

## TÍTULO DEL PROYECTO:

“Potencial energético en 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC)”

## RESUMEN:

Las celdas de combustible microbiana integrada a un humedal construido (CW - MFC) han presentado una gran atención durante los últimos años, están compuestas por una sección anódica y catódica, cada una integrada por electrodos, microorganismos electrógenos, e incorporan a su sistema la vegetación, de manera que, adquiere los beneficios del proceso de fotosíntesis. Sin embargo, aún existe un número considerable de incógnitas en la investigación con respecto al diseño óptimo de los sistemas integrados, es importante realizar una selección adecuada de estos componentes que resultan claves 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.

Es por ello que se plantea como pregunta **¿Cómo** es el potencial energético en 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido?, para el cual el objetivo es determinar el potencial energético los 03 tipos CW-MFC, para el cual se realizará una investigación con enfoque cuantitativo y experimental, en la que se construirá 03 tipos de CW-MFC con 03 especies vegetales diferentes: *Limnocharis flava* (huama amarilla), *Eleutherine bulbosa* (yahuar piri piri) y *Axonopus scoparius*, *Hitchc* (hierba imperial). Cada sistema presentará dimensiones de altura 38 cm y diámetro de 20 cm, electrodos de fieltro de grafito y se operarán con una resistencia de 1000 ohmios. Se espera que los valores del potencial energético en los 03 tipos de celdas de combustible microbiana integrada a un humedal construido (CW-MFC) no sean iguales.

**Palabras clave:** Celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido; Potencial energético; *Limnocharis flava*; *Eleutherine bulbosa*; *Axonopus scoparius*, *Hitchc*.

## ABSTRACT:

In last years, Microbial fuel cells coupled constructed wetland (CW-MFC), have received a lot of attention. They are built into by anode and cathode camera, each one has an electrode and electrogenic microorganisms, on other hand, they use vegetation into their configuration in the way that CW-MFC get benefits from the photosynthesis process. Nevertheless, there are still a lot of unknown information during the research concerning the optimal design of these type of integrated systems, considering the conditions specific to each region with different kinds of vegetation.

For that reason, the main question of this work is “how is the energy potential in microbial fuel cells coupled constructed wetland (CW-MFC)?”, for which the objective is to determine the energy potential of the 03 types CW-MFC, it is for this reason that this investigation has a focus quantitative and experimental, three CW-MFC systems are going to be built using 03 different plant species like *Limnocharis flava* (huama amarilla), *Eleutherine bulbosa* (yahuar piri piri) and *Axonopus scoparius*, *Hitchc* (hierba imperial). Each system is going to present the same measurements (cm): height (38) and diameter (20), they are going to use graphite felt electrodes with a resistor of 1000 ohm. It is expected the values got about the energy potential of the 03 types of microbial fuel cells coupled constructed wetland (CW-MFC) don't be the same.

**Keywords:** Microbial fuel cells coupled constructed wetland; Energy potential; *Limnocharis flava*; *Eleutherine bulbosa*; *Axonopus scoparius*, *Hitchc*.

## I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. El problema de investigación

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) 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) 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 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.

En base a ello, surge la necesidad de conocer el comportamiento de las celdas de combustible microbiana integradas a humedales (CW-MFC) empleando especies vegetales de la región, esto con 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 regionales, tales como huama amarilla (*Limnocharis flava*), yahuar piri piri (*Eleutherine bulbosa*) y hierba imperial (*Axonopus scoparius*, Hitchc).

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

## 1.2. La pregunta de investigación

### General

¿Cómo es el potencial energético 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 el potencial energético en una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal huama amarilla (*Limnocharis flava*)?

- ¿Cuál es el potencial energético en una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal yahuar piri piri (*Eleutherine bulbosa*)?
- ¿Cuál es el potencial energético en una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal hierba imperial (*Axonopus scoparius*, Hitchc)?

### 1.3. La intención de investigación

La presente investigación pretende determinar el potencial energético que generará la implementación de celdas de combustible microbiana en humedales construidos, empleando especies vegetales de la región, para conocer de esta manera qué tipo de “CW-MFC” presenta las mejores condiciones para la obtención de energía eléctrica.

## II. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La motivación del presente proyecto sobre determinar el potencial energético de 03 tipos de CW-MFC a nivel laboratorio, radica en la necesidad de establecer una configuración ideal del sistema en la que se registre la máxima cantidad de energía posible, haciéndose énfasis que se trabajará con tres especies vegetales diferentes, de manera que en un futuro se pueda realizar un proyecto a una escala piloto.

Por lo que se desarrollará una celda de combustible microbiana integrada a un humedal (CW-MFC) compuesta principalmente por electrodos, conductor eléctrico y carga resistiva para la generación de energía, vegetación, matriz de soporte y la solución nutritiva. A raíz de dicha necesidad, este proyecto se justifica desde la innovación con la implementación de una celda de combustible microbiana en un humedal construido funcionando con vegetales que se encuentran en la región, hasta la generación de nueva información para determinar si la variación de estas especies vegetales es influyente en la media del potencial energético.

