo a lo establecido en el estatuto de la Universidad Nacional de Ucayali, la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria y el Ministerio de Educación.

En señal de conformidad firmo la presente autorización.

Fecha: 22 / 08 / 2024

Email: radai.barrera.rengifo@gmail.com Firma:

Teléfono: 948 657 528 DNI: 75 98 36 01

UNIVERSIDAD NACIONAL DE UCAYALI

DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN INTELECTUAL

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Repositorio de la Universidad Nacional de Ucayali

Yo, Samantha Milagros Magallanes Santa Cruz

Autor de la tesis titulada : Potencial energético en 03 tipos de Celdas de Combustible Microbiana integradas a un Humedal Construido (CW-MFC)

Sustentada el año 2024

Asesor(a): Dr. David León Moreno

Facultad: Ciencias Forestales y Ambientales

Escuela Profesional: Ingeniería Ambiental

Autorizo la publicación:

PARCIAL [ ] TOTAL [X]

De mi trabajo de investigación en el Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ucayali (www.repositorio.unu.edu.pe), bajo los siguientes términos:

Primero: Otorgo a la Universidad Nacional de Ucayali licencia no exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público en general mi tesis (incluido el resumen) a través del Repositorio Institucional de la UNU, en formato digital sin modificar su contenido, en el Perú y en el extranjero; por el tiempo y las veces que considere necesario y libre de remuneraciones.

Segundo: Declaro que la tesis es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, por tanto me encuentro facultado a conceder la presente autorización, garantizando que la tesis no infringe derechos de autor de terceras personas, caso contrario, me hago único(a) responsable de investigaciones y observaciones futuras, de acuerdo a lo establecido en el estatuto de la Universidad Nacional de Ucayali, la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria y el Ministerio de Educación.

En señal de conformidad firmo la presente autorización.

Fecha: 22 / 08 / 2024

Email: smagallanes.sc@gmail.com Firma: Samantha

Teléfono: +51 928118306 DNI: 75432299

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación, que me llevará a obtener el título de ingeniera, a mi familia, hermanos y a quien tuvo una influencia positiva en este proceso.

Samantha.

Dedico este trabajo a Dios por ser mi fortaleza, a mis madres, Elgiva y Rachel, cuya paciencia, dedicación y ardua labor en mi educación han orientado esta travesía académica, a mi querida hermana, Danica, cuyo apoyo ha sido fundamental.

Coraima.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de Ucayali, por acogernos durante 5 años, y por brindarnos la oportunidad de conocer Docentes que admiramos y guardamos un gran cariño. De la misma manera, es pertinente expresar nuestra más sincera gratitud por el financiamiento otorgado para la ejecución de este proyecto de investigación.

Agradecemos a la Facultad de Ciencias Forestales y ambientales, con mención especial a la Escuela de Ingeniería Ambiental. También nuestro reconocimiento a los responsables del Laboratorio de Calidad de Agua por facilitarnos los ambientes durante la ejecución de esta tesis. De igual manera, expresamos nuestra gratitud a los responsables del Laboratorio de Ecología y Medio Ambiente de la Facultad de Ciencias de la Salud. Su colaboración y disposición han sido fundamentales para el éxito de este trabajo académico.

A nuestro asesor el Dr. David León Moreno, por su motivación, su paciencia y respaldo en todo momento y junto a él a nuestro co – asesor el Lic. Deciderio Plácido Vásquez, por su orientación en este proyecto desafiante.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA vii

AGRADECIMIENTO viii

ÍNDICE GENERAL ix

ÍNDICE DE TABLAS xi

ÍNDICE DE FIGURAS xii

RESUMEN xiii

ABSTRACT xiv

INTRODUCCIÓN xv

CAPÍTULO I 17

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 17

1.1. Descripción del problema 17

1.2. Formulación del problema 18

1.3. Objetivos de la investigación 19

CAPÍTULO II 21

MARCO TEÓRICO 21

2.1. Antecedentes 21

2.2. Base teórica 29

CAPÍTULO III 50

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN 50

3.1. Método de investigación 50

3.2. Área de estudio 54
3.3. Población y muestra 55
3.4. Procedimiento de recolección de datos 55
3.5. Técnicas e instrumentos para recolección de datos 57
3.6. Procesamiento para recolección de datos 59
3.7. Tratamiento de datos 59
CAPÍTULO IV 60
RESULTADOS Y DISCUSIÓN 60
4.1. Resultados 60
4.2. Discusión 72
4.3. Limitaciones de la investigación 75
CAPÍTULO V 76
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 76
5.1. Conclusiones 76
5.2. Recomendaciones 77
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 79
ANEXOS 95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de sistemas CW-MFC con y sin plantas. 33

Tabla 2 Clasificación de materiales usados para electrodos según sean carbono o grafito 37

Tabla 3 Tipos de matriz de matriz según el material usado 40

Tabla 4 Resultados de monitoreo de calidad de agua en la Laguna Yarinacocha 48

Tabla 5 Descripción detallada de materiales, equipos e insumos a usar 51

Tabla 6 Descripción de variables 52

Tabla 7 Factor y niveles 53

Tabla 8 Ficha de recolección de datos de potencial energético generado 54

Tabla 9 Cuadro de Prueba de Kruskal-Wallis 54

Tabla 10 Descripción de procedimientos 56

Tabla 11 Ficha de recolección del potencial energético por día 58

Tabla 12 Estadísticos descriptivos 64

Tabla 13 Estadísticos descriptivos 67

Tabla 14 Prueba de normalidad para densidad de potencia 68

Tabla 15 Medianas de los datos de densidad de potencia 69

Tabla 16 Prueba de Kruskal-Wallis para densidad de potencia 69

Tabla 17 Medianas de los datos de densidad de potencia 70

Tabla 18 Análisis post-hoc de Dunn-Bonferroni para densidad de potencia 71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Variación de la tensión eléctrica con relación al tipo de Sistema CW-MFC..... 36

Figura 2 Diseño de unidades experimentales..... 60

Figura 3 Variación de la tensión eléctrica con relación al tipo de Sistema CW-MFC..... 62

Figura 4 Diagrama de cajas simple de tensión eléctrica por tipo de Sistema CW-MFC ... 63

Figura 5 Variación de la densidad de potencia con relación al tipo de Sistema CW-MFC 65

Figura 6 Diagrama de cajas simple de densidad de potencia por tipo de Sistema CW-MFC 66

RESUMEN

El propósito de esta investigación fue determinar la densidad de potencia de tres tipos de celdas de combustible microbiana integradas en un humedal construido (CW-MFC). El estudio tuvo un enfoque metodológico básico, con un alcance descriptivo y un diseño experimental de grupos paralelos. Se emplearon tres CW-MFC con flujo vertical descendente y ascendente, cada uno diferenciado por las especies vegetales: huama amarilla (*Limnocharis flava),* putu putu (*Eichhornia crassipes*) y lenteja de agua (*Lemna minor*). Los electrodos estaban constituidos por varillas de grafito de 6 cm de longitud y 0,3 cm de diámetro, adheridas al cable de cobre. La operación duró 15 días, con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 5 días. Los resultados indican que la huama amarilla (*Limnocharis flava*) logró una densidad de potencia máxima promedio de 133,85 mW/m² y una mínima promedio de 43,45 mW/m², con una densidad de potencia promedio total de 78,515 mW/m². Se concluye que el sistema con *Limnocharis flava* exhibió el mejor rendimiento en términos de densidad de potencia, subrayando la importancia de la selección de la especie vegetal para optimizar la generación de energía en sistemas CW-MFC.

Palabras clave: Celda de combustible microbiana; Humedal construido; Potencial energético; *Limnocharis flava; Eichhornia crassipes; Lemna minor.*

ABSTRACT

The purpose of this research was to determine the power density of three types of microbial fuel cells integrated into a constructed wetland (CW-MFC). The study had a basic methodological approach, with a descriptive scope and a parallel-group experimental design. Three CW-MFCs with vertical downflow and upflow were used, each differentiated by plant species: yellow burhead (*Limnocharis flava*), water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), and duckweed (*Lemna minor*). The electrodes were made of graphite rods 6 cm in length and 0.3 cm in diameter, attached to a copper wire. The operation lasted 15 days, with a hydraulic retention time (HRT) of 5 days. The results indicate that the yellow burhead (*Limnocharis flava*) achieved a maximum average power density of 133.85 mW/m² and a minimum average of 43.45 mW/m², with a total average power density of 78.515 mW/m². It is concluded that the system using *Limnocharis flava* exhibited the best performance in terms of power density, highlighting the importance of selecting the appropriate plant species to optimize energy generation in CW-MFC systems.

Keywords: Microbial fuel cell; Constructed wetland; Energy potential*; Limnocharis flava*; *Eichhornia crassipes*; *Lemna minor*.

INTRODUCCIÓN

1.1 La problemática del tema en estudio

La presente investigación se centró en el estudio de la integración de celdas de combustible microbiana en humedales construidos (CW-MFC). Este enfoque implica la combinación de plantas, soluciones nutritivas, microorganismos, y circuitos eléctricos en un sistema único que ha presentado una atención significativa en los últimos años. Sin embargo, persisten numerosas incógnitas en la investigación con respecto al diseño óptimo de estos sistemas integrados, es importante realizar una selección adecuada de los componentes que resultan fundamentales en el diseño y construcción de los CW-MFC, teniendo en cuenta para ello las diferentes condiciones propias de la región, dentro de ellas los tipos de vegetación existentes.

En base a ello, surgió la necesidad de investigar el comportamiento de las celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC) aplicadas a diferentes especies vegetales locales, esto con el fin de determinar la densidad de potencia que tiene este sistema como fuente de energía mediante las siguientes especies locales: la huama amarilla *(Limnocharis flava),* putu putu *(Eichhornia crassipes)* y lenteja de agua (*Lemna minor*).

Es por ello que, para el desarrollo de la investigación, se formuló el siguiente problema general: "¿Cómo es la densidad de potencia en 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC)?" Además, se plantearon las siguientes interrogantes específicas: "¿Cuál es la densidad de potencia en una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal huama amarilla *(Limnocharis flava)*?" y "¿Cuál es la densidad de potencia en una celda de

combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal putu putu *(Eichhornia crassipes)*?" y "¿Cuál es la densidad de potencia en una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal hierba imperial lenteja de agua (*Lemna minor*)? "

1.2 Importancia

Al estudiar la densidad de potencia de estos sistemas integrados en tres especies de plantas locales diferentes, se abre la posibilidad de optimizar estos sistemas considerando las condiciones específicas de la región. Los resultados obtenidos contribuirán al conocimiento científico sobre la eficiencia energética de este sistema en un contexto regional específico, contribuyendo así al conocimiento para el desarrollo de soluciones de producción de energía sostenible.

1.3 Propósitos, objetivos y las partes de la Tesis

El objetivo de esta investigación fue determinar la densidad de potencia de 03 tipos de celdas de combustible microbiana integrada a un humedal construido (CW-MFC). Para lograr este propósito se estableció como hipótesis que la densidad de potencia en los 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC), no son iguales. Esta investigación empleó el método cuantitativo y el diseño experimental, además empleará la Prueba de Kruskal-Wallis un factor para contrastar las hipótesis planteadas. Se espera que los resultados de este estudio contribuyan al conocimiento sobre la densidad de potencia de las celdas de combustible microbiana integradas a humedales construidos como una fuente de energía renovable y sostenible, empleando plantas locales.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

Los microorganismos electrogénicos tienen la capacidad de producir electricidad a través de sus reacciones químicas y físicas, los cuales se pueden encontrar en los sedimentos de los cuerpos de agua (ríos, lagunas, humedales etc.) (Tito & Castillo, 2019).

Por su parte, los Humedales Construidos (CW)[1] se caracterizan por presentar una interacción natural entre microorganismos y vegetales, esta relación de dependencia es un beneficio aprovechable, debido a que los vegetales generan exudados, en otras palabras, restos orgánicos, que son empleados por los microorganismos para producir electrones (Kabutey et al., 2019).

Las raíces de las plantas, rizomas, por su lado, al estar presentes en el régimen superior del Humedal Construido (CW), transfieren oxígeno de la atmósfera al interior del lecho filtrante. Además, las raíces de las plantas crean una rica red de micrositios aeróbicos en su vecindad y, por ende, retienen las condiciones aeróbicas en el régimen superior (Gorgoglione y Torretta, 2018). Es así que brindan las condiciones aeróbicas para el adecuado gradiente redox, teniendo importancia para ello el tipo de macrófita empleada.

Por otro lado, las Celdas de Combustible Microbiana (MFC)[2] son una tecnología que genera energía eléctrica gracias a la oxidación, por parte de los microorganismos, de la materia orgánica presente en la solución nutritiva (materia descompuesta, agua residual

[1] CW (por sus siglas en inglés: Constructed Wetland)
[2] MFC (por sus siglas en inglés: Microbial Fuel Cells)

sintética, agua residual, etc.), en la cual se transfieren los electrones producidos de un electrodo ubicado en la cámara anódica, hasta un electrodo ubicado en la sección catódica.

La fusión de estos dos procesos forma lo que se conoce como celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido (CW-MFC), en la que se asocian las especies vegetales, microorganismos, solución nutritiva y circuito eléctrico como parte de un mismo sistema.

Como parte del diseño del sistema, se presentan ciertas incógnitas, entre las cuales se incluye la elección de la especie vegetal y su rendimiento. A nivel nacional e internacional, existen estudios que documentan la aplicación de la celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido " CW-MFC " utilizando diversas especies. Sin embargo, carecemos de investigaciones que se ajusten a las características de nuestro entorno local, con el fin de determinar el potencial que tiene este sistema como fuente de energía.

Es así que mediante este proyecto se quiere conocer la energía producida por este sistema “CW-MFC”, utilizando tres especies vegetales, en otras palabras, empleando macrófitas locales, tales como huama amarilla *(Limnocharis flava)*, putu putu *(Eichhornia crassipes)* y lenteja de agua (Lemna minor).

1.2. Formulación del problema

Debido a la problemática descrita se plantea las siguientes preguntas de investigación:

1.2.1. Problema general

¿Cómo es la densidad de potencia en 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC)?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cómo estarán conformados los 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC)?
- ¿Cuál es la densidad de potencia en una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal huama amarilla *(Limnocharis flava)*?
- ¿Cuál es la densidad de potencia en una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal putu putu *(Eichhornia crassipes)*?
- ¿Cuál es la densidad de potencia en una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal lenteja de agua *(Lemna minor*)?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Determinar la densidad de potencia de 03 tipos de celdas de combustible microbiana integrada a un humedal construido (CW-MFC).

1.3.2. Objetivos específicos

- Construir 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC) a nivel laboratorio.
- Determinar la densidad de potencia de una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal huama amarilla *(Limnocharis flava)*.
- Determinar la densidad de potencia de una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal putu putu *(Eichhornia crassipes)*.

- Determinar la densidad de potencia de una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal lenteja de agua *(Lemna minor*).

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

Ge et al. (2020) en su estudio titulado *Bioenergy generation and simultaneous nitrate and phosphorus removal in a pyrite-based constructed wetland-microbial fuel cell.,* con enfoque cuantitativo y experimental, construyeron cuatro sistemas (CW, PCW, CW-MFC y PCW-MFC) de flujo descendente vertical, en los que los electrodos estuvieron conformados por fieltro de fibra de carbono (12 cm de ancho, 1 mm de espesor), distanciados en 30 cm, y como especie vegetal usaron *Canna indica*. El sistema empleó una resistencia de 1000 Ω, tiempo de operación de 180 días (2 periodos), y TRH de 6 horas. Sus resultados indican que las densidades de potencia máximas se obtuvieron para el PCW-MFC, siendo 35,9% y 57,6% superiores en los dos periodos, respectivamente, a los otros sistemas. El PCW-MFC obtuvo sus máximas densidades de corriente y potencia con valores de 47,77 mA/m2 y 6,74 mW/m 2.

Por su parte, Gonzales (2019), en su investigación titulada *Generación de energía a partir del tratamiento de aguas servidas mediante la integración de una celda de combustible microbiana en un humedal construido,* cuyo enfoque fue cuantitativo y experimental, construyó 3 sistemas a) HC, b) P/CW-MFC, c) NP/CW-MFC sin vegetación. Cuyo TRH fue de 7 - 10 días, tasas de carga orgánica de 4,8–7,9 g DQO/m2·d, y periodo de operación de 180 días, aplicando una resistencia de 1000 ohm para electrodos de carbón activado granular, y como especie vegetal usaron *Schoenoplectus californicus*. Los resultados obtenidos indican

que el sistema de humedal plantado integrado con CCM generó 30 % más electricidad que el sistema no plantado, obteniendo una densidad de potencia máxima de 8,6 mW/m2; además se resalta que cuando el sistema radicular invade la zona anódica afecta el rendimiento porque ocasiona el aumento de la resistencia interna.

Wang et al. (2019), realizaron la investigación *Electricity production and the analysis of the anode microbial community in a constructed wetland-microbial fuel cell,* con un diseño experimental, para ello construyeron tres humedales artificiales de flujo vertical idénticos, con la especie vegetal *Ipomoea aquatica*, el sistema estuvo alimentado con aguas residuales sintéticas (normales; sin amonio y sin nitratos), a diferentes concentraciones por 6 meses. Los electrodos contaron con 10 cm de alto, compuestas de gránulos de carbón activado y malla de acero inoxidable, conectados mediante conductor de cobre y a una resistencia de 1000 Ω. Sus resultados indican que la concentración de DQO juega un papel importante en la generación de electricidad, observando que la máxima tensión de circuito abierto (775,63 mV) y densidad de potencia (0,628 W m-3) se obtuvieron en el sistema que no empleó nitratos, con un TRH de 3 días.