Esta propuesta se hace para brindar una respuesta a una de las inquietudes que han sido formuladas por diferentes autores a lo largo de los años. Los logros que se pretenden alcanzar son:

- Construir 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC).
- Determinar si los valores del potencial energético en los 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC), no son iguales.

Así mismo, con este proyecto se contribuye académicamente a la generación de nuevos conocimientos sobre la CW-MFC, cuyo valor puede tener una trascendencia local, porque no se ha registrado ninguna investigación que aplique los CW-MFC para la obtención de energía.

## III. HIPÓTESIS

- El potencial energético en los 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC), son diferentes.

## IV. OBJETIVOS

### 4.1. Objetivo General

Determinar el potencial energético de 03 tipos de celdas de combustible microbiana integrada a un humedal construido (CW-MFC).

### 4.2. Objetivos Específicos

- Construir 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC) a nivel laboratorio.

- Determinar el potencial energético de una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal huama amarilla (*Limnocharis flava*).
- Determinar el potencial energético de una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal yahuar piri piri (*Eleutherine bulbosa*).
- Determinar el potencial energético de una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal hierba imperial (*Axonopus scoparius*, Hitchc).

## V. ANTECEDENTES

Gómez y Medina (2021), realizó la investigación *Bioelectricidad generadas por pilas de combustible microbiana de Hierbabuena (Mentha spicata) y Cinta (Chlorophytum comosum) - Yanacancha - Chupaca - 2021*, de carácter aplicativo y enfoque cuantitativo. Construyeron (03) pilas de combustible microbiana para cada especie de plantas, regadas con agua potable, usaron grafito para los electrodos. Posteriormente a 7 días de evaluación, como resultado se obtuvo que el sistema que tenía la especie cinta como vegetación alcanzó 505,45 mV, un valor alto frente a 245,37 mV producidos por el sistema de 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  $\Omega$ , y un total de 40,8 cm<sup>2</sup> de área para los electrodos circulares compuestos de grafito. Obtuvo como resultado un valor máximo para la densidad de potencia de 273,23 mW/m<sup>2</sup>, 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.

Ge et al. (2020) en su estudio titulado *Generación de bioenergía y eliminación simultánea de nitrato y fósforo en una pila de combustible microbiana de humedal construida a base de pirita*, 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 fibra de carbono (12 cm de ancho, 1 mm de espesor), distanciados en 30 cm. El sistema empleó una resistencia de 1000  $\Omega$ , 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/m<sup>2</sup> y 6,74 mW/m<sup>2</sup>.

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 compressus), 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/m<sup>2</sup>), se logró en el cultivo de cacao con el grafito y alambre galvanizado como electrodos.

Llana (2020), realizó la investigación *Evaluación de la 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 cm<sup>2</sup>, 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/m<sup>2</sup>).

Wang et al, (2019a) realizaron la investigación *Producción de electricidad y análisis de la comunidad microbiana del ánodo en una pila de combustible microbiana de humedal construida* con un diseño experimental, para ello construyeron tres humedales artificiales de flujo vertical idénticos, alimentados 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 granulos de carbón activado y malla de acero inoxidable, conectados mediante conductor de cobre y a una resistencia de 1000  $\Omega$ . 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<sup>-3</sup>) se obtuvieron en el sistema que no empleó nitratos, con un TRH de 3 días.

Tang et al. (2019), en la investigación *Hacia la eliminación simultánea de contaminantes y la recolección de alta energía en un CW-MFC a escala piloto: información de las condiciones del cátodo y la conexión de electrodos*, 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 fibra de carbono, los ánodos se ubicaron secuencialmente debajo del cátodo a (50; 40; 30 y 20 cm). Los resultados indican que en la conexión en paralelo la densidad de potencia (mW/m<sup>2</sup>) es mejor a 30 cm de distancia entre electrodos, presentando valores como (1,55 en condiciones de aireación, 3,09, circulación, y 7,99, aireación y circulación).

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) HC-CCM, c) HC-CCM sin vegetación. Cuyo TRH fue de 7 - 10 días, tasas de carga orgánica de 4,8–7,9 gDQO/m<sup>2</sup>·d, y periodo de operación de 180 días, aplicando una resistencia de 1000 ohm para electrodos de carbón activado granular. 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/m<sup>2</sup>; además se resalta que cuando el sistema radicular invade la zona anódica afecta el rendimiento porque ocasiona el aumento de la resistencia interna.

Miranda (2019), en su tesis *Obtención de energía eléctrica a partir de la materia orgánica biodegradable mediante el sistema integrado humedal construido - celda combustible microbiana*, aplicó una metodología experimental. Construyó dos sistemas (humedales integrados en celdas de combustible microbiano de flujo horizontal subsuperficial), en uno usó *Schoenoplectus californicus* como vegetación, y en el otro no, para ambos como matriz de soporte usó grava y zeolita, en los electrodos usó carbón activado granular. Después de 52 días de operación, los resultados demuestran que el valor más alto del voltaje (514,07 mV), densidad de potencia (22,28 mW/m<sup>2</sup>) y eficiencia coulombica (03 %) se registró en el sistema sin vegetación.

Xu et al. (2018b) en su estudio *Aplicación de múltiples biocátodos en celdas de combustible microbianas de humedales construidas para promover la producción de energía y el proceso de nitrificación y desnitrificación de origen bioeléctrico*, cuyo enfoque fue experimental, empleó lodos de digestión anaeróbica y lodos activados como sustrato, el ánodo consistía en una capa de granulos 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  $\Omega$ . 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<sup>2</sup>, concluyendo que el mayor número de biocátodos contribuyó a lograr una mayor potencia de salida.

Xu et al. (2018a), realizaron la investigación *Influencia de la lana de vidrio como separador en la generación de bioelectricidad en una pila de combustible microbiana de humedales construidos*, 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/m<sup>2</sup>) se registró en el sistema sin separador con un espaciado de 2 cm entre electrodos, frente al sistema con separador (17,14 mW/m<sup>2</sup>).

Xie et al. (2018), realizaron la investigación *Degradación de agua residuales que contienen nitrobenceno por un humedal artificial acoplado a celdas de combustible microbianas*, 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.

Saz et al. (2018) en su estudio *Efecto del tipo de vegetación en el rendimiento del tratamiento y la producción bioeléctrica de módulos de humedales construidos combinados con celdas de combustible microbianas (CW-MFC) que tratan aguas residuales sintéticas*, con enfoque experimental, construyeron 5 módulos de CW-MFC con 5 especies de macrofitas (densidad de planta de 10 rizomas/m<sup>2</sup>), 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 cm<sup>2</sup>, 20 cm debajo del cátodo, ambos se conectaron con alambres de cobre aislados y con una resistencia de 1000  $\Omega$ . El TRH fue de 4 días, y se operó el sistema por 88 días. Los resultados indican que la máxima densidad de potencia  $7,47 \pm 13,7$  mW/m<sup>2</sup> se obtuvo con *Typha angustifolia*, por lo que recomiendan su uso, debido a que aumenta la actividad de las bacterias electrogénicas.

Xu et al. (2017b) en su artículo titulado *Primer estudio para explorar la viabilidad de aplicar celdas de combustible microbianas en humedales construidos para el monitoreo de DQO*, con un diseño experimental, construyeron humedales artificiales 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  $\Omega$ . 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 1k $\Omega$ , *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/m<sup>3</sup>, mientras que si estaba conectado a un potencióstato alcanzaba el valor de 767,4 mW/m<sup>3</sup>.

Fang et al. (2016), realizaron la investigación *Efectos de la separación entre los electrodos y la condición de las aguas residuales en el rendimiento de humedal artificial acoplado con pila de combustible*



*microbiano* 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  $1\text{k}\Omega$ , 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  $(0,16 \pm 0.03 \text{ W/m}^3)$  con una resistencia interna de  $(958,14 \pm 032 \Omega)$ .

Oon et al. (2017) realizó un estudio titulado *Papel de los macrófitos y efecto de la aireación suplementaria en la pila de combustible microbiana de humedales construida de flujo ascendente para el tratamiento simultáneo de aguas residuales y la recuperación de energía*, cuyo enfoque fue experimental, se construyeron humedales artificiales a escala de laboratorio con lodo activado de una fábrica como sustrato. Los electrodos de carbón activado, estuvieron conectados mediante alambres de cobre a una resistencia de  $1000 \Omega$ . 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  $184,75 \pm 7,50 \text{ mW/m}^3$  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 *Evaluación a largo plazo de la mejor posición del cátodo para maximizar el rendimiento de la celda de combustible microbiana en humedales construidos con flujo subterráneo horizontal*, cuyo enfoque fue experimental, emplearon dos MFC integrados en un humedal ya existente para el tratamiento secundario de aguas residuales municipales. 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  $1000 \Omega$ , 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. (2017a) en su estudio *Efectos de las tasas de carga orgánica afluente y las ubicaciones de los electrodos en la capacidad de electrogénesis de los sistemas de celdas de combustible microbianas de humedales construidos*, 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  $500 \Omega$  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  $11,21 \text{ mW}\cdot\text{m}^2$  en el sistema c, explicándose por la influencia de la profundidad de las raíces de la planta que secretan oxígeno.

## VI. MARCO TEÓRICO

### 6.1. Celda de combustible microbiana (MFC)

La Celda de Combustible Microbiana (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  $\text{O}_2$  forman agua (Logan et al., 2006; Yadav, 2012).