Tang et al. (2019), en la investigación *Towards concurrent pollutants removal and high energy harvesting in a pilot-scale CW-MFC: Insight into the cathode conditions and electrodes connection.,* aplicaron una metodología a nivel experimental a escala piloto. Construyeron dos sistemas CW-MFC, en uno aplicaron conexión en paralelo y en otra combinada, en ambos la matriz de soporte consistió en lodo de alumbre deshidratado, lodo activado y grava, se usó agua residual sintética, para los electrodos se usó malla de acero inoxidable y fieltro de fibra de carbón, los ánodos se ubicaron secuencialmente debajo del cátodo a (45; 35; 25 y 15 cm). Los resultados indican que en la conexión en paralelo la densidad de potencia (mW/m2) es mejor a 35 cm de distancia entre desde el sistema de

aireación, presentando valores como (1,55 en condiciones de aireación, 3,09, circulación, y 7,99, aireación y circulación).

Saz et al. (2018) en su estudio *Effect of vegetation type on treatment performance and bioelectric production of constructed wetland modules combined with microbial fuel cell (CW-MFC) treating synthetic wastewater*, con enfoque experimental, construyeron 5 módulos de CW-MFC con 4 especies de macrofitas (*T. latifolia* (M1), *T. angustifolia* (M2), *J. gerardii* (M3), *C. divisa* (M4), y testigo sin plantar (M5)), consideraron una densidad de planta de 10 rizomas/m2, emplearon lodos para los electrodos y agua residual sintética. El cátodo se ubicó 5 cm por debajo de la superficie y el ánodo de 32 cm2, 20 cm debajo del cátodo, ambos se conectaron con alambres de cobre aislados y con una resistencia de 1000 Ω. El TRH fue de 4 días, y se operó el sistema por 88 días. Los resultados indican que la máxima densidad de potencia 7,47 ± 13,7 mW/m2 se obtuvo con *Typha angustifolia*, por lo que recomiendan su uso, debido a que aumenta la actividad de las bacterias electrogénicas.

Xu et al. (2018b) en su estudio *Applying multiple bio-cathodes in constructed wetland-microbial fuel cell for promoting energy production and bioelectrical derived nitrification-denitrification process,* cuyo enfoque fue experimental, empleó lodos de digestión anaeróbica y lodos activados como sustrato, el ánodo consistía en una capa de gránulos de grafito (30 mm de altura), y 3 cátodos de filtro de carbono con 70 mm de diámetro, ambos distanciados en 100 mm, conectados mediante alambre de titanio a 1000 Ω. Los resultados indican que a medida que el número de biocátodos aumentó de 1 a 3, la densidad de potencia máxima del sistema mostró un aumento notable de 12,56 a 26,16 mW/m 2, concluyendo que el mayor número de biocátodos contribuyó a lograr una mayor potencia de salida.

Xu et, al. (2018a), realizaron la investigación *Influence of glass wool as separator on bioelectricity generation in a constructed wetland-microbial fuel cell,* con un diseño experimental a nivel laboratorio. Construyeron (02) sistemas CW-MFC, alimentados de agua residual sintética, usaron carrizo como vegetal, tanto para el cátodo y ánodo usaron fieltro de carbono, ubicados a diferentes distancias (2; 5 y 10 cm) respectivamente, la única variable fue la implementación de un separador de lana de vidrio (0,02 m de espesor). Después de 131 días, los resultados mostraron que el voltaje más alto se logró en el sistema sin separador (465,7 mV) con espacio entre electrodos de 5 cm, así mismo, la densidad de potencia mayor (66,22 mW/m2) se registró en el sistema sin separador con un espaciado de 2 cm entre electrodos, frente al sistema con separador (17,14 mW/m2).

Xie et al. (2018), realizaron la investigación *Degradation of nitrobenzene containing wastewater by a microbial-fuel-cell-coupled constructed wetland.,* la metodología que aplicaron es la de un diseño experimental a nivel laboratorio. Construyeron (01) sistema CW-MFC, usaron grafito tanto para el cátodo y ánodo, la distancia entre estos fue (0,18; 0,13 y 0,8 m) respectivamente, la matriz de soporte estaba compuesta por grava, arena y lodo de aluminio, usaron jacinto de agua como vegetal, y agua residual sintética. Los resultados demostraron que el máximo porcentaje de eliminación de nitrobenceno fue 92.89%, en un tiempo de 24 horas, y la remoción de demanda química de oxígeno (DQO) osciló entre 67,92% y 78,30%, por otro lado, se determinó que el voltaje máximo se obtuvo a una distancia de 0,13 m entre electrodos, entre 240 y 270 mV.

Xu et al. (2017) en su artículo titulado *First study to explore the feasibility of applying microbial fuel cells into constructed wetlands for COD monitoring*, con un diseño experimental, construyeron humedales artificiales, emplearon *Phragmites australis* como especie vegetal, el trabajo se realizó a escala de laboratorio empleando como sustrato Lodo

de Alumbre Deshidratado (DAS) de una PTAR. El material del ánodo y cátodo fue malla de acero inoxidable, estos estuvieron conectados mediante un cable de titanio a través de un circuito exterior con una resistencia de 1000 Ω. Se empleó un mes para la inoculación y otro mes para la estabilización del sistema. Se emplearon aguas residuales para la alimentación en modo por lotes. Se obtuvo como resultado que la máxima densidad de potencia fue de 1413,25 mW para 700 mg/L de DQO, y el máximo voltaje generado fue de 833 mV para 1000 mg/L de DQO.

Araneda (2016), realizó la tesis "Humedales construido para tratamiento sustentable de aguas grises: efecto del acople a una celda de combustible microbiana" de carácter experimental. Para ello construyó (04) sistemas, usó gravilla y zeolita como matriz de soporte, grafito sintético granular como electrodo, conectadas a una resistencia externa de 1kΩ, *P. australis* como vegetación y agua gris sintética como sustrato. Como resultado se obtuvo que el sistema por sí solo producía a lo sumo 35,5 mW/m3, mientras que si estaba conectado a un potenciostato alcanzaba el valor de 767,4 mW/m3.

Fang et al. (2016), realizaron la investigación *Effects of electrode gap and wastewater condition on the performance of microbial fuel cell coupled constructed wetland,* con diseño experimental. Construyeron (08) sistemas, divididos en dos grupos de (04), uno para el tratamiento de agua residual sintética compuesta de celulosa y otra, por un reactivo (ABRX3), para ambos grupos usaron carbón activado granular como electrodos con distancias entre sí de (3,3; 6,6; 13,2 y 19,8 cm), usaron *Ipomoea Aquatica* como especie de planta, resistencia interna fue de 1kΩ, con un TRH (03) días. Los resultados demostraron que el agua compuesta por glucosa generó mayor cantidad de energía, a una distancia de 6,6 cm la densidad de potencia fue (0,16±0,03 W/m3) con una resistencia interna de (958,14 ±032 Ω).

Oon et al. (2017) realizó un estudio titulado *Role of macrophyte and effect of supplementary aeration in up-flow constructed wetland-microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and energy recovery,* cuyo enfoque fue experimental, se construyeron humedales artificiales a escala de laboratorio con lodo activado de una fábrica como sustrato y *Elodea nuttallii* como especie vegetal. Los electrodos de carbón activado, estuvieron conectados mediante alambres de cobre a una resistencia de 1000 Ω. Presentando en un sistema con tres ánodos y un cátodo separados 15 cm cada uno (desde el fondo), el cual contó con un rociador de aireación 8 cm debajo del cátodo. Los resultados indican que la mayor densidad de potencia fue de 184,75 ± 7,50 mW/m 3 con una aireación 600 mL/min, lo cual se puede atribuir a suficiente oxígeno como aceptor de electrones.

Corbella et al. (2016) realizaron un estudio titulado *Long-term assessment of best cathode position to maximise microbial fuel cell performance in horizontal subsurface flow constructed wetlands,* cuyo enfoque fue experimental, emplearon dos MFC integrados en un humedal ya existente para el tratamiento secundario de aguas residuales municipales, usando *Phragmites australis* como especie vegetal. Los electrodos estuvieron conformados por varillas cilíndricas de grafito cubiertas con malla de acero inoxidable. La posición del cátodo varió del nivel del agua a 5 cm por debajo, los ánodos se ubicaron a 10 cm por debajo de estos. El circuito externo se cerró con 1000 Ω, mediante cables de cobre. Los resultados indican que la principal fuente de limitación del rendimiento de MFC es el rendimiento de los cátodos, recomendando un espesor de la capa de grafito de mínimo 10 cm.

Xu et al. (2016) en su estudio *Effects of influent organic loading rates and electrode locations on the electrogenesis capacity of constructed wetland-microbial fuel cell systems*, cuyo enfoque fue experimental, construyeron 3 sistemas, usando como especie vegetal *Canna indica*, emplearon lodos activados para los electrodos, cuyo material fue de

carbón activado granular cubierto de malla de acero inoxidable. Los electrodos se conectaron a una resistencia externa de 500 Ω por alambre de titanio, el modo de flujo de agua residual fue continuo con un TRH de 24 h y tiempo de operación de 3 a 5 días. Los resultados indican que la máxima densidad de potencia obtenida fue de 11,21 mW·m2 en el sistema c, explicándose por la influencia de la profundidad de las raíces de la planta que secretan oxígeno.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Gómez y Medina (2021), realizó la investigación *Bioelectricidad generadas por pilas de combustible microbiana de hierbabuena (Mentha spicata) y cinta (Chlrophytum comosum) - Yanacancha - Chupaca - 2021*, de carácter aplicativo y enfoque cuantitativo. Construyeron (03) pilas de combustible microbiana para cada especie de planta, regadas con agua potable, usaron grafito para los electrodos. Posteriormente a 7 días de evaluación, se obtuvo como resultado que el sistema que tenía la especie cinta alcanzó 505,45 mV, un valor alto en comparación a los 245,37 mV producidos por el sistema que empleó hierbabuena.

Por su parte, Damián (2021) realizó un estudio titulado *Evaluación de la producción de electricidad mediante una pila de combustible microbiana en un humedal,* cuyo enfoque fue cuantitativo y experimental, presentó un diseño factorial de 3: distancia, volumen, tiempo; y 2 niveles por cada factor: 10 - 20 cm de distancia, 100 mL - 200 mL de volumen, 15 - 30 días de tiempo. Empleó 20 días de aclimatación de la totora, una resistencia constante de 1000 Ω, y un total de 40,8 cm2 de área para los electrodos circulares compuestos de grafito, *Typha latifolia L*. fue usada como especie vegetal. Obtuvo como resultado un valor máximo para la densidad de potencia de 273,23 mW/m2, con un voltaje de 105,6 mV,

resultantes de la combinación de factores empleando una distancia de separación de electrodos de 10 cm, volumen de 100 mL y a los 15 días de medición.

Llana (2020), realizó la investigación *Evaluación de las celdas de combustible planta-microbiana en la generación de energía eléctrica para iluminar una habitación de una vivienda rural*, de tipo aplicada, nivel predictivo, con diseño factorial 3x4 según los diferentes suelos (franco arenoso, franco arcilloso arenoso y turba) y el porcentaje de humos (0; 10; 20 y 30%). Construyó (36) sistemas, usó fresa como vegetación, grafito lead 2B como electrodo. Detrás de 5 meses de operación, los resultados mostraron que la mezcla de turba con 30% de humos presentó un valor superior de 0,69 V frente a las otras mezclas, a partir de ello, se determinó que se necesitan 05 sistemas para iluminar una habitación de vivienda rural de 25 leds.

Ramos (2019), realizó la tesis *Evaluación de la celda de combustible planta-microbiana (PMFC) y las condiciones de su entorno en la generación de energía eléctrica*, de carácter experimental. Construyó (06) muestras de celdas de combustible planta-microbiana (PMFC), con planta de maíz, suelo como matriz de soporte, agua potable como solución líquida, y como electrodos de 20 cm2, grafito en el ánodo y alcayata de acero en el cátodo. Luego de un periodo de operación de 46 días, se determinó los valores de: la intensidad eléctrica promedio (0,24 m), potencia (0,059 mW) y densidad de potencia (29,77 mW/m2).

2.1.3. Antecedentes locales

Rubina (2020), en su tesis *Determinación de la cantidad de energía eléctrica a partir de electrones libres, producto de la actividad metabólica de los microorganismos, en las plantas de palma aceitera (Elaeis guineensis), cacao (Theobroma cacao) y césped torourco*

(Axonopus compresus), en la Universidad Nacional de Ucayali, región Ucayali, 2017, realizó una investigación experimental con un enfoque cuantitativo. Construyó (06) tipos de bioceldas con (03) repeticiones cada una, según el tipo de planta y material del electrodo (grafito y alambre galvanizado; cobre y aluminio). El resultado demostró que los valores máximos de voltaje (0,547 V), corriente (0,174 mA), potencia (0,094 mW) y densidad de potencia (23,30 mW/m2), se logró en el cultivo de cacao con el grafito y alambre galvanizado como electrodos.

2.2. Base teórica

2.2.1. Celda de combustible microbiana (MFC)

La Celda de Combustible Microbiana (CCM, por sus siglas en español), conocida en inglés como Microbial Fuel Cell (MFC), es un sistema que oxida materia orgánica e inorgánica a través de microorganismos electroquímicos, de manera que producen electricidad (Logan et al. 2006), esto es resultado de la diferencia del potencial eléctrico entre el ánodo, ubicado en la cámara anaeróbica, también llamada anódica, y el cátodo, posicionado en la cámara aeróbica o catódica (Yadav, 2012). En la cámara anódica los microorganismos electroactivos degradan la materia biodegradable liberando electrones y protones, los primeros son transferidos a la cámara catódica por un circuito externo, conformado por una resistencia y cables de conducción, los cuales son capturados por el cátodo que al combinarse con O2 forman agua (Logan et al., 2006; Yadav, 2012).

Es una tecnología biológica y electroquímica (Beyenal et al., 2021), por otro lado, Jayapriyaa (2022) menciona que tiene un carácter renovable que trata la materia orgánica, generando energía eléctrica, y que además, contribuye a la disminución de las emisiones de

CO_2, por lo que que es más eficiente al aplicarse para el tratamiento de aguas residuales con alta carga orgánica (Ramírez-Vargas et al., 2018).

La acción de los microorganismos eléctricos es vital para el correcto funcionamiento de este sistema. Las celdas de combustible logran obtener energía eléctrica a partir de la energía química, como respuesta a la actividad metabólica de las bacterias que obtienen electrones de las sustancias químicas presentes en las aguas residuales (Mathuriya et al., 2018), esto debido a que pueden realizar una transferencia extracelular de electrones al cátodo por medio de sus nanocables o también llamados pelos conductores (Aiyer, 2020).

Aunque en otro sentido, la principal desventaja de la celda de combustible microbiana es el límite de sustrato, existe una gran demanda por parte de los microorganismos que necesitan seguir alimentándose para generar energía, esto representa una interrupción para el funcionamiento continuo del mismo (Maddalwar et al., 2021).

2.2.2. Celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido (CW-MFC)

Al igual de una celda de combustible microbiana, una Celda de Combustible Microbiana integrada a un Humedal Construido "CW-MFC" (por sus siglas en inglés: Constructed Wetland Microbial Fuel Cells), también está compuesta por una sección anódica y catódica, cada una integrada por electrodos según corresponda, así mismo comparten la importancia de los microorganismos electrógenos, pero la gran diferencia es que este último incorpora a su sistema la vegetación, de manera que, adquiere los beneficios del proceso de fotosíntesis (Guadarrama-Pérez et al., 2019). Así mismo, Sudirjo (2020) afirma que en este sistema no es imprescindible una membrana que separe la parte del ánodo y cátodo, debido a que la correcta distancia entre ambos electrodos puede sustituirlo.

Los sistemas integrados de humedales construidos y celdas de combustible microbiana generan electricidad por medio de las raíces de las plantas (Helder, 2012). La energía solar obtenida por el proceso de fotosíntesis es usada para fijar CO2 en las hojas de las plantas en forma de carbohidratos, finalmente el CO2 es transferido a la raíz (Strik, 2008).

A lo largo de su ciclo de vida, la vegetación genera células muertas, mucílagos y exudados. Estos materiales, al pasar por un proceso de oxidación debido a la acción de microorganismos concentrados en las raíces, liberan oxígeno. Además, este proceso libera electrones y protones. Los electrones son transferidos al ánodo, mientras que los protones se combinan con moléculas de oxígeno y agua al ser transportados al cátodo (Helder, 2012).

Con relación a su capacidad técnica, esta depende del tipo de solución nutritiva, diseño, condición de operación, especie de planta y microorganismos (Shaikh, 2020). Como se ha venido diciendo, este sistema integra la fotosíntesis de las plantas y la bioelectricidad (Shaikh, 2020), y de acuerdo a lo mencionado por (Kabutey et al., 2019) es una alternativa eco-amigable.

2.2.3. Generación de energía con el sistema integrado (CW-MFC)

La presencia de especies vegetales mejora el rendimiento del humedal por la función excretora de oxígeno por parte de la rizósfera. También disminuye la resistencia interna, pero a su vez su presencia puede aumentar el espacio necesario entre los electrodos. Los microorganismos por su parte degradan la materia orgánica convirtiéndola en CO2 y H2O, siendo responsables por ende de la liberación de protones al sistema, por ello representan el factor más importante para que se genere electricidad en una celda de combustible microbiana (Miranda, 2019). Los mecanismos que explican la liberación de electrones por parte de los microorganismos electroquímicamente activos, desde el interior de sus células

hacia el electrodo son: (a) transferencia directa y (b) transferencia indirecta o mediada. De estas, la primera es la más eficiente, ya que permiten la transferencia al ánodo mediante proteínas localizadas. Por su parte, la transferencia indirecta se debe a que ciertos microorganismos presentan una membrana celular no conductiva (Katalin, 2016).