Es una tecnología biológica y electroquímica (Beyenal et al., 2021), por otro lado, Jayapriya (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<sub>2</sub>, por lo 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).

## **6.2. Celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido (CW-MFC)**

Al igual de una celda de combustible microbiana, una CW - MFC también está compuesta por una sección anódica y catódica, cada una integrada por electrodos según corresponda, así mismo comparten la importancia de los microorganismos electrogenos, 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 CO<sub>2</sub> en las hojas de las plantas en forma de carbohidratos, finalmente el CO<sub>2</sub> es transferido a la raíz (Strik, 2008).

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.

## **6.3. Componentes de una CW-MFC**

### **6.3.1. 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 1**

*Clasificación de materiales usados para electrodos según sean carbono o grafito.*

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

Nota: 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 (NH<sub>4</sub>) (Huang et al., 2021).

#### 6.3.1.1. 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).

#### 6.3.1.2. 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).

#### 6.3.2. 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.

#### 6.3.3. 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.

#### 6.3.4. 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 2**

*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 con 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	$115.7 * 10^{-2}$

Nota: Obtenido de Sundaravadivel y Vigneswaran (2001).

#### 6.3.5. 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).

#### 6.3.5.1. Aclimatación de los 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.

#### 6.3.6. 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).

### 6.4. Parámetros de operación

#### 6.4.1. 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).

#### 6.4.2. Resistencia externa

Se han realizado diversos estudios para demostrar y explicar la influencia de una resistencia eléctrica externa sobre la producción eléctrica en CCM (Zhang et al., 2011; Buitrón & Moreno, 2014; Lyon, 2010). La producción eléctrica disminuye cambiando el valor de la resistencia eléctrica externa (Salinas, 2016).

La manipulación de la resistencia eléctrica externa en una CCM repercute en cambios en la morfología, la estructura y el tipo de comunidades de microorganismos en el ánodo, alterando los parámetros eléctricos (Salinas, 2016).

El voltaje de la celda obtenido con una resistencia externa conectada, afecta a la corriente circulando, mientras que la Variabilidad del voltaje en circuito abierto no es influenciada por una resistencia externa (Salinas, 2016).

En el momento en el que el circuito se cierra con una resistencia eléctrica externa – conectando ánodo y cátodo, la tensión de la celda decrece debido a la resistencia eléctrica total (con contribuciones de la cinética de reacción, la transferencia de masa y las resistencias óhmicas). (Salinas, 2016).

#### 6.4.3. Circuito eléctrico 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  $\Omega$  (Salinas, 2016).

### 6.5. 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 CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, 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 X.

**Tabla 3**  
*Comparación de sistemas CW-MFC con o sin plantas*

Proceso	% Eliminación DQO	% otros contaminantes	Máxima densidad de potencia	Corriente / densidad de corriente	Tensión (V) y CE (%) y Resistencia interna, R ( $\Omega$ )
Plantado ( <i>Iris pseudacorus</i> )	51.6	NH <sub>4</sub> : 71.9 NO <sub>3</sub> : 96.1 PO <sub>4</sub> : 96-97	25.1 mW/m <sup>2</sup>	78.9 mA/m <sup>2</sup>	V: 377 R: 326 CE: 8.9
No Plantado	36.6	NH <sub>4</sub> : 43 NO <sub>3</sub> : 89.9 PO <sub>4</sub> : 96-97	12.9 mW/m <sup>2</sup>	61.9 mA/m <sup>2</sup>	V: 203 R: 417 CE: 6.96
Plantado ( <i>Acorus calamus</i> )	88.1	NH <sub>4</sub> : 75	414 mW/m <sup>3</sup>	NA	V: 715 R: 453
No Plantado	80.2	NH <sub>4</sub> : 50	223 mW/m <sup>3</sup>	NA	V: 520 R: 487
Plantado ( <i>Canna Indica</i> )	88.1	TDS: 82.1	NA	NA	V: 0.86 CE: 1.75%
No Plantado	83.1	TDS: 77.5	NA	NA	V: 0.75 CE: 1.9%
Plantado ( <i>Ipomoea aquatic</i> )	94.8	TN: 90.8	12.4 mW/m <sup>2</sup>	NA	OCV: 0.74 V: 0.64 R: 156
No Plantado	92.1	TN: 54.5	5.13 mW/m <sup>2</sup>	NA	OCV: 0.62 V: 0.49 R: 256
Plantado ( <i>Ipomoea aquatic</i> )	85.7	Tasa de decoloración: 91.2%	300 mW/m <sup>3</sup>	0.85 mA/m <sup>3</sup>	V: 0.6–0.62 R: 218
No Plantado	82.7	Tasa de decoloración: 85.9%	190 mW/m <sup>3</sup>	0.67 mA/m <sup>3</sup>	V: 0.52–0.54 R: 279
Plantado ( <i>T. Orientalis</i> )	80	TN: 71	21.5 mW/m <sup>2</sup>	94.3 mA/m <sup>2</sup>	V: 0.24 R: NA CE: 0.23