A nivel internacional Atieh et al. (2021) identifica las especies utilizadas en los sistemas CW-MFC, siendo especificados en la tabla 1.

Tabla 1.
Comparación de sistemas CW-MFC con y sin plantas.

Proceso	% Eliminación DQO	% otros contaminantes	Máxima densidad de potencia	Corriente / densidad de corriente
Plantado (Iris pseudacorus)	51,6	NH_4 : 71,9 NO_3 : 96,1 PO_4 : 96-97	25,1 mW/m^2	78,9 mA/m^2
No plantado	36,6	NH_4 : 43 NO_3 : 89,9 PO_4 :96-97	12,9 mW/m^2	61,9
Plantado (Acorus calamus)	88,1	NH_4 : 75	414 mW/m^3	NA
No plantado	80,2	NH_4 : 50	223 mW/m^3	NA
Plantado (Canna Indica)	88,1	TDS: 82,1	NA	NA
No plantado	83,1	TDS: 77,5	NA	NA
Plantado (Ipomea aquatic)	94,8	TN: 90,8	12,4 mW/m^2	NA
No plantado	92,1	TN: 54,5	5,13 mW/m^2	NA
Plantado (Ipomoea aquatic)	85,7	Tasa de decoloración: 91,2%	300 mW/m^2	0,85 mA/m^3
No plantado	82,7	Tasa de decoloración: 85,9%	190 mW/m^3	0,67 mA/m^3
Plantado (T.Orientalis)	80	TN:71	21,5 mW/m^2	94,3 mA/m^2
No plantado	74	TN:62	-	51 mA/m^2
Plantado (Hydrilla verticillata)	64	NH_4 : 88,9 NO_3 : 77,9 TP: 93,5	NA	NA
No plantado	55,3	NH_4 : 67,8 NO_3 : 78,9 TP: 95,1	NA	NA
Plantado (Canna Indica)	NA	NA	11,7 mW/m^2	NA
No plantado	NA	NA	18,6 mW/m^2	NA
Plantado (Canna Indica)	86,7	NO_3 : 87,1	8,39 mW/m^2	48,4 mA
No plantado	79,6	NO_3 : 67,4	1,84 mW/m^2	17,6 mA

Fuente: Obtenido de Atieh (2021).

Se observa entonces que la presencia de un sistema plantado influye en el aumento de la generación de densidad de potencia, densidad de corriente y voltaje obtenidos.

2.2.4. Tipos de configuración de una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido CW-MFC

2.2.4.1. Flujo subsuperficial

a) Flujo subsuperficial vertical

De flujo ascendente, en este tipo de configuración el afluente ingresa por un canal desde la base inferior del sistema, de manera que, el flujo de agua va ascendiendo desde la sección anódica, el material de soporte, la membrana separadora, de ser el caso, hasta el cátodo, en esta cámara se encuentra ubicado otro canal para que transporte el efluente hacia el exterior del sistema (Liu et. al, 2013; Zhao et. al, 2013; Xu et. al, 2016).

De flujo descendente, la configuración en este caso se caracteriza porque el afluente ingresa por la parte superior del sistema donde se encuentra la cámara catódica, que por acción de la gravedad el sustrato se infiltra, mientras que el efluente es expulsado mediante un conducto ubicado en la parte inferior de la cámara anódica (Zaman y Wardhana, 2018; Saz et. al, 2018).

También existen los sistemas de flujo simultáneo ascendente y descendente, es una combinación de lo mencionado anteriormente. Los conductos de afluente ingresan por la parte superior e inferior del sistema, mientras que el efluente es expulsado por un canal ubicado en el medio de los electrodos (Doherty et. al, 2015).

b) Flujo subsuperficial horizontal

El este tipo de configuración el afluente ingresa al sistema por uno de los extremos superiores para que el sustrato se infiltre a través de los componentes, por lo general la magnitud del largo es mayor a la altura, esto porque el afluente que ingresa fluye de manera

horizontal a medida que es tratada hacia el extremo opuesto para que el efluente sea expulsado por un tubo ubicado ya sea en la parte superior o inferior del sistema (Villaseñor et. al, 2013; Srivastava et. al, 2020; Patel et. al, 2021).

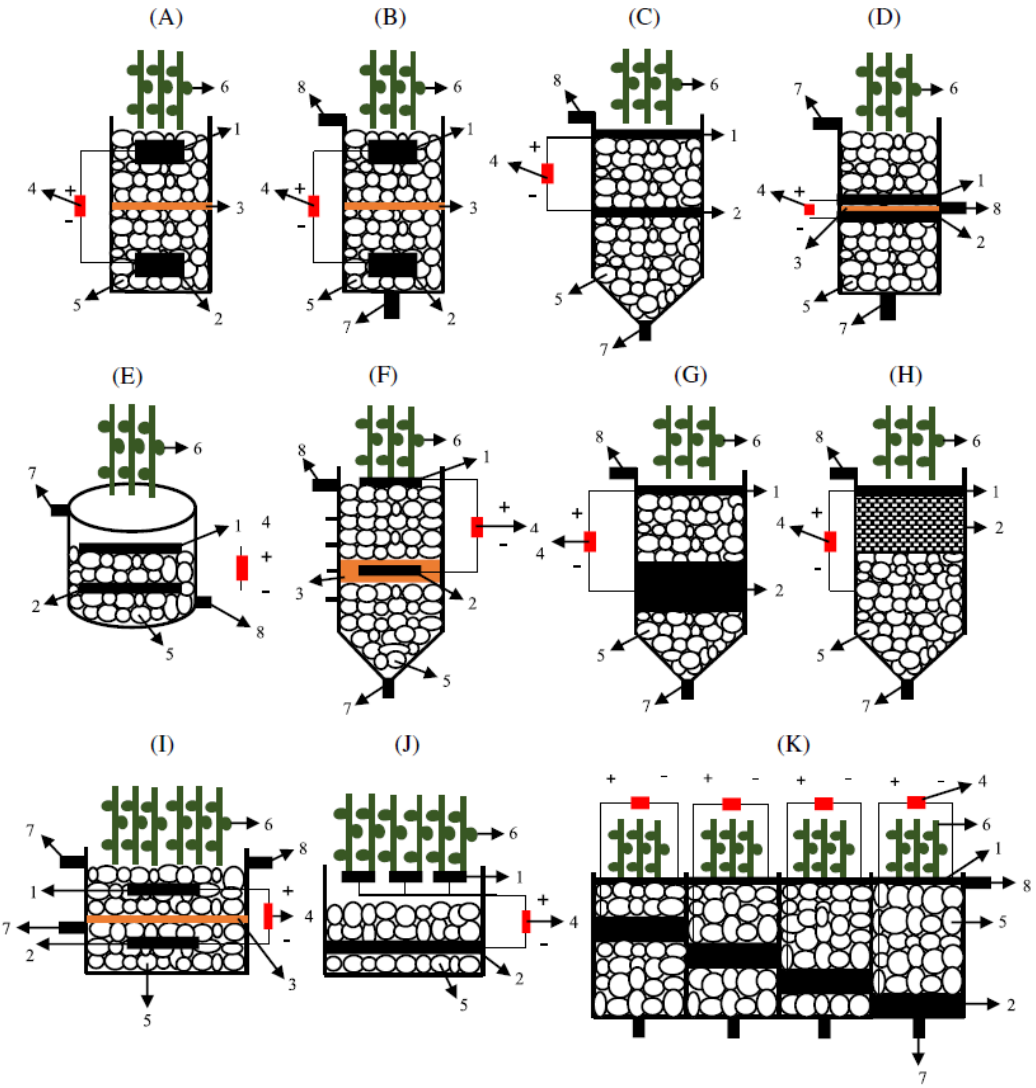
2.2.4.2. Por lotes

Este tipo de configuración se hace referencia a sistemas que no tienen un conducto de afluente y efluente, por lo que el ingreso del sustrato se realiza únicamente de manera discontinua (Yadav et. al, 2012; Xu et. al, 2018).

La siguiente figura presenta las diferentes estructuras a las que se puede adaptar un CW-MFC: sistema por lotes en secuencia (A), flujo ascendente (B, C, G y H), flujo descendente (E), flujo descendente y ascendente simultáneo (D), flujo horizontal subterráneo (F, I y K) y operado en lotes (J). 1) cátodo, 2) ánodo, 3) separador, 4) resistencia, 5) soporte, 6) planta, 7) afluente y 8) efluente.

Figura 1

Variación de la tensión eléctrica con relación al tipo de Sistema CW-MFC



Fuente: Guadarrama-Pérez et. al (2019)

2.2.5. Componentes de una CW-MFC

2.2.5.1. Electrodos

Teniendo en cuenta a Logan et. al (2006) y Kim et. al (2008), los electrodos deben ser conductores eléctricos efectivos, anti - corrosivos, estables químicamente con el sustrato a usar, biocompatibles con las plantas y la comunidad bacteriana, deben ser porosos para que no sufran obstrucciones y puedan adherirse los electrones liberados, además de contar con

una gran área superficial, por su parte Zhou et. al (2011) hace un énfasis en el precio de los materiales, considerando que si se quiere trabajar a gran escala este deber ser económico.

Respecto a la ubicación y distancia entre electrodos es importante debido a que, a menor distancia entre ellas, la resistencia interna es menor, lo cual es favorable, sin embargo, la desventaja es que el oxígeno puede difundirse en la cámara anódica (Logan et al., 2006; Kim et al., 2008), esto influye negativamente en la generación de energía y en el tratamiento del agua residual.

Los materiales a usar para los electrodos influyen en la densidad potencial y en la eficiencia coulombica (Kim et al., 2008), por lo que es necesario escoger correctamente. Entre los más populares se encuentran electrodos compuestos por carbono y grafito, debido a su bajo costo (Doherty et al., 2015b), sin embargo, el carbono no es lo más recomendado, puesto que la relación entre el área del electrodo es directamente proporcional a la resistencia interna, tal como lo afirma Huang et al. (2021).

Tabla 2

Clasificación de materiales usados para electrodos según sean carbono o grafito

Carbono	Grafito
Fieltro de fibra de carbono (CFF)	Carbón activado granular (GAC)
Cepillos de fibra de carbono (CFB)	Barra de grafito (GR)
Fieltro de carbono (FC)	Grava de grafito (GG)
Carbón activado (AC)	Placas de grafito (PG)
Tela de carbono (CC)	Fieltro de grafito (GF)

Fuente: Información obtenida de Huang et al. (2021).

Referente a la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) los electrodos de grafito tienen ventaja frente a los materiales de carbono, mientras que estos últimos se desempeñan mejor para el tratamiento de amonio (NH4) (Huang et al., 2021).

- Ánodo

En el ánodo, los componentes del sustrato sumado a los rizodepósitos excretados por las raíces (Strik et al., 2008), son descompuestos por la presencia de microorganismos, que a su vez liberan protones, que se difunden a través de la matriz de soporte al cátodo, y electrones, que son transferidos a la cámara catódica mediante un circuito externo (Helder, 2012).

Helder (2012) indica que, es necesario que el oxígeno no pase al compartimiento anódico para así tener una condición anaeróbica, de ser así, las moléculas de oxígeno captarán a los electrones reduciendo su disponibilidad para la generación de electricidad, por lo que usualmente las raíces de las plantas se posicionan debajo del agua para impedir su ingreso. Existen dos maneras en la que el oxígeno puede ingresar al compartimiento anódico, 1) ingreso directo desde la interfaz del sistema (Helder, 2012); 2) ingreso indirecto por medio de la fotosíntesis de la planta (Maricle y Lee, 2007).

- Cátodo

Al cátodo llegan los electrones por medio de un circuito externo desde el ánodo, así mismo, llegan los protones difundiéndose por la matriz de soporte desde la cámara anódica (Huang et al., 2021). En esta cámara se desarrollan los procesos de reducción tanto de electrones y protones (Xu et al., 2018b). En esta cámara se debe tener suficiente oxígeno disuelto para crear las condiciones aeróbicas, esto se asegura con la captura de oxígeno por parte de las plantas (Corbella et al., 2016).

2.2.5.2. Separador

También llamados membranas de intercambio protónico se localizan entre la cámara anódica y catódica (Guadarrama-Pérez et al., 2019), su función es impedir que los protones de la cámara catódica fluyan a la anódica, sin embargo, Rubina et al. (2016) mencionan que los separadores aumentan la resistencia óhmica, por lo que no recomienda su uso. Xu et al. (2018a) proponen en su estudio reemplazar el separador por la distancia entre electrodos, ya que el aumento del espacio entre 2 a 10 cm trae consigo valores altos para la densidad de potencia máxima.

2.2.5.3. Vegetación

Desde el punto de vista biológico, los microorganismos son el componente principal de CW-MFC porque oxidan la materia orgánica y liberan electrones. Las plantas son importantes de igual manera porque promueven la actividad microbiana a través de la liberación de oxígeno y la rizodeposición (Villaseñor et al., 2013).

Una parte de la fuente de carbono y oxígeno dentro del sistema CW-MFC es proporcionada por los exudados de las raíces de las plantas (Fang et al., 2018; Lu et al., 2015). Por lo tanto, la eficiencia en la generación y tratamiento de energía en el CW-MFC se basa en la acción combinada de plantas y microorganismos (Feng et al., 2020).

Los compuestos orgánicos liberados por la raíz de la planta proporcionan una fuente adicional de nutrientes para los microorganismos de la rizosfera (Oon et al., 2017). Además, las plantas incrementan la concentración de oxígeno alrededor de la raíz, lo cual promueve el potencial catódico. Sin embargo, el oxígeno liberado por la raíz de la planta puede interferir con la función de las bacterias anaeróbicas en la capa anódica; por lo tanto, Atieh et al. (2021) sugiere que la raíz de la planta sea ubicada en la zona del cátodo y a una distancia suficiente

del área del ánodo. En este caso, los microorganismos de la rizósfera se beneficiarán tanto del oxígeno como de los exudados radiculares que aporta la planta.

2.2.5.4. Matriz de soporte

Con matriz de soporte se hace referencia al suelo usado en los sistemas CW-MFC, estos se ubican entre los electrodos y las raíces de las plantas. De acuerdo a Sundaravadivel y Vigneswaran (2001), representa el pilar de la estructura del sistema, en el cual las raíces de las plantas se sujetan, también es el hábitat que alberga microorganismos, en un CW-MFC funciona como una cama filtrante que captura a las sustancias contaminantes ya sea que se encuentren disueltas o no (Dordio y Carvalho, 2013).

Para la elección es importante considerar la conductividad hidráulica y la porosidad del material a usar, por ello que los materiales en base a grava y arena gruesa son recomendados (Dordio y Carvalho, 2013), una alta conductividad eléctrica asegura que el flujo del sustrato sea uniforme en todo el sistema (Netter, 1994), mientras que la porosidad brindará el espacio para que pueda darse el tratamiento del sustrato.

Tabla 3
Tipos de matriz de matriz según el material usado

Tipo de matriz de soporte	**Tamaño efectivo (mm)**	**Porosidad (%)**	**Conductividad hidráulica K ($m * s^{-1}$)**
Arena gruesa	2	0.32	$1.2 * 10^{-2}$
Arena com grava	8	0.35	$5.8 * 10^{-2}$
Grava fina	16	0.38	$8.7 * 10^{-2}$
Grava media	32	0.40	$11.6 * 10^{-2}$
Roca gruesa	128	0.45	$115.7 * 10^{-2}$

Fuente: Obtenido de Sundaravadivel y Vigneswaran (2001).

2.2.5.5. Microorganismos

Los microorganismos han influido en la mejora de las celdas de combustible microbianas. A estos organismos se les ha denominado microorganismos electroquímicamente activos (MEAs). También son conocidos con otros nombres como bacterias electrogénicas (Miranda, 2019). Se ha evidenciado una gran variedad de comunidades dependiendo de las condiciones como el tipo de sustrato (Kiely et al., 2011). Otros factores condiciones de funcionamiento como temperatura, pH, podrían tener un impacto sobre la generación de energía.

Los suelos son la fuente común de inóculo utilizado en los sistemas de tratamiento biológico debido a la presencia de microbios naturales ricos, de ahí su uso como sustrato en la operación de PMFC (Wolińska et al., 2014). Los suelos utilizados en la operación de PMFC incluyen suelos naturales, agrícolas y forestales (Nitisoravut y Regmi, 2017), campo de arroz/suelo de arroz, suelo inundado, suelo rojo, arena, limo, arcilla, suelo de turba, suelo de marisma salada, mezcla de suelo de compost, sedimentos/rizodepósitos, sedimento de humedales, suelo de jardín, suelo de jardín mezclado con estiércol de vaca y macetas suelo (Jiang et al., 2010). Como se evidenció en un estudio de MFC usando suelo agrícola como inóculo, produjo 17 veces más energía que usando suelo forestal debido a la menor relación C/N y la riqueza de especies en el suelo agrícola (Liu et al., 2005).

- Aclimatación de microorganismos

Para maximizar la potencia obtenida con cualquier valor de VCA (Variabilidad del voltaje en circuito abierto) es necesario también proveer un tiempo suficiente para que los microorganismos se adapten a las resistencias eléctricas externas y desarrollen comunidades microbianas activas (Watson & Logan, 2011). El tiempo adecuado permite a los

microorganismos capturar nutrientes y favorece el desarrollo de procesos metabólicos con sustratos más favorables (Watson et al., 2011; Ieropoulos et al., 2010; Hong et al., 2011).

La temperatura, el pH y la conductividad eléctrica contribuyen a la aclimatación y a la proliferación microbiana (Salinas, 2016). Además, acorde a la investigación realizada por Arends (2012), la aclimatación del sistema se alcanza después de 16 días.

2.2.5.6. Solución nutritiva

La solución líquida contiene la materia orgánica que alimenta a las bacterias (Guadalupe, 2016). Entre los tipos de solución líquida tenemos agua residual urbana (Corbella et al., 2016), agua de río (Yu et al., 2020), agua residual sintética (Di et al., 2020), agua residual doméstica sintética (Zhang et al., 2018), agua residual doméstica (Das et al., 2019), aguas residuales porcinas (Doherty et al., 2015a) y agua sintética (Wang et al., 2016).

2.2.5.7. Circuito externo

En la construcción del circuito externo se utilizan una variedad de materiales que van desde cables de cobre hasta cables de oro recubiertos con teflón. Los materiales utilizados deben permitir el libre flujo de los electrones; de esta manera se disminuye la resistencia interna de la celda y disminuyen las pérdidas óhmicas.

En los experimentos en los que se han obtenido los valores mayores en generación de electricidad se han empleado cables de oro (Timmers et al., 2010a; Helder, 2010; Timmers et al., 2010b). En el circuito externo de las CCM vegetales también se utilizan barras de grafito y las resistencias externas fijas varían en su capacidad desde 10 hasta 1000 ohms. Mientras que en los Humedal artificial asistido electroquímicamente se emplean generalmente cables de cobre, en algunos experimentos se incluyen barras de grafito y las

resistencias externas aplicadas para la polarización varían entre 5 y 100 000 Ω (Salinas, 2016).

2.2.6. Indicador de electricidad

2.2.6.1. Densidad de potencia eléctrica

Acorde a Revelo et al. (2013), la densidad de potencia de las Células de Combustible Microbianas (CCMs) se refiere a cuánta energía eléctrica se puede generar por unidad de área anódica. Esta densidad de potencia está influenciada por varios factores, como el tipo y la concentración del sustrato utilizado, el material y la superficie de los electrodos, el tipo de separador, la resistencia interna, la eficiencia coulómbica y la actividad metabólica de los microorganismos. Para mejorar la eficiencia de las CCMs, se pueden implementar diversas estrategias, entre las que se incluyen:

- Emplear sustratos complejos y abundantes, como aguas residuales que contengan materia orgánica biodegradable y resistente.
- Optimizar la estructura y el diseño de las CCMs mediante el uso de configuraciones de celdas simples o dobles, selección de separadores apropiados y el uso de electrodos que sean conductores y catalíticos.
- Investigar diferentes comunidades microbianas, tanto en el ánodo como en el biocátodo, que sean capaces de transferir electrones de manera directa o mediada.
- Controlar las condiciones operativas, como el pH, la temperatura, el flujo de aire y el potencial eléctrico, con el fin de promover la actividad bioelectroquímica.

La densidad de potencia eléctrica se calcula mediante la siguiente ecuación matemática (Wang et al., 2010):

$$P_{An} = \frac{I * V}{A_{An}}$$

P_{An} es la densidad de potencia.

I es la intensidad eléctrica.

V es el voltaje eléctrico.

A_{An}es el área del ánodo.

2.2.7. Resistencia interna

La matriz de soporte utilizada en la operación de MFC plantado se considera durante el diseño y la operación porque afecta la resistencia interna al interferir con la migración de protones (H+) entre los electrodos y la difusión de los exudados de la raíz al ánodo (Takanezawa et al., 2010; Chan & Chi-Ying, 2014).

La cercanía entre el ánodo y el cátodo se relaciona con la resistencia interna de la celda, facilitando o dificultando el transporte de protones a través de la membrana o del electrolito. Las pérdidas óhmicas se reducen ajustando el espacio entre los electrodos (Logan et al., 2006; Kim et al., 2008); sin embargo, si la distancia entre estos componentes se reduce demasiado es más fácil que el oxígeno se infiltre hasta el ánodo afectando a las bacterias anaerobias que ahí se encuentran (Kim et al., 2008).

Una resistencia interna grande en los reactores conduce a una potencia baja, a pesar de valores de Variabilidad del voltaje en circuito abierto relativamente altos (Miranda, 2019).

2.2.8. Huama amarilla *(Limnocharis flava)*

La especie *Limnocharis flava (L.)*, es una planta acuática, también considerada como maleza, florece en las regiones tropicales de América Central y del Sur, según Brooks et al. (2008). Esta especie tiende a desarrollarse predominantemente en cuerpos de agua con alta carga orgánica, ya sean estancados o de flujo muy lento, incluyendo lagunas, lagos, piscinas naturales y pantanos.

Comúnmente conocida como huama amarilla *(Limnocharis flava)* o col de agua, esta planta puede alcanzar una altura de hasta 110 cm, mientras que su rizoma puede extenderse hasta 3 cm de largo y tener un diámetro de 3 cm. (Haynes y Holm-Nielsen, 1992). La huama amarilla *(Limnocharis flava)* prospera en ambientes acuáticos con un pH que oscila entre 4 y 6, y requiere una temperatura que se mantenga entre los 25°C y los 30°C para su óptimo desarrollo (Man, 2008).

2.2.8.1. Taxonomía

De acuerdo al Royal Botanic Gardens, Kew. (n.d.), la taxonomía de la planta corresponde a lo siguiente:

Reino : *Plantae*

Filo : *Tracheophyta*

Clase : *Equisetopsida*

Subclase : *Magnoliidae*

Orden : *Alismatales*

Familia : *Alismataceae*

Género : *Limnocharis*

Especie : *Limnocharis flava*

2.2.9. Putu putu *(Eichhornia crassipes)*

La especie *Eichhornia Crassipes,* conocida localmente como putu putu *(Eichhornia crassipes)* o jacinto de agua, es originaria de América del Sur. Se trata de una planta flotante invasora que se propaga rápidamente y prefiere desarrollarse en zonas húmedas, especialmente en extensos cuerpos de agua con corrientes lentas. Estas plantas pueden alcanzar una altura de hasta 50 cm, y sus rizomas pueden medir desde 30 cm de largo hasta 6 cm de diámetro (Binggeli, 2003).

El putu putu *(Eichhornia crassipes)* se desarrolla óptimamente en ambientes acuáticos cuyas temperaturas se encuentren entre los 10°C y los 25°C, y con un pH que oscila entre 6 y 8 (Rojas-Sandoval y Acevedo-Rodríguez, 2022).

2.2.9.1. Taxonomía

De acuerdo al United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. (n.d.)., la taxonomía de la especie es la siguiente:

Reino : *Plantae*

Filo : *Tracheophyta*

Clase : *Liliopsida* -monocotiledóneas

Subclase : *Liliidae*

Orden : *Liliales*

Familia : *Pontederiaceae* Kunth

Género : *Eichhornia* Kunth

Especies : *Eichhornia crassipes*

2.2.10. Lenteja de agua *(Lemna minor)*

La planta acuática *Lemna minor*, también conocida como lenteja de agua, es una planta acuática flotante que crece rápidamente y se encuentra en muchos lugares tropicales y subtropicales (Roldán, 1992). Además, crece en charcos, ciénagas, lagos y ríos calmados de agua dulce (Armstrong, 2003).

Se adapta a un amplio rango de temperaturas, iluminación y pH, y crece rápidamente en aguas ricas en nutrientes, especialmente nitrógeno y fosfatos (Rook, 2002). Asimismo, Raven et al. (1971) menciona que su cuerpo vegetativo es plano y verde, respecto a su tamaño, describe que tiene una sola raíz delgada de 2 a 4 mm de largo y 2 mm de ancho y es una de las plantas con flores más pequeñas del mundo.

Su capacidad para absorber contaminantes y nutrientes, como cobre, cadmio, selenio y fosfatos, lo convierte en una herramienta útil para el tratamiento de aguas residuales y la recuperación de ecosistemas acuáticos (Olguín y Hernández, 1998; Zayed, 1998).

2.2.10.1. Taxonomía

De acuerdo al Royal Botanic Gardens, Kew. (n.d.), la taxonomía de la planta corresponde a lo siguiente:

Reino : Plantae

Filo : *Tracheophyta*

Clase : *Equisetopsida*

Subclase : *Magnoliidae*

Orden : *Alismatales*

Familia : *Araceae*

Género : *Lemna*

Especie : *Lemna minor*

2.2.11. Caracterización del agua natural de la Laguna de Yarinacocha

De acuerdo a la Autoridad Nacional del Agua (2019), según su publicación denominada "Evaluación del Recursos Hídricos en la Intercuenca 49917 Ucayali Informe Final, Capítulo 6 – Calidad de agua", las características de la Laguna Yarinacocha se especifican en la siguiente tabla.

Tabla 4
Resultados de monitoreo de calidad de agua en la Laguna Yarinacocha

Parámetro	**Unidad**	**LYari5**	**ECA 4E1**[3]
In situ			
pH	Ud.pH	7,22	6,5-9
Temperatura	°C	28,9	$\Delta 3$
Conductividad	µS/cm	225	1000
Oxígeno Disuelto	mg/L	7,01	≥ 5
Fisico-químicos			
Aceites y grasas	mg /L	< 0,5	5
Cianuro libre	mg CN/L	< 0,001	0,0052
Clorofila A (Solo lagos)	mg/m3	0,006	0,008
Color	CU	17,99	20
Demanda bioquímica de oxígeno (lagos)	mg O2/L	1,7	5
Fenoles	mg/l	< 0,001	2,56
Fósforo total (lago)	mg P/l	0,073	0,035
Nitratos	mg NO3/L	< 0,1679	13
Amoniaco total	mg NH3/L	< 0,02	2,39
Nitrógeno total (sólo lagos)	mg N/L	<0,2	0,315
Sólidos totales en suspensión (lagos)	mg TSS/L	4,3	≤ 25
Sulfuro	mg S2/L	<0,00045	0,002
Metales totales			
Antimonio total	mg/L	0,00032	0,64
Arsénico total	mg/L	0,00702	0,15
Bario total (lagos)	mg/L	0,05386	0,7

[3] DS Nº 004-2017-MINAM.- Aprueban Estándares de Calidad Ambiental para Agua y establecen Disposiciones Complementarias. Categoría 4, Sub Categorías E1: Lagunas y Lagos.

Parámetro	Unidad	LYari5	ECA 4E1[3]
Cobre total	mg/L	<0,00005	0,1
Cromo VI	mg/L	< 0,001	0,011
Mercurio total	mg/L	<0,00007	0,0001
Niquel total	mg/L	<0,00007	0,052
Plomo total	mg/L	<0,00005	0,0025
Selenio total	mg/L	<0,0021	0,005
Talio total	mg/L	<0,00004	0,0008
Zinc total	mg/L	0,0878	0,12
Metales disueltos			
Cadmio disuelto	mg/L	0,00018	0,00025
Microbiológicos			
Numeración de coliformes fecales o termotolerantes (lagos)	NMP/100ml	1400	1000

Fuente: Obtenido de Evaluación del Recurso Hídricos en la Intercuenca 49917 Ucayali Informe Final, Capítulo 6 – Calidad de agua, Autoridad Nacional del Agua (2019).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Método de investigación

3.1.1. Enfoque de la investigación

El trabajo presenta un enfoque cuantitativo, de acuerdo a Hernández et al. (2014) significa que "utiliza la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin de establecer pautas de comportamiento y probar teorías".

La investigación es del tipo básica, esto se refiere a que se encargará de generar conocimientos, teorías, metodologías (Ríos, 2017).

3.1.2. Alcance y nivel de la investigación

Por otro lado, el nivel del proyecto es descriptivo de acuerdo a Hernández et al. (2014) porque "pretende medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables a las que se refieren, esto es, su objetivo no es indicar cómo se relacionan éstas".

a) Diseño de muestreo

Se aplicó un muestreo del tipo no probabilístico intencionado, de acuerdo a Hernández et al. (2014), la muestra es designada según el criterio del investigador, puesto que se determinó trabajar con 03 tipos de CW-MFC con un tipo de planta cada uno.

b) Descripción detallada del uso de materiales, equipos, insumos, entre otros

Tabla 5

Descripción detallada de materiales, equipos e insumos a usar

Materiales	
Nombre	Descripción
Vegetación	Lenteja de agua (*Lemna minor*) Putu putu *(Eichhornia crassipes)* Huama amarilla *(Limnocharis flava)*
Solución nutritiva	Agua de la Laguna Yarinacocha.
Matriz de soporte	Lodo Se utilizó el lodo de la laguna Yarinacocha. Relleno o lecho filtrante Esto fue usado como relleno para el sistema CW-MFC: grava fina (4-8 mm), arena y carbón activado (0,42 – 1,68 mm).
Electrodos	Cátodo y Ánodo Varilla de grafito de 6 cm de largo y un diámetro de 0,3 cm, adherido al cable de cobre.
Resistencia	Resistencia de 1KΩ.
Equipos	
Multímetro digital	Instrumento de medición del voltaje eléctrico (mV) y amperaje (mA).
Insumos	
Cable de conexión de los electrodos	El cable aislado de cobre se utilizó para la conexión entre los electrodos, de manera que permita el flujo de electrones.
Bidón de 200 L	Se empleó un bidón de 200 litros para contener el agua de la Laguna Yarinacocha.
Balde de 20 L	Se empleó para facilitar el llenado de los sistemas CW-MFC.
Manguera	Utilizado para la succión de agua.
Tela de tocuyo	Utilizado para impedir el paso de sólidos.
Algodón	Utilizado para impedir el paso de sólidos

c) Descripción de variables a ser analizados en el objetivo específico

Tabla 6
Descripción de variables

Variable	Dimensión	Indicadores
Independiente: X1: Tipo de celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido (CW-MFC)	Variación en la Composición de las Especies Vegetales	Tipo de especies vegetales utilizadas en el CW-MFC
Dependiente: Y1: Potencial energético	Cantidad de energía generada	Densidad de potencia eléctrica

3.1.3. Diseño de la investigación

El diseño del trabajo es experimental, de acuerdo a Ríos (2017) se da cuando "el investigador manipula y controla el comportamiento de las variables".

3.1.4. Diseño estadístico

Para establecer si existe incidencia en el potencial energético por parte del tipo de CW-MFC se empleó el programa estadístico SPSS V.29 en la cual se realizó la Prueba de Kruskal-Wallis de un solo factor, en donde:

Ho = La densidad de potencia en los 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC), son iguales. No hay diferencias significativas entre los grupos.

Ha = La densidad de potencia en los 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC), no son iguales. Al menos un grupo difiere significativamente de los demás.

Tabla 7
Factor y niveles

Factor	Niveles
Variable Independiente X: Tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC)	• CW-MFC con especie vegetal huama amarilla *(Limnocharis flava)* • CW-MFC con especie vegetal putu putu *(Eichhornia crassipes)* • CW-MFC con especie vegetal lenteja de agua (*Lemna minor)*

Número de lectura: 2 lecturas/ día, durante 15 días.

Número de repeticiones: 3 veces/ lectura

Número de unidades experimentales: 3 U.E.

Unidad experimental: Tipo de CW-MFC

Para la toma de decisión se trabajó con el P-valor en donde: si el P-valor es menor a 0.05 indica que hay significancia entre los tres tipos de CW-MFC. Si la tabla de la Prueba de Kruskal-Wallis resuelve que son significativos se optará por un análisis post-hoc de Dunn-Bonferroni al 95% de nivel de significancia.

Tabla 8

Ficha de recolección de datos de potencial energético generado

FACTOR			Y: Potencial energético			
X: Tipo de "CW-MFC "	Hora	Rep.	Intensidad eléctrica (mA)	Tensión eléctrica (mV)	Potencia (mW)	Densidad de Potencia (mW/ m2)
CW-MFC con especie vegetal huama amarilla *(Limnocharis flava)*	9:00 a. m.	R1				
	9:00 a. m.	R2				
	9:00 a. m.	R3				
	1:00 p. m.	R4				
	1:00 p. m.	R5				
	1:00 p. m.	R6				
CW-MFC con especie vegetal putu putu *(Eichhornia crassipes)*	9:00 a. m.	R1				
	9:00 a. m.	R2				
	9:00 a. m.	R3				
	1:00 p. m.	R4				
	1:00 p. m.	R5				
	1:00 p. m.	R6				
CW-MFC con especie vegetal lenteja de agua (*Lemma minor*)	9:00 a. m.	R1				
	9:00 a. m.	R2				
	9:00 a. m.	R3				
	1:00 p. m.	R4				
	1:00 p. m.	R5				
	1:00 p. m.	R6				

Tabla 9

Cuadro de Prueba de Kruskal-Wallis

Estadísticos de prueba[a,b]

	Densidad de potencia (mW/m2)
H de Kruskal-Wallis	
gl	
Sig. asin.	

a. Prueba de Kruskal Wallis

b. Variable de agrupación: Tipo de sistema

3.2. Área de estudio

3.2.1. Ubicación

El trabajo de investigación se ejecutó en las instalaciones de la Universidad Nacional de Ucayali, ubicado en la carretera Federico Basadre Km 6,2, distrito de Callería,

departamento de Ucayali, específicamente en el Laboratorio de Calidad de Agua de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, con coordenadas UTM, 546901,73 m E y 9070881,51 m S.

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

La población estuvo compuesta por las 03 celdas de combustible microbiana integradas a humedales construidos (CW-MFC).