No Plantado	74	TN: 62		51 mA/m <sup>2</sup>	V: 0.42 R: 800 CE: 0.38 V: 0.56
Plantado ( <i>Hydrilla verticillata</i> )	64	NH <sub>4</sub> : 88.9 NO <sub>3</sub> : 77.9 TP: 93.5	NA	NA	
No Plantado	55.3	NH <sub>4</sub> : 67.8 NO <sub>3</sub> : 78.9 TP: 95.1	NA	NA	V: 0.4
Plantado ( <i>Canna Indica</i> )	NA	NA	11.7 mW/m <sup>2</sup>	NA	OCV: 0.76 R: 400
No Plantado	NA	NA	18.6 mW/m <sup>2</sup>	NA	OCV: 0.72 R: 600
Plantado ( <i>Canna Indica</i> )	86.7	NO <sub>3</sub> : 87.1	8.39 mW/m <sup>2</sup>	48.4 mA	V: 0.23
Unplanted	79.6	NO <sub>3</sub> : 67.4	1.84 mW/m <sup>2</sup>	17.6 mA	V: 0.16

Nota: 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.

## VII. METODOLOGÍA

### 7.1. Lugar de estudio

El trabajo de investigación se ejecutará en las instalaciones de la Universidad Nacional de Ucayali, específicamente en el Laboratorio de Física de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, ubicado en la carretera Federico Basadre Km 6.2, distrito de Callería, departamento de Ucayali, con coordenadas UTM, 546 666,39 metros Este y 9 071 606,52 m Norte.

### 7.2. Población y tamaño de muestra

#### Población

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

#### 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 estará 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*), yahuar piri piri (*Eleutherine bulbosa*) y hierba imperial (*Axonopus scoparius*, Hitchc).

### 7.3. Descripción detallada de los métodos, uso de materiales, equipos o insumos

#### Enfoque de 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”.

#### Tipo de investigación

La investigación es del tipo básica, ya que la generación de nuestros conocimientos (Ríos, 2017).

#### Nivel de 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 aplicará 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 4**

*Descripción detallada de materiales, equipos e insumos a usar*

I		Materiales	
	Nombre	Descripción	
1.1.	Vegetación	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Huama amarilla (<i>Limnocharis flava</i>)</li> <li>· Yahuar piri piri (<i>Eleutherine bulbosa</i>)</li> <li>· Hierba imperial (<i>Axonopus scoparius</i>, <i>Hitchc</i>)</li> </ul>	
1.2	Solución nutritiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Agua de la Laguna Yarinacocha.</li> </ul>	
1.3	Matriz de soporte	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Lodo</li> </ul> <p>Se utilizará el lodo de la laguna Yarinacocha.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Relleno o lecho filtrante</li> </ul> <p>Se utilizará como relleno para el sistema CW-MFC: grava gruesa, grava fina y arena (lecho filtrante) de manera homogénea; empezando por el material más grueso hasta el más fino.</p>	
1.4	Electrodos	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Cátodo</li> </ul> <p>Siguiendo los pasos de Xu et al. (2018b), el material empleado para el cátodo será Fieltro de grafito, el cual estará adherido a una malla de acero inoxidable.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Ánodo</li> </ul> <p>El fieltro de grafito será empleado para el ánodo, al igual que el cátodo estará adherido a una malla de acero inoxidable.</p>	
II		Equipos	
2.1.	Multímetro digital	Instrumento de medición del voltaje eléctrico (mV) y amperaje (mA).	
2.2	Bomba peristáltica	Bomba peristáltica inteligente ajustable de laboratorio, de 12V, alta precisión, y con caudal de 30-260ml/min. Necesario para alimentar el sistema CW-MFC con las aguas residuales presentes en el contenedor afluente.	
2.3	Multiparámetro	Instrumento a prueba de agua que realiza mediciones de diversos parámetros del agua tales como el pH, la conductividad, el oxígeno disuelto y la temperatura.	
III.		Insumos	
3.1	Cable de conexión de los electrodos	El cable aislado de cobre será utilizado para la conexión entre los electrodos, de manera que permita el flujo de electrones.	
3.2	Bidón de 20 L	Se emplearán cuatro bidones de 20 litros para el transporte de agua residual a las instalaciones del proyecto. Y otros tres bidones de 20 litros, como contenedor de cada sistema CW-MFC.	
3.3	Bidón de 200 L	Se empleará un bidón de 200 litros para contener el agua residual afluente del sistema, y otro bidón de iguales condiciones para recepcionar el agua afluente del sistema.	
3.4	Resistor	El resistor a utilizar será 1000 ohmios.	
3.5	Malla de acero inoxidable	Alambre de acero inoxidable que servirá para entretejerse a través del fieltro de grafito del cátodo, y de esta manera sirva como colector de corriente Xu et al. (2018b).	