3.3.2. Muestra

El presente trabajo es del tipo no probabilística (intencional), en este tipo de muestra la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino más bien de razones relacionadas con las características de la investigación o los objetivos del investigador (Hernández et al., 2014). Por lo cual la muestra estuvo representada por 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC), según los 03 tipos de especies vegetales a usarse: huama amarilla *(Limnocharis flava),* putu putu *(Eichhornia crassipes)* y lenteja de agua (*Lemna minor).*

3.4. Procedimiento de recolección de datos

Tabla 10
Descripción de procedimientos

Variable independiente X: Tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC)	
Consideraciones	Especificaciones
Construcción estructural del sistema CW-MFC	La estructura utilizada para las tres unidades experimentales fue uniforme. Todas las unidades estaban construidas de vidrio, con dimensiones de 50 cm de altura, 40 cm de ancho y 20 cm de largo. En cuanto a las capas que componían los tres tipos de CW-MFC, el sistema se organizaba en dos compartimientos diferenciados, descritos a continuación: i. Por el compartimiento i ingresó agua proveniente de la Laguna Yarinacocha, la cual fluyó por gravedad formando el componente "d) Agua de la Laguna Yarinacocha" con una profundidad de 15 cm, donde estuvo presente la especie de planta correspondiente y la varilla de grafito. Posteriormente, el agua pasó por el lodo recolectado de la Laguna Yarinacocha, con un espesor de 2 cm. La última capa de este compartimiento está compuesta por grava, con un espesor de 14 cm. El sistema estaba dividido por una placa de vidrio, sin embargo, a una distancia de 7 cm desde la base del sistema había una abertura para permitir el flujo de agua hacia el segundo compartimiento.
Construcción estructural del sistema CW-MFC	ii. A continuación, se detallan los componentes de este compartimiento, desde la base hasta la parte superior: primero, una capa de grava con una profundidad de 3 cm, seguida de una capa de carbón activado de 5 cm de profundidad en la cual se incluyó una varilla de grafito conectada a un cable de cobre. Encima de esta capa, se añadió 1 cm de grava, luego una capa carbón activado y arena, y finalmente, cada uno con una

	profundidad de 5 cm, una capa de grava con una profundidad de 12 cm. Para separar las capas se utilizó tela de tocuyo y algodón.
	Electrodos En cuanto a los materiales para los electrodos (ánodo y cátodo), se utilizó grafito, el cual estaba conectado a un cable de cobre.
Aclimatación de microorganismos	Lodo (fuente de microorganismos) Como fuente abastecedora de los microorganismos se utilizó lodo de la Laguna de Yarinacocha, para ello una vez configurado los 03 tipos de CW-MFC previo a la operación, y se tuvo un periodo de aclimatación de 10 días para los microorganismos (Xie et al., 2018).
Aclimatación de especies vegetales	El tiempo de aclimatación para cada especie vegetal fue de 20 días tomando como referencia a Damian (2021) en su investigación realizada para CW-MFC.
Tiempo de retención hidráulica	El tiempo de retención hidráulica (TRH) fue de 5 días, el caudal de entrada al sistema empleados fue de 0,1 ml/ segundo.
	Variable dependiente Y: Potencial energético
Consideraciones	Especificaciones
Cálculo de la densidad de potencia.	Se utilizó el multímetro digital para las mediciones de Intensidad eléctrica (mA), Tensión eléctrica (mV), las cuales tuvieron una frecuencia de medición de dos veces al día, siendo la primera a las 9:00 am y la segunda a la 1:00 pm, y cada uno de ellos tuvo 3 repeticiones, referente al cálculo de la potencia se aplicó la ecuación de P (potencia) = V (tensión eléctrica) * A (intensidad eléctrica), por último la densidad de potencia se calculó de la siguiente manera Densidad de Potencia = Potencia / área del ánodo.

3.5. Técnicas e instrumentos para recolección de datos

3.5.1. Técnicas

La técnica seleccionada para la investigación fue la observación directa.

3.5.2. Instrumentos

Como instrumentos de recolección de datos, se emplearon las siguientes fichas:

Tabla 11
Ficha de recolección del potencial energético por día

Y: Potencial energético
Tipo de " CW-MFC ":
Número de semana:

N° de día	Hora de medición	Repeticiones de lectura	Voltaje (mV)	Intensidad eléctrica (mA)	Potencia eléctrica (mW)	Densidas de potencia eléctrica (mW/ m2)
1	09:00 a.m.	R1				
		R2				
		R3				
	01:00 p.m.	R4				
		R5				
		R6				
2	09:00 a.m.	R1				
		R2				
		R3				
	01:00 p.m.	R4				
		R5				
		R6				
3	09:00 a.m.	R1				
		R2				
		R3				
	01:00 p.m.	R4				
		R5				
		R6				
4	09:00 a.m.	R1				
		R2				
		R3				
	01:00 p.m.	R4				
		R5				
		R6				
5	09:00 a.m.	R1				
		R2				
		R3				
	01:00 p.m.	R4				
		R5				
		R6				

3.6. Procesamiento para recolección de datos

Se empleó el programa estadístico SPSS V.29 para realizar el análisis de los datos obtenidos. La Prueba de Kruskal-Wallis de un solo factor fue utilizada para determinar si existían diferencias significativas en la densidad de potencia entre los tres tipos de celdas de combustible microbiana integradas a los humedales construidos (CW-MFC). Se establecieron las siguientes hipótesis para la prueba:

Ho = La densidad de potencia en los 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC), son iguales. No hay diferencias significativas entre los grupos.

Ha = La densidad de potencia en los 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC), no son iguales. Al menos un grupo difiere significativamente de los demás.

Para la toma de decisión, se consideró un nivel de significancia de α=0,05. Si el valor de p obtenido en la Prueba de Kruskal-Wallis fue menor que 0,05, se interpretó como evidencia de diferencias significativas entre los tres tipos de CW-MFC.

3.7. Tratamiento de datos

En caso de obtener resultados significativos en la Prueba de Kruskal-Wallis, se realizó un análisis post-hoc de Dunn-Bonferroni al 95% de nivel de significancia para identificar qué grupos diferían significativamente entre sí.

CAPÍTULO IV

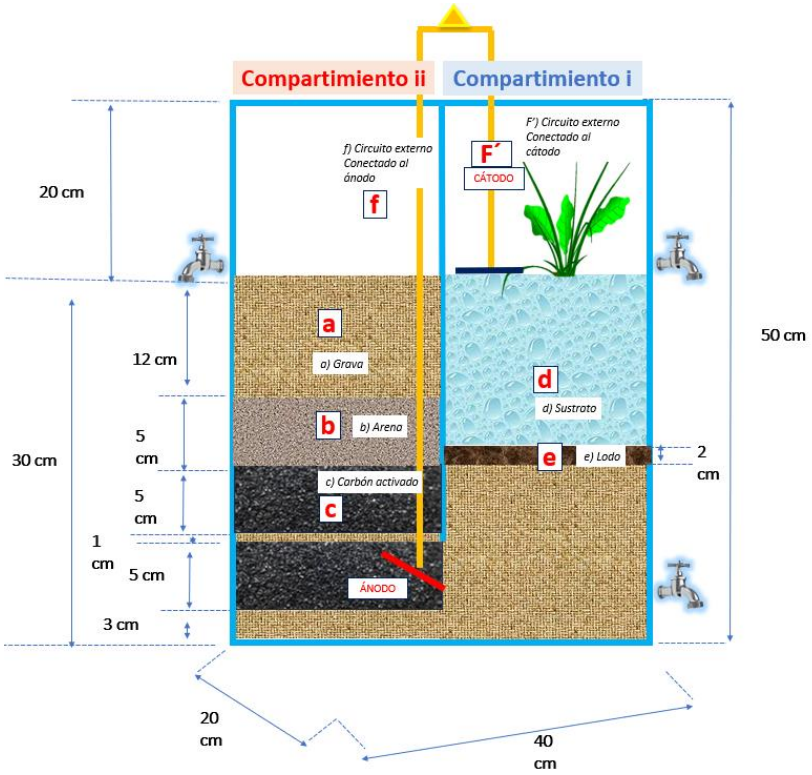
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Construcción de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido a nivel de laboratorio

Se llevó a cabo la construcción e implementación de celdas de combustible microbianas en un humedal construido a nivel de laboratorio, siguiendo las especificaciones detalladas en la metodología. Tras el período de aclimatación, las celdas de combustible funcionaron de manera efectiva y demostraron su capacidad para generar energía a partir de procesos microbianos en el entorno del humedal.

Figura 2
Diseño de unidades experimentales



La Figura 2 muestra el diseño esquemático del sistema, destacando las principales características y componentes, proporcionando una representación visual de cómo se ha implementado cada unidad experimental, a continuación, se detalla las partes del sistema: a) Grava b) Arena c) Carbón activado d) Agua de la Laguna Yarinacocha e) Lodo f) Circuito externo.

Como se observa en la Figura 2 el sistema posee dos compartimientos:

i) En el compartimento i ingresó la solución nutritiva al sistema, correspondiente al agua de la Laguna Yarinacocha, que fluyó por gravedad, formando el componente "d) Agua de la Laguna Yarinacocha" con una profundidad de 15 cm, donde se encontraba la especie vegetal correspondiente, así como el cátodo, cuya área es de 0,001159 m^2. A continuación, la solución nutritiva pasó por el lodo recolectado de la laguna Yarinacocha, con una profundidad de 2 cm. Se utilizó una tela de tocuyo para la separación entre el lodo, la grava y el carbón activado.

   El sistema estaba dividido por una placa de vidrio, sin embargo, a una distancia de 7 cm desde la base del sistema, había una abertura que permitía el flujo de agua hacia el compartimento ii.

ii) A continuación, se detallan los componentes de este compartimento desde la parte inferior a superior: se inició con una capa de grava de 3 cm de profundidad, seguida por una capa de carbón activado en la cual se incluyó una varilla de grafito conectada a un cable de cobre con un área de 0,001159 m^2, con una profundidad de 5 cm. Luego, se agregó una capa de 1 cm de grava, seguida por una capa de carbón activado y arena, ambos con 5 cm de espesor.

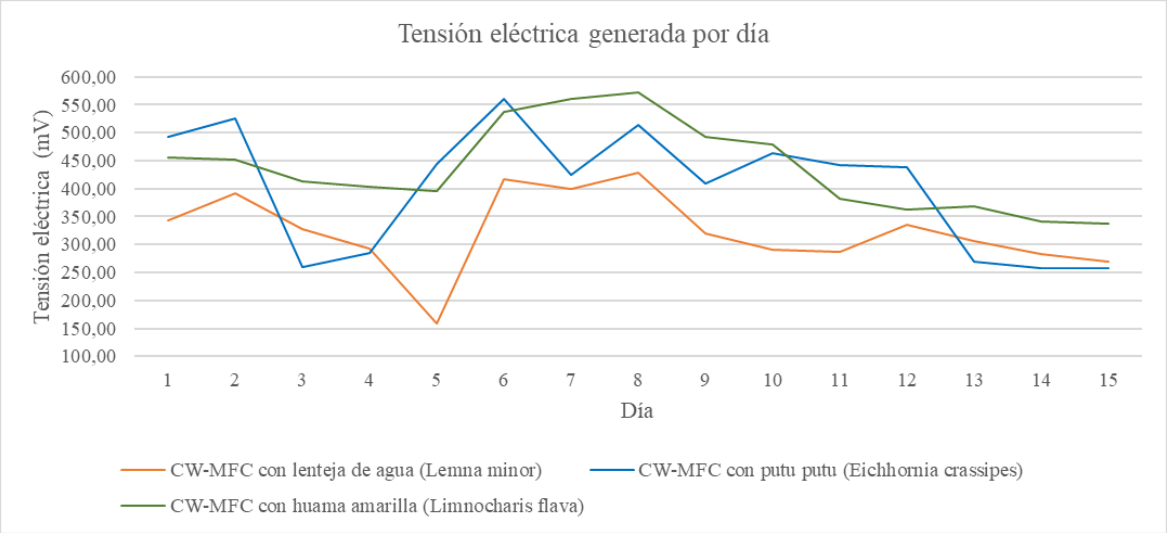
Finalmente, se añadió una capa de grava de 12 cm de profundidad. Cabe destacar que entre cada capa se utilizó tela de tocuyo y algodón para la separación.

4.1.2. Producción de energía en las unidades experimentales

4.1.2.1. Tensión eléctrica

La Figura 3 representa la variación de la tensión eléctrica en milivoltios en función de las tres unidades experimentales durante un período de 15 días de medición.

Figura 3
Variación de la tensión eléctrica con relación al tipo de Sistema CW-MFC

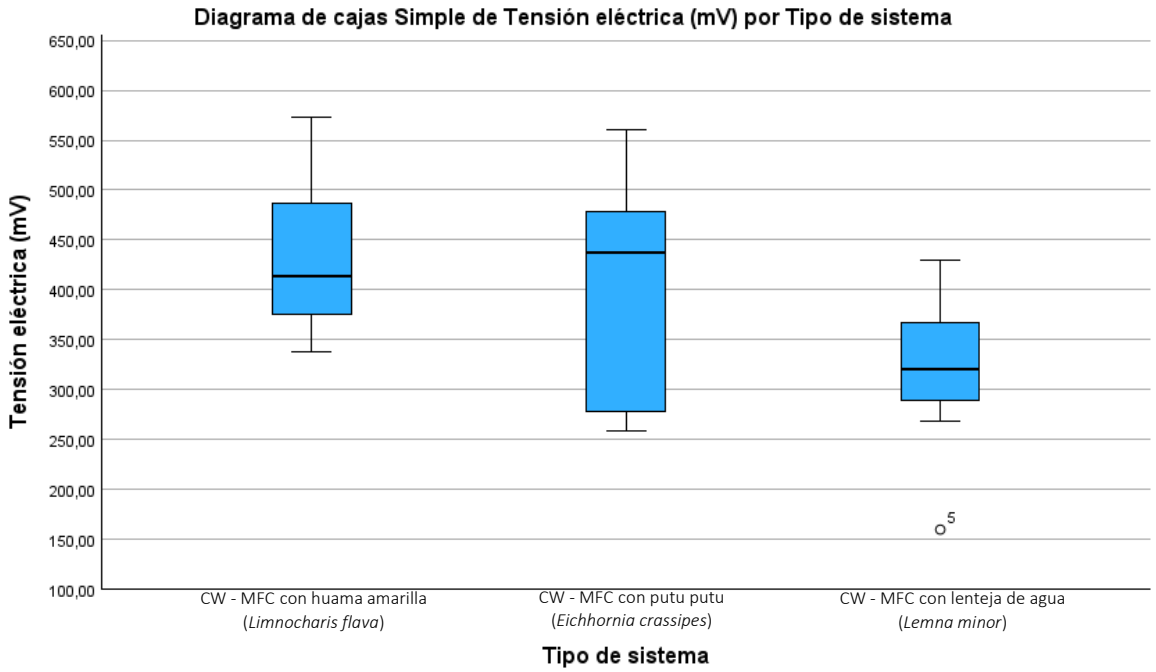


Se puede apreciar que las medidas de tensión eléctrica presentaron variaciones considerables; de manera general, disminuyeron sus valores los primeros cinco días de medición y tuvieron un incremento a partir del sexto día, para reducirse de manera gradual hasta el quinceavo día de medición.

En la Figura 4 se observa el diagrama de cajas simple de tensión eléctrica por tipo de Sistema CW-MFC, en milivoltios, en función de las tres unidades experimentales durante un período de 15 días de medición.

Figura 4

Diagrama de cajas simple de tensión eléctrica por tipo de Sistema CW-MFC



El diagrama de caja de la tensión eléctrica de la Tabla 12, brinda una indicación visual de la asimetría de la distribución de datos.

Tabla 12
Estadísticos descriptivos

Tensión eléctrica (mV)

	N	Media	Desv. estándar	Error estándar	95% de intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
CW-MFC con huama amarilla *(Limnocharis flava)*	15	437,043	77,824	20,094	393,946	480,141	338,00	572,83
CW-MFC con putu putu *(Eichhornia crassipes)*	15	403,123	107,714	27,811	343,473	462,772	258,33	560,67
CW-MFC con lenteja de agua (*Lemma minor*)	15	323,490	68,647	17,725	285,474	361,506	159,67	429,00
Total	45	387,885	97,133	14,480	358,703	417,067	159,67	572,83

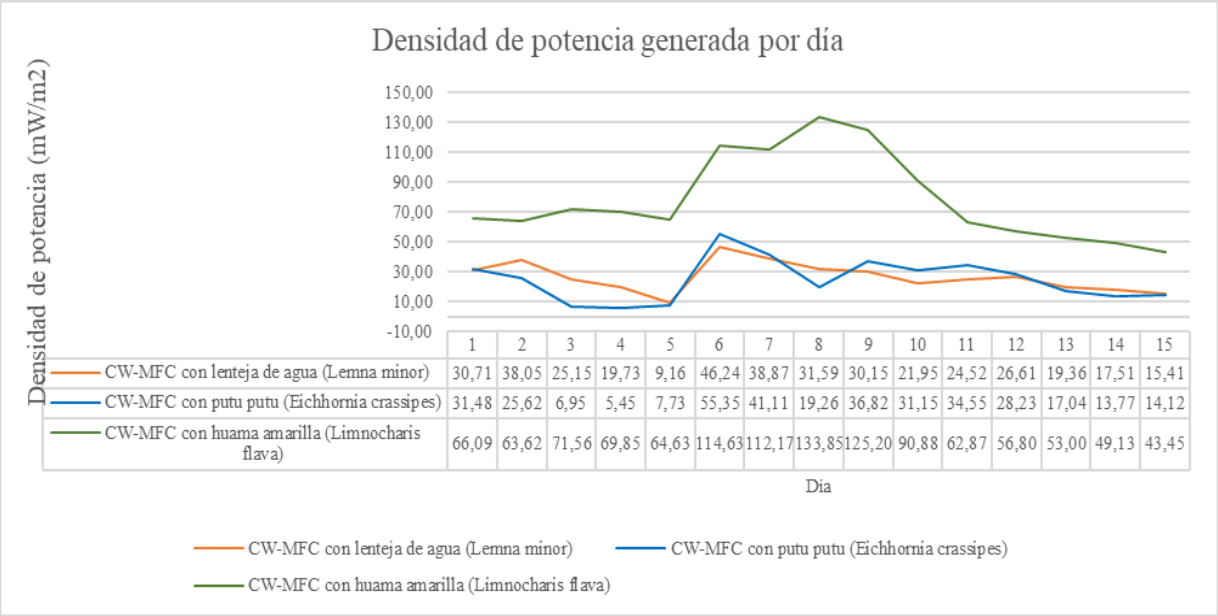
Se observó que el sistema CW-MFC con especie vegetal huama amarilla *(Limnocharis flava)* presentó un valor promedio máximo de voltaje de 572,83 mV el octavo día de medición, y un valor promedio mínimo de 338,00 mV el quinceavo día de medición. Por otro lado, el sistema CW-MFC con especie vegetal lenteja de agua presentó un valor promedio máximo de voltaje de 429,00 mV el octavo día de medición, y un valor promedio mínimo de 159,67 mV el quinto día de medición y un segundo promedio valor mínimo de 268,67 mV el quinceavo día de medición. Por último, el sistema CW-MFC con especie vegetal putu putu *(Eichhornia crassipes)* presentó un valor promedio máximo de voltaje de 560,67 mV el sexto día de medición, y un valor promedio mínimo de 258,33 mV el catorce y quinceavo día de medición.

4.1.2.2. Densidad de potencia

La Figura 5 representa la variación de la potencia eléctrica en miliwatts (mW) en función de las tres unidades experimentales durante un período de 15 días de medición.

Figura 5

Variación de la densidad de potencia con relación al tipo de Sistema CW-MFC



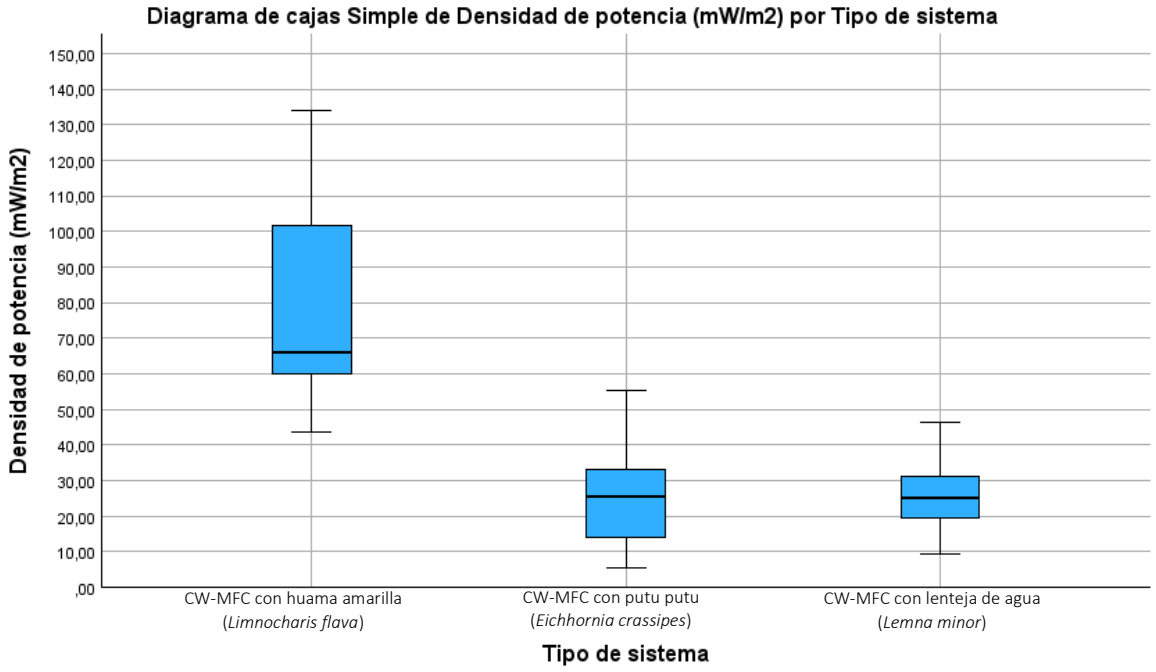
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CW-MFC con lenteja de agua (Lemna minor)	30,71	38,05	25,15	19,73	9,16	46,24	38,87	31,59	30,15	21,95	24,52	26,61	19,36	17,51	15,41
CW-MFC con putu putu (Eichhornia crassipes)	31,48	25,62	6,95	5,45	7,73	55,35	41,11	19,26	36,82	31,15	34,55	28,23	17,04	13,77	14,12
CW-MFC con huama amarilla (Limnocharis flava)	66,09	63,62	71,56	69,85	64,63	114,63	112,17	133,85	125,20	90,88	62,87	56,80	53,00	49,13	43,45

Se puede apreciar que las medidas de densidad de potencia presentaron variaciones considerables; de manera general, disminuyeron sus valores los primeros cinco días de medición y tuvieron un incremento a partir del sexto día, para reducirse de manera gradual hasta el quinceavo día de medición.

En la Figura 6 se observa el diagrama de cajas simple de densidad de potencia por tipo de Sistema CW-MFC, en miliwatts por metro cuadrado (mW/m2), en función de las tres unidades experimentales durante un período de 15 días de medición.

Figura 6

Diagrama de cajas simple de densidad de potencia por tipo de Sistema CW-MFC



El diagrama de caja de la tensión eléctrica de la Tabla 13 brinda una indicación visual de la asimetría de la distribución de datos.

Se observó que el sistema CW-MFC con *Limnocharis Flava* presentó una mayor variabilidad en los valores de densidad de potencia, debido a que presentó el Rango Intercuartílico (IQR) más alto. Este sistema presentó una mediana de densidad de potencia de 66,09 mW/m2.

El sistema CW-MFC con *Eichhornia Crassipes* presentó una menor variabilidad en comparación al sistema que empleó *Limnocharis Flava* y presentó una mediana de densidad de potencia de 25,62 mW/m2.

En relación al sistema CW-MFC con *Lemna Minor*, este último presentó menor variabilidad debido a su Rango Intercuartílico más pequeño, presentó una mediana de densidad de potencia de 25,15 mW/m2.

Tabla 13
Estadísticos descriptivos

Densidad de potencia (mW/m2)

	N	Media	Desv. estándar	Error estándar	95% de intervalo de confianza para la media: Límite inferior	95% de intervalo de confianza para la media: Límite superior	Mínimo	Máximo
CW-MFC con huama amarilla *(Limnocharis flava)*	15	78,515	29,258	7,554	62,313	94,718	43,45	133,85
CW-MFC con putu putu *(Eichhornia crassipes)*	15	24,575	14,259	3,682	16,679	32,472	5,45	55,35
CW-MFC con lenteja de agua	15	26,334	9,857	2,545	20,875	31,793	9,16	46,24
Total	45	43,142	31,755	4,734	33,601	52,682	5,45	133,85

Respecto a la densidad de potencia, se obtuvo que el sistema CW-MFC con especie vegetal huama amarilla *(Limnocharis flava)* presentó un valor promedio máximo de 133,85 mW/m2 el octavo día de medición, y un valor promedio mínimo de 43,45 mW/m2 el quinceavo día de medición, mientras que su valor promedio total de densidad de potencia fue de 78,515 mW/m2.

Por otro lado, el sistema CW-MFC con especie vegetal lenteja de agua presentó un valor promedio máximo de densidad de potencia de 46,24 mW/m2 el sexto día de medición, y un valor promedio mínimo de 9,16 mW/m2 el quinto día de medición, mientras que su valor promedio total de densidad de potencia fue de 26,334 mW/m2. Por último, el sistema CW-MFC con especie vegetal putu putu *(Eichhornia crassipes)* presentó un valor promedio máximo de densidad de potencia de 55,35 mW/m2 el sexto día de medición, y un valor promedio mínimo de 5,45 mW/m2 el cuarto día de medición, mientras que su valor promedio total de densidad de potencia fue de 24,575 mW/m2.

4.1.3. Resultados de análisis estadístico

4.1.3.1. Análisis de densidad de potencia

Prueba de normalidad

Se realizó la prueba de normalidad tomando en cuenta los valores de significancia para la prueba de Shapiro-Wilk, en donde:

H0: La distribución de frecuencias de los datos se distribuye normalmente.

Ha: La distribución de frecuencias de los datos no se distribuye normalmente.

El criterio de decisión empleado fue el siguiente:

Si p<0,05 se rechaza la H0 y se acepta la Ha.

Si p>=0,05 se acepta la H0 y se rechaza la Ha.

Tabla 14
Prueba de normalidad para densidad de potencia

	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Densidad de potencia (mW/m2)	0,866	45	<0,001

Acorde a la prueba de normalidad, se rechaza la H0 y se acepta la Ha, por ende, se utilizó una técnica de análisis estadístico no paramétrico, es decir, la prueba de Kruskal-Wallis para su evaluación.

Prueba de Kruskal-Wallis

La prueba de Kruskal-Wallis fue utilizada para comparar las medianas de densidad de potencia de las distintas unidades experimentales, en donde:

H0: Las medianas de datos de distribución de densidad de potencia son iguales. No hay diferencias significativas entre los grupos.

Ha: Las medianas de datos de distribución de densidad de potencia no son iguales. Al menos un grupo difiere significativamente de los demás.

El criterio de decisión empleado fue el siguiente:

Si p<0,05 se rechaza la H0 y se acepta la Ha.

Tabla 15
Medianas de los datos de densidad de potencia

			Percentiles
		Tipo de sistema	50
Empírica	Densidad de potencia (mW/m2)	CW-MFC con huama amarilla *(Limnocharis flava)*	66,090
		CW-MFC con putu putu *(Eichhornia crassipes)*	25,620
		CW-MFC con lenteja de agua *(Lemma minor)*	25,150

Tabla 16
Prueba de Kruskal-Wallis para densidad de potencia

Estadísticos de prueba[a,b]

	Densidad de potencia (mW/m2)
H de Kruskal-Wallis	28,434
gl	2
Sig. asin.	<0,001

a. Prueba de Kruskal Wallis

b. Variable de agrupación: Tipo de sistema

Los resultados revelaron que la diferencia entre las medianas es significativa. La estadística H de Kruskal-Wallis obtuvo un valor de 28,434 y el valor de p fue menor a 0,05. Esto indica que existen diferencias significativas entre al menos dos de las unidades experimentales.

Análisis post-hoc de Dunn-Bonferroni

La prueba Post Hoc de Dunn-Bonferroni se utilizó para determinar las diferencias significativas entre las unidades experimentales, debido a que no se cumple con el supuesto homogeneidad de varianza, donde:

H0: No hay diferencias significativas entre dos grupos específicos. Las medianas de los grupos comparados son iguales.

Ha: Hay diferencias significativas entre dos grupos específicos. Al menos una de las medianas de los grupos comparados es diferente.

Tabla 17
Medianas de los datos de densidad de potencia

			Percentiles
		Tipo de sistema	50
Empírica	Densidad de potencia (mW/m2)	CW-MFC con huama amarilla *(Limnocharis flava)*	66,090
		CW-MFC con putu putu *(Eichhornia crassipes)*	25,620
		CW-MFC con lenteja de agua *(Lemma minor)*	25,150

Tabla 18

Análisis post-hoc de Dunn-Bonferroni para densidad de potencia

(I) Tipo de sistema	(J) Tipo de sistema	Estadístico de contraste	Error	Desv. Estadístico de contraste	Sig.	Sig. Ajuste
CW-MFC con putu putu *(Eichhornia crassipes)*	CW-MFC con lenteja de agua *(Lemma minor)*	1,667	4,796	0,348	0,728	1,000
CW-MFC con putu putu *(Eichhornia crassipes)*	CW-MFC con huama amarilla *(Limnocharis flava)*	22,933	4,796	4,782	0,000	0,000
CW-MFC con lenteja de agua *(Lemma minor)*	CW-MFC con huama amarilla *(Limnocharis flava)*	21,267	4,796	4,434	0,000	0,000

*El nivel de significancia es 0,05.

Los resultados específicos de las comparaciones son los siguientes: Los resultados específicos de las comparaciones, según se presentan en la Tabla 18, indican diferencias significativas en el desempeño de los sistemas CW-MFC al comparar diferentes configuraciones vegetales. Se observó una diferencia significativa entre los sistemas CW-MFC utilizando putu putu *(Eichhornia crassipes)* y huama amarilla *(Limnocharis flava)*, con un estadístico de contraste de 22,933. De manera similar, las comparaciones entre los sistemas con lenteja de agua *(Lemma minor)* y huama amarilla *(Limnocharis flava)* también mostraron diferencias significativas, reflejadas en un estadístico de contraste de 21,267. Sin embargo, al comparar los sistemas CW-MFC con putu putu *(Eichhornia crassipes)* y lenteja de agua *(Lemma minor)*, no se encontraron diferencias significativas, como lo indica un estadístico de contraste de 1,667.

4.2. Discusión

4.2.1. Densidad de potencia de una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal huama amarilla *(Limnocharis flava)*

Se evaluó la densidad de potencia de una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con la especie vegetal huama amarilla *(Limnocharis flava)*. Los resultados indicaron que este sistema alcanzó un valor promedio máximo de voltaje de 572,83 mV y una densidad de potencia promedio máxima de 133,85 mW/m2, mientras que su mediana de densidad de potencia fue de 66,09 mW/m2. Si bien estos valores son notables, también observamos variabilidad en la densidad de potencia en diferentes momentos de medición

Según el análisis estadístico aplicado, se puede afirmar que este primer sistema presenta un mejor rendimiento en la generación de energía. El valor de voltaje obtenido, multiplicado por tres, sería suficiente para encender un foco LED de 1.5 voltios, lo cual sugiere la posibilidad de convertirse en una fuente energética viable al implementarse en mayor escala y abre nuevas perspectivas para aplicaciones más amplias y sostenibles

Estos resultados se alinean con el estudio de Gómez y Medina (2021), que investigó la generación de bioelectricidad a partir de pilas de combustible microbiana con especies vegetales específicas. En su investigación, la especie cinta (*Chlorophytum comosum*) alcanzó una tensión de 505,45 mV, considerablemente superior a la obtenida con hierbabuena (*Mentha spicata*), que registró 245,37 mV. Estos resultados refuerzan la idea de que la elección de la especie vegetal desempeña un papel fundamental en la generación de energía en sistemas similares.

4.2.2. Densidad de potencia de una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal putu putu *(Eichhornia crassipes)*

En el segundo objetivo específico, se evaluó la densidad de potencia de un sistema CW-MFC que utilizó la especie vegetal putu putu *(Eichhornia crassipes)*. Los resultados mostraron que este sistema obtuvo un valor de densidad de potencia promedio máxima de 55,35 mW/m2, mientras que su mediana de densidad de potencia fue de 25,62 mW/m2.

En la investigación de Gonzales (2019), se observó que el sistema con celdas de combustible microbiana y sin vegetación generó más electricidad en comparación con el sistema con vegetación, con una densidad de potencia máxima de 8,6 mW/m2. Además, se destacó que cuando las raíces de las plantas invadían la zona anódica, afectaba el rendimiento debido al aumento de la resistencia interna.

Aunque la investigación de Gonzales sugiere que se obtuvieron resultados superiores en el sistema que no incorporó vegetación, esto no implica que la vegetación carezca de influencia positiva en el rendimiento energético del sistema. Más bien, estos hallazgos enfatizan la importancia de regular el crecimiento de las raíces de las plantas en la zona anódica para garantizar una generación adecuada de energía en los sistemas de celdas de combustible microbiana integrados en humedales construidos. En el diseño utilizado en este estudio, se estableció una distancia suficiente entre la especie vegetal y el ánodo, lo que podría explicar la obtención de los valores superiores registrados.

Por su parte en la investigación de Xie et al. (2018), obtuvieron como voltaje máximo entre 240 y 270 mV. Nuestros resultados con putu putu *(Eichhornia crassipes)* presentaron

un valor promedio máximo de voltaje de 560,67 mV el sexto día de medición, indicando una eficiencia aún mayor.

4.2.3. Densidad de potencia de una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal lenteja de agua *(Lemma minor)*

El tercer objetivo específico consistió en determinar la densidad de potencia de un sistema CW-MFC que utilizó la especie vegetal lenteja de agua *(Lemma minor)*. Los resultados mostraron que este sistema alcanzó una densidad de potencia promedio máxima de 46,24 mW/m2, mientras que su mediana de densidad de potencia fue de 25,15 mW/m2. Según el análisis estadístico aplicado, se puede afirmar que este sistema presenta una diferencia significativa en comparación con el rendimiento del sistema con huama amarilla *(Limnocharis flava)*, que tuvo un mejor rendimiento.

Esta diferencia significativa entre especies macrófitas concuerda con el estudio de Saz et al. (2018), en el que se encontró que la especie *Typha angustifolia* tuvo un mejor rendimiento que otras especies macrófitas estudiadas. Los autores sugirieron que esto se debe a que la presencia de esta especie aumenta las actividades microbianas responsables de la biodegradación de los compuestos orgánicos y la transferencia de electrones desde el ánodo al cátodo.

Además, el estudio no analizó la diversidad y la estructura de las comunidades microbianas presentes en los sistemas de CW-MFC. La diversidad y la estructura de las comunidades microbianas son indicadores clave que pueden proporcionar información valiosa sobre los mecanismos involucrados en el tratamiento de aguas residuales y la generación de energía en estos sistemas. La ausencia de este análisis limita nuestra capacidad

para comprender en detalle cómo las comunidades microbianas contribuyen a los procesos de tratamiento y producción de energía en los CW-MFC.