3.6	Material de conexión hidráulica	El tubo a utilizar será de Policloruro de Vinilo (PVC), con un diámetro de 2 pulgadas, con diámetro exterior de 54 mm. Por otro lado, para las conexiones se usará tubos en forma de “codo”.
3.7	Manguera	Utilizado para la succión de agua.
3.8	Pegamento para PVC	Insumo que servirá para adherir la superficie de los tubos y bidones a emplear.
3.9	Malla filtrante	Se usará malla de agua de red de nylon.

**Tabla 5**

*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	<p>La estructura que se utilizará para las 03 unidades experimentales será la misma, la cual consistirá en un bidón de capacidad volumétrica de 20 L, cuyas medidas de altura y diámetro corresponden a 38 cm y 20 cm respectivamente. Respecto a las capas que integrarán a los 03 tipos de CW-MFC, de abajo hacia arriba serán: grava gruesa de 8 a 10 mm de diámetro (9 cm), grava fina de 2 a 4 mm de diámetro (11 cm), lodo natural de la Laguna Yarinacocha (3 cm), ánodo (1 cm), grava fina (4 cm), arena (6 cm), cátodo (1cm), por último, la especie vegetal. A continuación, explayaremos en 02 componentes (electrodos y lodos):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Electrodos</li> </ul> <p>Respecto a los materiales para los electrodos (ánodo y cátodo), el fieltro de grafito será utilizado para tal fin, los cuales estarán adheridos a una malla de acero inoxidable que servirá como colector de corriente (Xu et al., 2018b). En ambos, el espesor será de 01 cm, y estarán separados a una distancia de 10 cm entre sí, así mismo se adaptará a la forma de la estructura CW-MFC, el cual será un cilindro cuyas dimensiones se mencionaron anteriormente. Por otro lado, estarán conectados a un resistor de 1000 ohmios mediante un cable aislado de cobre.</p>
Aclimatación de microorganismos	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Lodo (fuente de microorganismos)</li> </ul> <p>Como fuente abastecedora de los microorganismos se utilizará lodo de la Laguna de Yarinacocha, para ello una vez configurado los 03 tipos de CW-MFC previo a la operación, se tendrá un periodo de aclimatación de 10 días para los microorganismos (Xie et al., 2018).</p>
Aclimatación de especies vegetales	<p>El tiempo de aclimatación para cada especie vegetal será de 20 días tomando como referencia a Damian (2021) en su investigación realizada para CW-MFC.</p> <p>Es importante mencionar que tanto a la entrada como a la salida del sistema se colocará una malla de Nylon para garantizar que la alimentación del sistema sea líquida.</p>
Aclimatación del sistema	<p>Los 03 tipos de CW-MFC estarán alimentados por lo que se denomina “sustancia nutritiva”, la misma que será recolectada de la Laguna Yarinacocha, por lo que será el afluente. Esta sustancia nutritiva estará almacenada en un contenedor con una capacidad volumétrica máxima de 200 L, a partir de ello, mediante la fuerza de una bomba peristáltica, el afluente será transportado por conexiones de tubos que estarán conectados en la parte inferior de la estructura de los sistemas individuales de CW-MFC, como el flujo a emplear será ascendente vertical, se colocará un tubo en la parte superior de la estructura para que sea el conducto de salida del efluente, el mismo que será almacenado en un tanque con las características mencionadas en un principio.</p> <p>Es importante mencionar que tanto a la entrada como a la salida del sistema se colocará una malla de Nylon para garantizar que la alimentación del sistema sea líquida.</p>
Tiempo de retención hidráulica	<p>El caudal de entrada al sistema empleado será de 3.8 ml/min, y el TRH de 2 días (Oon et al., 2018).</p>
Periodo de operación	<p>Todos los experimentos se realizarán en modo de alimentación continua por 15 días, después del tiempo indicado para la inoculación de microorganismos y aclimatación de especies vegetales, para cada configuración a temperatura ambiente.</p>

Análisis de agua	Se realizará un análisis de laboratorio del afluente y efluente del sistema el séptimo día de operación, con el fin de caracterizar el porcentaje de remoción de materia orgánica del sistema.
Medición de parámetros de monitoreo	Se realizará la medición de los parámetros tales como pH, Conductividad, T° y OD para el cual se empleará un multiparámetro, registrando los datos en la Ficha de recolección mostrada en la figura X. La medición de estos parámetros tendrá dos registros: la primera a las 9:30 am y la segunda a la 1:30 pm.
Variable <b>dependiente</b> Y: Potencial energético	
Consideraciones	Especificaciones
Medición del potencial energético ponderado	Se utilizará el multímetro digital para las mediciones de Intensidad eléctrica (mA), Tensión eléctrica (mV), las cuales tendrán una frecuencia de medición de dos veces al día, siendo la primera a las 9: am y la segunda a la 1:00 pm, referente al cálculo de la potencia se aplicará la ecuación de $P (\text{potencia}) = V (\text{tensión eléctrica}) * A (\text{intensidad eléctrica})$ .