4.3. Limitaciones de la investigación

Es importante destacar que este estudio presenta algunas limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados. En primer lugar, el estudio no evaluó el efecto de la temperatura, el pH, oxígeno disuelto y conductividad en el rendimiento de los sistemas de Celdas de Combustible Microbiana Integradas a Humedales Construidos (CW-MFC). Estos factores pueden influir significativamente en la actividad microbiana y, por lo tanto, en la producción de bioelectricidad. La falta de evaluación de estos parámetros limita nuestra comprensión completa de los factores ambientales que pueden afectar el funcionamiento de los sistemas CW-MFC.

Además, el estudio no analizó la diversidad y la estructura de las comunidades microbianas presentes en los sistemas de CW-MFC. La diversidad y la estructura de las comunidades microbianas son indicadores clave que pueden proporcionar información valiosa sobre los mecanismos involucrados en el tratamiento de aguas residuales y la generación de energía en estos sistemas. La ausencia de este análisis limita nuestra capacidad para comprender en detalle cómo las comunidades microbianas contribuyen a los procesos de tratamiento y producción de energía en los CW-MFC.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se demostró que la inclusión de especies vegetales en sistemas de celdas de combustible microbiana integradas en humedales construidos (CW-MFC) ejerce un impacto significativo en la generación de energía. Los resultados obtenidos indican que el sistema que incorporó la especie vegetal huama amarilla *(Limnocharis flava)* obtuvo el mejor rendimiento en términos de densidad de potencia.
- Se determinó que el sistema con especie vegetal huama amarilla *(Limnocharis flava)* obtuvo un valor de densidad de potencia promedio máximo de 133,85 mW/m² y un promedio mínimo de 43,45 mW/m2, mientras que su mediana de densidad de potencia fue de 66,09 mW/m2.
- El sistema CW-MFC con especie vegetal putu putu *(Eichhornia crassipes)* presentó un valor promedio máximo de densidad de potencia de 55,35 mW/m2 y un valor promedio mínimo de 5,45 mW/m2, mientras que su mediana de densidad de potencia fue de 25,62 mW/m2.
- Respecto al sistema CW-MFC con especie vegetal lenteja de agua *(Lemma minor)*, se obtuvo que presentó un valor promedio máximo de densidad de potencia de 46,24 mW/m2 y un valor promedio mínimo de 9,16 mW/m2, mientras que su mediana de densidad de potencia fue de 25,15 mW/m2.

5.2. Recomendaciones

- Establecidas las conclusiones de esta investigación se recomienda considerar la especie vegetal huama amarilla *(Limnocharis flava)* para futuras investigaciones, pues incide notablemente en el rendimiento del sistema de celdas de combustible microbiana integradas en humedades construidos (CW-MFC).
- Comparar el efecto de diferentes especies vegetales, especialmente las especies locales, en el rendimiento de los sistemas CW-MFC, considerando sus características morfológicas, fisiológicas y ecológicas. Asimismo, es recomendable tener en consideración la estación del año al adquirilas, ya que su disponibilidad se ve influenciada por periodos. Esta comparación ayudará a identificar las especies vegetales más adecuadas para su inclusión en estos sistemas, maximizando su eficiencia en la generación de energía y el tratamiento de aguas residuales.
- Investigar el efecto de los factores de temperatura, el pH, oxígeno disuelto y conductividad del sistema CW-MFC en el rendimiento de los sistemas de Celdas de Combustible Microbiana Integradas a Humedales Construidos (CW-MFC), así como la diversidad y la estructura de las comunidades microbianas involucradas en el proceso. Esta investigación adicional permitirá una comprensión más profunda de cómo afectan estas condiciones a la generación de energía en estos sistemas.
- Optimizar el diseño y la configuración del circuito eléctrico de los sistemas de CW-MFC, incluyendo el tipo y la disposición de los electrodos, el material

y espesor del separador, y la resistencia externa, para mejorar la eficiencia de la producción bioeléctrica. Los estudios de diseño y experimentos de optimización podrían conducir a mejoras significativas en la eficiencia y rentabilidad de los sistemas CW-MFC, lo que los haría más prácticos para aplicaciones en el tratamiento de aguas y generación de energía.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aiyer, K. S. (2020). How does electron transfer occur in microbial fuel cells? *World Journal of Microbiology and Biotechnology, 36,* 19. https://doi.org/10.1007/s11274-020-2801-z

Araneda, I. (2016). *Humedales construidos para tratamiento sustentable de aguas grises: efecto del acople a una celda de combustible microbiana* [Tesis de grado, Universidad de Chile]. Repositorio institucional de la Universidad de Chile https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/141769

Arends, J. B., Blondeel, E., Tennison, S. R., Boon, N. & Verstraete, W. (2012). Suitability of granular carbon as an anode material for sediment microbial fuel cells. *Journal of Soils and Sediments. 12*(7), 1197–1206.

Armstrong, W. (2003). Wayne's Word Lemnaceae. www.waynesword.palomar.edu

Atieh, E., Muttucumaru, S. & Craig, M. (2021). A taxonomy of design factors in constructed wetland-microbial fuel cell performance: A review. *Journal of Environmental Management. 291*. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112723

Autoridad Nacional del Agua. (2020). *Evaluación del Recursos Hídricos en la Intercuenca 49917 Ucayali Informe Final, Capítulo 6 – Calidad de aguas*. https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4695?show=full&locale-attribute=es

Beyenal, H., Chang, I. S., Mohan, S. V., & Pant, D. (2021). Microbial fuel cells: Current trends and emerging applications. *Bioresource Technology, 324,* 124687. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124687

Binggeli, P. (2003). Pontederiaceae, Eichhornia crassipes, water hyacinth, jacinthe d'eau, tetezanalika, tsikafokafona. En S.M. Goodman & J.P. Benstead (Eds.), *The Natural History of Madagascar* (pp. 476-478). University of Chicago Press. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/278848952_Eichhornia_crassipes_water_hyacinth_Tetezanalika_Tsikafokafona

Brooks, S., Weber, J.M., Setter, S.D., & Akacich, B.A. (2008). Seed production and maturation of Limnocharis flava (L.) Buchenau in the field and glasshouse. *Sixteenth Australian Weeds Conference*. https://caws.org.nz/old-site/awc/2008/awc200811801.pdf

Buitrón, G. & Moreno-Andrade, I. (2014). Performance of a Single-Chamber Microbial Fuel Cell Degrading Phenol: Effect of Phenol Concentration and External Resistance. *Applied Biochemistry and Biotechnology. 174*(7), 2471–2481.

Chan, K. & Chi-Ying, V.L. (2014). Devices, materials and mechanisms for energy conversion. *Electrochemically enabled sustainability*. First ed.Boca Raton, Florida: CRC Press.

Corbella, C., Garfí, M., & Jaume, P. (2016). Long-term assessment of best cathode position to maximise microbial fuel cell performance in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Science of The Total Environment, 563-564,* 448-455. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.170

Damian, D. (2021). *Evaluación de la producción de electricidad mediante una pila de combustible microbiana en un humedal, 2021*. [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. Repositorio institucional de la Universidad César Vallejo https://hdl.handle.net/20.500.12692/74070

Das, B., Thakur, S., Chaithanya, M. S., & Biswas, P. (2019). Batch investigation of constructed wetland microbial fuel cell with reverse osmosis (RO) concentrate and wastewater mix as substrate. *Biomass and Bioenergy, 122,* 321-237. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.017

Di, L., Li, Y., Nie, L., Wang, S., & Kong, F. (2020). Influence of plant radial oxygen loss in constructed wetland combined with microbial fuel cell on nitrobenzene removal from aqueous solution. Journal of Hazardous Materials, 394. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122542

Doherty, L., Zhao, Y., Zhao, X., & Wang, W. (2015a). Nutrient and organics removal from swine slurry with simultaneous electricity generation in an alum sludge-based constructed wetland incorporating microbial fuel cell technology. *Chemical Engineering Journal*, *266,* 74-81. https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.12.063

Doherty, L., Zhao, Y., Zhao, X., Hu, Y., Hao, X., Xu, L., & Liu, R. (2015b). A review of a recently emerged technology: Constructed wetland – Microbial fuel cells. *Water Research, 85*, 38-45. https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.016

Dordio, A. V., & Carvalho, A. J. P. (2013). Organic xenobiotics removal in constructed wetlands, with emphasis on the importance of the support matrix. *Journal of Hazardous Materials, 252-253,* 272-292. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.03.008

Fang, Z., Cao, X., Li, X., Wang, H. & Li, X. (2018). Biorefractory wastewater degradation in the cathode of constructed wetland-microbial fuel cell and the study of the electrode performance. *International Biodeterioration & Biodegradation. 129,* 1–9.

Fang, Z., Cheng, S., Cao, X., Wang, H., & Li, X. (2016). Effects of electrode gap and wastewater condition on the performance of microbial fuel cell coupled constructed

wetland. *Environmental Technology* *38*(8), 1051-1060. https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1217280

Feng, L., Wang, R., Jia, L. & Wu, H. (2020). Can biochar application improve nitrogen removal in constructed wetlands for treating anaerobically-digested swine wastewater? *Chemical Engineering Journa*l. *379*, 122273.

Ge, X., Cao, X., Song, X., Wang, Y., Si, Z., Zhao, Y., Wang, W. & Tesfahunegn, A. A. (2020). Bioenergy generation and simultaneous nitrate and phosphorus removal in a pyrite-based constructed wetland-microbial fuel cell. *Bioresource Technology*. *296*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122350

Gilani, S., Yaseen, A., Raza Ali Zaidi, S., Zahra, M., & Mahmood, Z. (2016). Photocurrent Generation through Plant Microbial Fuel Cell by Varying Electrode Materials. *J.Chem.Soc.Pak*, *38*(1).

Gómez, M. & Medina, P. (2021). Bioelectricidad generadas por pilas de combustible microbiana de Hierbabuena (Mentha spicata) y Cinta (Chlrophytum comosum) - Yanacancha - Chupaca - 2021 [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. Repositorio institucional de la Universidad César Vallejo https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/75573

González, T. (2019). Generación de energía a partir del tratamiento de aguas servidas mediante la integración de una celda de combustible microbiana en un humedal construido. [Tesis doctoral, Universidad de Concepción]. Repositorio Institucional UDEC. http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/3670

Gorgoglione, A., & Torretta, V. (2018). Sustainable management and successful application of constructed wetlands: a critical review. *Sustainability*, *10*(11), 3910. https://doi.org/10.3390/su10113910

Guadalupe, M. (2016). Estudio de la generación de electricidad en un humedal artificial asistido electroquímicamente. [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de México]. Repositorio institucional de la Universidad Autónoma de México http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/11321/1/Tesis.pdf

Guadarrama-Pérez, O., Gutiérrez-Macías, T., García-Sánchez, L., Guadarrama-Pérez, V. H., & Estrada-Arriaga, E. B. (2019). *International Journal of Energy Research, 43*(10), 5106-5127. https://doi.org/10.1002/er.4496

Haynes, R. R., & Holm-Nielsen, L.B. (1992). The Limnocharitaceae. *Flora Neotropica, 56*, 1-32. https://www.jstor.org/stable/4393828

Helder, M. (2012). Design criteria for the Plant-Microbial Fuel Cell: electricity generation with living plants: from lab tot application. [Tesis doctoral, Universidad de Wageningen]. Repositorio institucional de la Universidad de Wageningen https://www.wur.nl/en/Publication-details.htm?publicationId=publication-way-343330323533

Helder, M., Strik, D., Hamelers, H., Kuhn, J., Blok, C. & Buisman, C. (2010). Concurrent bio- electricity and biomass production in three P-MFCs using Spartina anglica, Arundinella anomala and Arundo donax. *Bioresource Technology*. *101*(10), 3541-3547.

Henández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). McGraw-Hill/ Interamericana Editores S.A. https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf

Hong, Y., Call, D. F., Werner, C. M. & Logan, B. E. (2011). Adaptation to high current using low external resistances eliminates power overshoot in microbial fuel cells.

Biosensors and Bioelectronics. *28,* 71-76. ps://www.researchgate.net/publication/235664224

Huang, X., Duan, C., Duan, W., Sun, F., Cui, H., Zhang, S., & Chen, X. (2021). Role of electrode materials on performance and microbial characteristics in the constructed wetland coupled microbial fuel cell (CW-MFC): A review. *Journal of Cleaner Production, 301*, 126951. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126951

Ieropoulos, I., Winfield, J. & Greenman, J. (2010). Effects of flow-rate, inoculum and time on the internal resistance of microbial fuel cells. *Bioresource Technology. 101*(10), 3520-3525.

Jayapriya, J., & Gummadi, S. N. (2022). Scaling up and applications of microbial fuel cells. En D. A. Jadhav, S. Pandit, S. Gajalakshmi & M. P. Shah (Eds.), *Scaling up of Microbial Electrochemical Systems* (pp. 309-338). Elvieser.

Jiang D., Li B., Jia W. & Lei Y. (2010). Effect of inoculum types on bacterial adhesion and power production in microbial fuel cells. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. *160*(1), 182. https://doi.org/10.1007/s12010-009-8541-z

Kabutey, F. T., Zhao, Q., Wei, L., Ding, J., Antwi, P., Quashie, F. K., & Wang, W. (2019). An overview of plant microbial fuel cells (PMFCs): Configurations and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 110,* 402-414. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.016

Katalin, B. (2016). Bioelectrochemical treatment of municipal waste liquor in microbial fuel cells for energy valorization. *Bioresource Technology. 112*, 4406–4412.

Kim I. S., Chae, K. J., Choi, M. J. & Verstraete, W. (2008). Microbial Fuel Cells: Recent Advances, Bacterial Communities and Application Beyond Electricity Generation.

Environment Engineering Research. *13*(2), 51-65. https://doi.org/10.4491/eer.2008.13.2.051

Liu H., Cheng S. & Logan BE. (2005). Production of electricity from acetate or butyrate using a single-chamber microbial fuel cell. *Environmental Science & Technology*. *39*(2), 658–62. https://doi.org/10.1021/es048927c

Liu, S., Song, H., Li, X., & Yang, F. (2013). Power Generation Enhancement by Utilizing Plant Photosynthate in Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland System. *International Journal of Photoenergy, 2013*, https://doi.org/10.1155/2013/172010

Llana, M. (2020). Evaluación de la celdas de combustible planta-microbiana en la generación de energía eléctrica para iluminar una habitación de una vivienda rural [Tesis de grado, Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo http://repositorio.unasam.edu.pe/bitstream/handle/UNASAM/4333/T033_72160467_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., & Rabaey, K. (2006). Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology. *Environmental Science & Technology, 40*(17), 5181-5192. https://doi.org/10.1021/es0605016

Lu, L., Xing, D. & Ren, Z.J. (2015). Microbial community structure accompanied with electricity production in a constructed wetland plant microbial fuel cell. *Bioresource Technology*. *195*, 115–121.

Lyon, D. Y., Buret, F., Vogel, T. M. & Monier, J. M. (2010). Is resistance futile? Changing external resistance does not improve microbial fuel cell performance. *Bioelectrochemistry*. *78*(1), 2–7.

Maddalwar, S., Nayak, K. K., Kumar, M., & Singh, L. (2021). Plant microbial fuel cell: Opportunities, challenges, and prospects. *Bioresource Technology, 341*, 125772. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125772

Man, A. (20 de mayo de 2008). Limnocharis flava (yellow bur-head). *CABI Compendium*. https://doi.org/10.1079/cabicompendium.30804

Maricle, B. R., & Lee, R. W. (2007). Root respiration and oxygen flux in salt marsh grasses from different elevational zones. *Marine Biology, 151*, 413-423. https://doi.org/10.1007/s00227-006-0493-z

Mathuriya, A.S., Jadhav, D. A., & Ghangrekar, M.M. (2018). Architectural adaptations of microbial fuel cells. Applied *Microbiology and Biotechnology*, *102*, 9419–9432. https://doi.org/10.1007/s00253-018-9339-0

Netter, R. (1994). Flow Characteristics of Planted Soil Filters. *Water Science & Technology, 29*(4), 37-44. https://doi.org/10.2166/wst.1994.0153

Nitisoravut, R. & Regmi, R. (2017). Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. *76*, 81 – 89.

Olguín, E. & Hernández E. (1998). Use of aquatic plants for recovery of nutrients and heavy metals from wastewater. Institute of Ecology, Environmental Biotechnology. Vancouver. www.idrc.ca/industry/canada

Oon, Y. L., Ong, S. A., Ho, L. N., Wong, Y. S., Dahalan, F. A., Oon, Y. S., Lehl, H. K., Thung, W. E. & Nordin, N. (2018). Up-flow constructed wetland-microbial fuel cell for azo dye, saline, nitrate remediation and bioelectricity generation: From waste to energy approach. *Bioresource technology, 266*, 97-108. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.035

Oon, Y.L., Ong, S.A., Ho, L.N., Wong, Y.S., Dahalan, F.A., Oon, Y.S., Lehl, H.K., Thung, W.E. & Nordin, N. (2017). Role of macrophyte and effect of supplementary aeration in up-flow constructed wetland-microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and energy recovery. *Bioresource Technology*. *224*, 265–275.