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

**Tabla 6**

*Descripción de variables*

Variables	Dimensión	Indicadores
Independiente: X1: Tipo de celdas de combustible microbiana integrada a un humedal construido (CW-MFC)	Parámetros monitoreables	- pH  -Conductividad  - Temperatura  -Oxígeno disuelto
Dependiente: Y1: Potencial energético	Cantidad de bioelectricidad	-Tensión eléctrica  -Intensidad eléctrica  -Potencia eléctrica

### d) Aplicación de prueba estadística inferencial

#### **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”.

Para establecer si existe incidencia en el potencial energético por parte del tipo de CW-MFC se empleará el programa estadístico SPSS V.28 en la cual se realizará el análisis ANOVA de un solo factor, en donde:

Ho = Los valores del potencial energético en los 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC), son iguales.

Ha = Los valores del potencial energético en los 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC), no son iguales.

**Tabla 7**

*Factor y niveles*

Factor	Niveles
Variable <b>Independiente</b> X: Tipos de celdas de combustible microbiana	<ul style="list-style-type: none"> <li>CW-MFC con especie vegetal huama amarilla (<i>Limnocharis flava</i>)</li> <li>CW-MFC con especie vegetal yahuar piri piri (<i>Eleutherine bulbosa</i>)</li> </ul>

integradas a un humedal construido  
(CW-MFC)

- CW-MFC con especie vegetal hierba imperial (Axonopus scoparius, Hitchc)

**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 trabajará con el P-valor en donde: si el P-valor es menor a 0.05 habrá significancia entre los tres tipos de CW-MFC. Si la tabla del ANOVA resuelve que son significativos se optará por la prueba de comparación de medias de Tukey al 95% de nivel de significancia.

**Tabla 8**

*Anova para el DCA*

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	$F_0$	Valor-p
Tratamientos	$SC_{TRAT} = \sum_{i=1}^k \frac{Y_{i\cdot}^2}{n_i} - \frac{Y_{\cdot\cdot}^2}{N}$	$k - 1$	$CM_{TRAT} = \frac{SC_{TRAT}}{k - 1}$	$\frac{CM_{TRAT}}{CM_E}$	$P(F > F_0)$
Error	$SC_E = SC_T - SC_{TRAT}$	$N - k$	$CM_E = \frac{SC_E}{N - k}$		
Total	$SC_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij}^2 - \frac{Y_{\cdot\cdot}^2}{N}$	$N - 1$			

**Tabla 9**

*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)
CW-MFC con especie vegetal huama amarilla.	09:00 a. m.	R1			
	09:00 a. m.	R2			
	09:00 a. m.	R3			
	01:00 p. m.	R4			
	01:00 p. m.	R5			
	01:00 p. m.	R6			
CW-MFC con especie vegetal yahuar piri piri.	09:00 a. m.	R1			
	09:00 a. m.	R2			
	09:00 a. m.	R3			
	01:00 p. m.	R4			
	01:00 p. m.	R5			
	01:00 p. m.	R6			
CW-MFC con especie vegetal hierba imperial.	09:00 a. m.	R1			
	09:00 a. m.	R2			
	09:00 a. m.	R3			
	01:00 p. m.	R4			
	01:00 p. m.	R5			
	01:00 p. m.	R6			

**Tabla 10**

*Cuadro ANOVA para los tres tipos de CW-MFC*

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F <sup>o</sup>	Valor P
Tipo de CW-MFC					
Error					
Total					

#### 7.4. Tabla de recolección de datos por objetivos específicos

Debido a que la técnica a emplearse en la investigación será la observación, se utilizarán como instrumentos las siguientes fichas de recolección de datos:

**Tabla 11**

*Ficha de recolección de parámetros monitoreados por día*

X: Tipo de CW-MFC / Parámetros de monitoreo						
Tipo de "CW-MFC":						
Número de semana:						
N° de día	Hora de medición	Repeticiones de lectura	pH	Conductividad	T°	OD
1	09:30 a.m.	R1				
		R2				
		R3				
	01:30 p.m.	R4				
		R5				
		R6				
2	09:30 a.m.	R1				
		R2				
		R3				
	01:30 p.m.	R4				
		R5				
		R6				
3	09:30 a.m.	R1				
		R2				
		R3				
	01:30 p.m.	R4				
		R5				
		R6				
4	09:30 a.m.	R1				
		R2				
		R3				
	01:30 p.m.	R4				
		R5				
		R6				
5	09:30 a.m.	R1				
		R2				
		R3				
	01:30 p.m.	R4				
		R5				
		R6				