Patel, D., Bapodra, S. L., Madamwar, D., & Desai, C. (2021). Electroactive bacterial community augmentation enhances the performance of a pilot scale constructed wetland microbial fuel cell for treatment of textile dye wastewater. *Bioresource Technology*, *332*, 125088. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125088

Ramírez-Vargas, C. A., Prado, A., Arias. C. A., Carvalho, P. N., Esteve-Núñez, A., & Brix, H. (2018). Microbial Electrochemical Technologies for Wastewater Treatment: Principles and Evolution from Microbial Fuel Cells to Bioelectrochemical-Based Constructed Wetlands. *Water*, *10*(9), 1128. https://doi.org/10.3390/w10091128

Ramos, A. (2019). Evaluación de la celda de combustible planta-microbiana (PMFC) y las condiciones de su entorno en la generación de energía eléctrica. [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria la Molina]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional Agraria la Molina https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4228

Raven, P. et al. (1971). Biology of plants. 5 ed. New York : Worth. 791p

Ren, H., Tian, H., Gardner, C.L., Ren, T.L. & Chae, J. (2016). A miniaturized microbial fuel cell with three-dimensional graphene macroporous scaffold anode demonstrating a record power density of over 10,000 W/m3. *Nanoscale*. 8, 3539-33547.

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. *Información Tecnológica*, *24*(6), 7–8. https://doi.org/10.4067/s0718-07642013000600004

Ríos, R.R. (2017). *Metodología para la investigación y redacción (*1^a *ed*.). Servicios Académicos Intercontinentales S. L. https://www.eumed.net/libros-gratis/2017/1662/1662.pdf

Rojas-Sandoval, J. and Acevedo-Rodríguez, P. (2022). Eichhornia crassipes (water hyacinth). *CABI Compendium*. https://doi.org/10.1079/cabicompendium.20544

Roldán, G. (1992). Fundamentos de limnología tropical. Medellín : Editorial Universidad de Antioquia. 529 p.

Rook, E. (2002). Flora, fauna, earth and sky. The natural history of the northwoods. www.rook.org/earl/bwca/nature/aquatics/lemna.htm

Royal Botanic Gardens, Kew. (n.d.). Lemna minor L. Plants of the World Online. Recuperado el 10 de febrero de 2024, de https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:526194-1

Royal Botanic Gardens, Kew. (n.d.). Limnocharis flava (L.) Buchenau. Plants of the World Online. Recuperado el 10 de febrero de 2024, de https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:58404-1

Rubina, E. (2020). Determinación de la cantidad de energía eléctrica a partir de electrones libres, producto de la actividad metabólica de los microorganismos, en las plantas de palma aceitera (Elaeis guineensis), cacao (Theobroma cacao) y césped torourco (Axonopus compresus), en la Universidad Nacional de Ucayali, región Ucayali, 2017. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Ucayali]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Ucayali http://repositorio.unu.edu.pe/handle/UNU/4345

Salinas, M. (2016). *Estudio de la generación de electricidad en un humedal artificial asistido electroquímicamente* [Tesis doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional UNAM. http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/11321

Saz, Ç., Türe, C., Türquer, O. C., & Yakar, A. (2018). Effect of vegetation type on treatment performance and bioelectric production of constructed wetland modules combined with microbial fuel cell (CW-MFC) treating synthetic wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*, 8777–8792. https://doi.org/10.1007/s11356-018-1208-y

Shaikh, R., Rizvi, A., Quraishi, M., Pandit, S., Mathuriya, A. S., Gupta, P. K., Singh, J., & Prasad, R, (2020). Bioelectricity production using plant-microbial fuel cell: Present state of art. South African Journal of Botany, 140, 393-408. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.09.025

Srivastava, P., Abbassi, R., Garaniya, V., Lewis, T., & Yadav, A. K. (2020). Performance of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetland coupled with a microbial fuel cell for treating wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, *33*, 100994. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100994

Strik, D. P. T. B., Hamelers, H. V. M., Snel, J. F. H., & Buisman, C. J. N. (2008). Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*, *32*(9), 870-876. https://doi.org/10.1002/er.1397

Sudirjo, E (2020). *Plant microbial fuel cell in paddy field : A power source for rural area* [Tesis doctoral, Universidad de Wageningen]. Repositorio institucional de la universidad de Wageningen https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/561323

Sundaravadivel, M., & Vigneswaran, S. (2001). Integrated Constructed Wetland-Microbial Fuel Cell using Biochar as Wetland Matrix: Influence on Power Generation and Textile Wastewater Treatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 31*(4), 351–409. https://doi.org/10.1080/20016491089253

Takanezawa, K., Nishio, K., Kato, S., Hashimoto, K. & Watanabe, K. (2010). Factors affecting electric output from rice-paddy microbial fuel cells. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry. *74*(6), 1271–3. https://doi.org/10.1271/bbb.90852

Tang, C., Zhao, Y., Kang, C., Yang, Y., Morgan, D. & Xu, L. (2019). Towards concurrent pollutants removal and high energy harvesting in a pilot-scale CW-MFC: Insight into the cathode conditions and electrodes connection. *Chemical Engineering Journal. 373*, 150-160. https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.05.035

Timmers, R., Strik, D., Hamelers, H. & Buisman, C. (2010a). Long-term performance of a plant microbial fuel cell with Spartina anglica. *Environmental Biotechnology. 86*, 973-981.

Timmers, R.A., Strik, D.P.B.T.B., Hamelers, H.V.M. & Buisman, C.J.N. (2010b). Characterization of the internal resistance of a plant microbial fuel cell. *Electrochcimica Acta. 72*, 165–171.

Tito, V., & Castillo, D. (2019). Generación de electricidad a través de microorganismos en los sedimentos de Humedales de Ite-Tacna. *Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna - Perú, 18,24*(1), 11 - 17. https://revistas.unjbg.edu.pe/index.php/cyd/article/view/779/833

United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. (n.d.). Eichhornia crassipes (Mart.) Solms. USDA PLANTS Database. Recuperado el 10 de febrero de 2024, de https://plants.usda.gov/home/classification/29504

Villaseñor, J., Capilla, P., Rodrigo, M. A., Cañizares, P., & Fernández, F. J. (2013). Operation of a horizontal subsurface flow constructed wetland – Microbial fuel cell treating wastewater under different organic loading rates. *Water Research, 47*(17), 6731-6738. https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.09.005

Wang, C., Chen, W., & Huang, R. (2010). Influence of growth curve phase on electricity performance of microbial fuel cell by Escherichia coli. *International Journal of Hydrogen Energy*, *35*(12), 7217-7223. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.01.038

Wang, G., Guo, Y., Cai, J., Wen, H., Mao, Z., Zhang, H., Wang, X., Ma, L., Zhu, M. (2019). Electricity production and the analysis of the anode microbial community in a constructed wetland-microbial fuel cell. *RSC Advances*, *9*(37), 21460-21472. https://doi.org/10.1039/C8RA10130B

Wang, J., Song, X., Wang, Y., Abayneh, B., Ding, Y., Yan, D., & Bai, J. (2016). Microbial community structure of different electrode materials in constructed wetland incorporating microbial fuel cell. *Bioresource Technology, 221*, 697-702. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.116

Watson, V. J. & Logan, B. E. (2011). Analysis of polarization methods for elimination of power overshoot in microbial fuel cells. *Electrochemistry Communications*. *13*, 54-56.

Winfield, J., Ieropoulos, I., Greenman, J. & Dennis, J. (2011). The overshoot phenomenon as a function of internal resistance in microbial fuel cells. *Bioelectrochemistry*. *81*, 22-27.

Wolińska, A., Stępniewska, Z., Bielecka, A. & Ciepielski, J. (2014). Bioelectricity production from soil using microbial fuel cells. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. *173*(8), 2287–2296. https://doi.org/10.1007/s12010-014-1034-8.

Xie, T., Jing, Z., Hu, J., Yuan, P., Liu, Y. & Cao, S. (2018). Degradation of nitrobenzene-containing wastewater by a microbial-fuel-cell-coupled constructed wetland. *Ecological Engineering 112*, 65-71. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.12.018

Xu, D., Xiao, E. R., Xu, P., Zhou, Y., Zhou, Q. H., Xu, D., & Wu, Z. B. (2016). Effects of influent organic loading rates and electrode locations on the electrogenesis capacity of constructed wetland-microbial fuel cell systems. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, *36*(2), 435-441. https://doi.org/10.1002/ep.12481

Xu, L., Zhao, Y., Fan, C., Fan, Z. & Zhao, F. (2017). First study to explore the feasibility of applying microbial fuel cells into constructed wetlands for COD monitoring. *Bioresource Technology*. *243*, 846-854. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.179

Xu, L., Zhao, Y., Tang, C. & Doherty, L. (2018a). Influence of glass wool as separator on bioelectricity generation in a constructed wetland-microbial fuel cell. *Journal of Environmental Management. 207*, 116-123. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.035

Xu, L., Zhao, Y., Wang, X. & Yu, W. (2018b). Applying multiple bio-cathodes in constructed wetland-microbial fuel cell for promoting energy production and bioelectrical derived nitrification-denitrification process. *Chemical Engineering Journal. 344*, 105–113. https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.03.065

Yadav, A. K., Dash, P., Mohanty, A., Abbassi, R., & Mishra, B. K. (2012). Performance assessment of innovative constructed wetland-microbial fuel cell for electricity

production and dye removal. *Ecological Engineering, 47*, 126-131. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.029

Yu, B., Liu, C., Wang, S., Wang, W., Zhao, S., & Zhu, G. (2020). Applying constructed wetland-microbial electrochemical system to enhance NH4+ removal at low temperature. *Science of The Total Environment, 724*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138017

Zaman, B., & Wardhana, I. (2018). Potential of Electric Power Production from Microbial Fuel Cell (MFC) in Evapotranspiration Reactor for Leachate Treatment Using Alocasia macrorrhiza Plant and Eleusine indica Grass. *E3S Web of Conferences, 31*. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183102010

Zayed, A. (1998). Phytoaccumulation of trace elements by wetlands. Journal of Environmental Quality. 27(3):715-721

Zhang, L., Zhu, X., Li, J., Liao, Q. & Ye, D. (2011). Biofilm formation and electricity generation of a microbial fuel cell started up under different external resistances. *Journal of Power Sources*. *196*, 6029-6035.

Zhang, S., Song, H. L., Yang, X. L., Li, H,. & Wang, Y. W. (2018). A system composed of a biofilm electrode reactor and a microbial fuel cell-constructed wetland exhibited efficient sulfamethoxazole removal but induced sul genes. *Bioresource Technology, 256*, 224-231. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.023

Zhao, Y., Collum, S., Phelan, M., Goodbody, T., Doherty, L., & Hu, Y. (2013). Preliminary investigation of constructed wetland incorporating microbial fuel cell: Batch and continuous flow trials. *Chemical Engineering Journal, 229*, 364-370. https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.06.023

Zhou, M., Chi, M., Luo, J., He, H., & Jin, T. (2011). An overview of electrode materials in microbial fuel cells. *Journal of Power Sources, 196*(10), 4427-4435. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.01.012

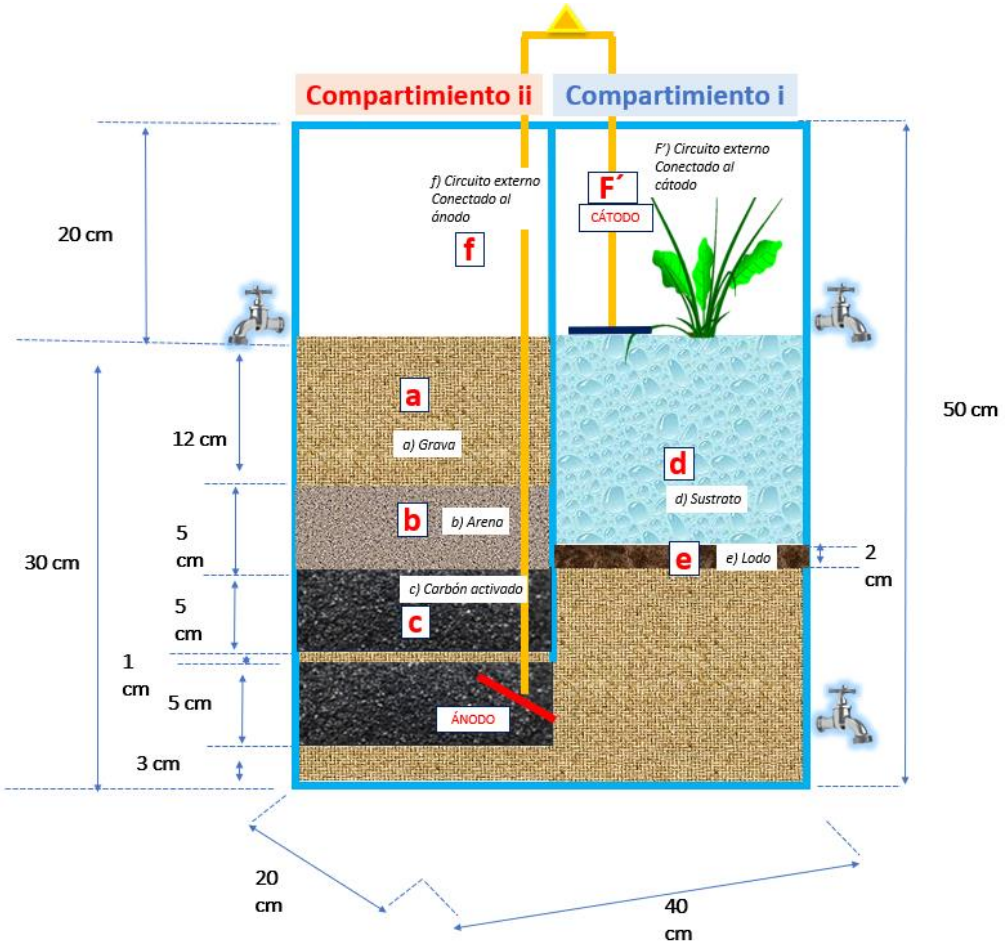
ANEXOS

Anexo 1
Matriz de consistencia

TÍTULO: "POTENCIAL ENERGÉTICO EN 03 TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANA INTEGRADAS A UN HUMEDAL CONSTRUIDO (CW-MFC)"						
Problema	**Objetivos**	**Hipótesis**	**Variables**	**Dimensión**	**Indicadores**	**Unidades de medida**
General ¿Cómo es la densidad de potencia en 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC)? Específicos -¿Cómo estarán conformados los 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC)? - ¿Cuál es la densidad de potencia en una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal huama amarilla *(Limnocharis flava)*? - ¿Cuál es la densidad de potencia en una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal putu putu *(Eichhornia crassipes)*? - ¿Cuál es la densidad de potencia en una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal hierba imperial lenteja de agua *(Lemma minor)*?	General Determinar la densidad de potencia de 03 tipos de celdas de combustible microbiana integrada a un humedal construido (CW-MFC). Específicos - Construir 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC) a nivel laboratorio. - Determinar la densidad de potencia de una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal huama amarilla *(Limnocharis flava)*. - Determinar la densidad de potencia de una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal putu putu *(Eichhornia crassipes)*. - Determinar la densidad de potencia de una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal lenteja de agua *(Lemma minor)*.	General La densidad de potencia en los 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC), no son iguales. Al menos un grupo difiere significativamente de los demás.	Independiente: X1: Tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC) Dependiente: Y1: Densidad de potencia	Variación en la Composición de las Especies Vegetales Cantidad de energía generada	> Tipo de especies vegetales utilizadas en el humedal > Densidad de potencia eléctrica	> unidad de *Limnocharis flava* > unidad de *Eichhornia crassipes* > unidad de *Lemna minor* > mW/m2

Anexo 2

Estructura de las celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC)



Anexo 3

Construcción de los sistemas de CW-MFC



Anexo 4

Recolección de muestras del sustrato “agua de la laguna Yarinacocha”



Anexo 5
Recolección de las especies vegetales



Anexo 6 Desarrollo de las especies vegetales



Anexo 7

Celdas de Combustible Microbiano Integradas a un Humedal Construido



Anexo 8

Monitoreo de la cantidad de bioelectricidad



Anexo 9

Formato de ficha de recolección de datos

Y: Potencial energético					
Tipo de sistema "CW-MFC":					
Número de semana: 01			Fecha: Día 1		
ESPECIE	Hora de medición	Repeticiones de lectura	Voltaje (mV)	Intensidad eléctrica (mA)	Potencia eléctrica (mW)
Lenteja de agua	09:00 a.m	R1	318	0,09	0,03
		R2	312	0,10	0,03
		R3	318	0,10	0,03
	01:00 p.m.	R4	364	0,12	0,04
		R5	376	0,10	0,04
		R6	370	0,11	0,04
Huama	09:00 a.m	R1	439	0,18	0,08
		R2	440	0,16	0,07
		R3	430	0,18	0,08
	01:00 p.m	R4	476	0,15	0,07
		R5	475	0,16	0,08
		R6	475	0,18	0,09
Putu Putu	09:00 a.m.	R1	625	0,10	0,06
		R2	535	0,07	0,04
		R3	549	0,08	0,04
	01:00 p.m.	R4	413	0,05	0,02
		R5	417	0,07	0,03
		R6	421	0,06	0,03
Número de semana: 01			Fecha: Día 2		
ESPECIE	Hora de medición	Repeticiones de lectura	Voltaje (mV)	Intensidad eléctrica (mA)	Potencia eléctrica (mW)
Lenteja de agua	09:00 a.m.	R1	446	0,14	0,06
		R2	433	0,10	0,04
		R3	410	0,11	0,05
	01:00 p.m.	R4	385	0,11	0,04
		R5	334	0,10	0,03
		R6	346	0,11	0,04
Huama	09:00 a.m.	R1	429	0,17	0,07
		R2	438	0,18	0,08
		R3	429	0,16	0,07
	01:00 p.m.	R4	470	0,16	0,08
		R5	475	0,14	0,07
		R6	473	0,17	0,08
Putu Putu	09:00 a.m.	R1	590	0,05	0,03
		R2	489	0,05	0,02
		R3	506	0,04	0,02
	01:00 p.m.	R4	538	0,06	0,03
		R5	527	0,07	0,04
		R6	498	0,07	0,03