**Tabla 12**

*Ficha de recolección del potencial energético por día*

Y: Potencial energético					
Tipo de "CW-MFC":					
Número de semana:					
Nº de día	Hora de medición	Repeticiones de lectura	Voltaje (mV)	Intensidad eléctrica (mA)	Potencia eléctrica (mW)
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			

## VIII. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

**Tabla 13**

### *Cronograma del proyecto de tesis*

[illegible]



## IX. PRESUPUESTO

**Tabla 14**

*Presupuesto*

ID	DETALLE	UNIDAD MEDIDA	COSTO UNITARIO (S/.)	CANTIDAD	COSTO TOTAL (S/.)
<b>MATERIALES</b>					
1.1	Huama amarilla	flora	S/ 10.00	1	S/ 10.00
1.2	Yahuar piri piri	flora	S/ 10.00	1	S/ 10.00
1.3	Hierba imperial	flora	S/ 10.00	1	S/ 10.00
1.4	Agua de la Laguna Yarinacocha	univ.	S/ 100.00	1	S/ 100.00
1.5	Lodo de la Laguna Yarinacocha	univ.	S/ 50.00	1	S/ 50.00
1.6	Grava gruesa (8 a 10 mm)	saco 40 kg	S/ 15.00	1	S/ 15.00
1.7	Grava fina (2 a 4 mm)	saco 40 kg	S/ 15.00	1	S/ 15.00
1.8	Arena	m3	S/ 4.00	1	S/ 4.00
1.9	Filtro de grafito	unid.	S/ 20.00	6	S/ 120.00
1.10	Malla de acero inoxidable de 10 x 10 cm	unid.	S/ 40.00	6	S/ 240.00
<b>EQUIPOS</b>					
2.1	Multímetro digital	unid.	S/ 500.00	1	S/ 500.00
2.2	Bomba peristáltica	unid.	S/ 300.00	1	S/ 300.00
2.3	Multiparámetro	unid.	S/1,200.00	1	S/ 1,200.00
2.3	Laptop	unid.	S/1,500.00	1	S/ 1,500.00
<b>INSUMOS</b>					
3.1	Cable aislado de cobre	m	S/ 8.00	3	S/ 24.00
3.2	Bidón de 20 L	unid.	S/ 25.00	3	S/ 75.00
3.3	Bidón de 200 L	unid.	S/ 100.00	2	S/ 200.00
3.4	Resistor de 1000 ohmios	unid.	S/ 1.00	20	S/ 20.00
3.5	Tubo de PVC 2"	unid.	S/ 8.00	6	S/ 48.00
3.6	Tubo en forma de codo	unid.	S/ 3.00	10	S/ 30.00
3.7	Manguera	m	S/ 8.00	10	S/ 80.00
3.8	Pegamento soldimix	paquete	S/ 10.00	5	S/ 50.00
3.9	Malla filtrante de nailon	m2	S/ 10.00	2	S/ 20.00
3.10	Extensión de corriente	unid.	S/ 51.00	1	S/ 51.00
3.11	Papel bond A4	paquete	S/ 6.00	1	S/ 6.00
3.12	Marcador indeleble punta gruesa	unidad	S/ 4.00	2	S/ 8.00
<b>SERVICIOS</b>					
4.1	Análisis de agua en laboratorio	unid.	S/ 350.00	2	S/ 700.00
<b>OTROS</b>					
5.1	Transporte	univ.	S/ 500.00	1	S/ 500.00
5.2	Alimentos y bebidas	persona	S/ 480.00	2	S/ 960.00
<b>SUB-TOTAL</b>					<b>S/ 6,846.00</b>
<b>IMPREVISTOS (3%)</b>					<b>S/ 547.68</b>
<b>TOTAL</b>					<b>S/ 7,393.68</b>

## X. BIBLIOGRAFÍA

- 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 construido 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>
- Araneda, I., Tapia, N., Lizama Allende, K. & Vargas, I. (2018). Constructed wetland-microbial fuel cells for sustainable greywater treatment. *Water*, 10 (7), 940. <https://doi.org/10.3390/w10070940>
- 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.
- Atieh, E., Muttucumar, 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>
- 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>
- 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 Journal*, 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 Cinto (Chlorophytum 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>
- 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. <https://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). Elsevier.
- Ji, B., Zhao, Y., Vymazal, J., Mander, U., Lust, R. & Tang, C. (2021). Mapping the field of constructed wetland-microbial fuel cell: a review and bibliometric analysis. *Chemosphere*. 262, 128366. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128366>
- 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>
- Lin, Y.-F., Jing, S.-R., Lee, D.-Y. & Wang, T.-W. (2002). Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system. *Aquaculture*. 209 (1-4), 169-184. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(01\)00801-8](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00801-8)
- 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, T., Xu, S., Lu, S., Qin, P., Bi, B., Ding, H., Liu, Y., Guo, X. & Liu, X. (2019). A review on removal of organophosphorus pesticides in constructed wetland: performance, mechanism and influencing factors. *Science of The Total Environment*. 651 (Pt 2), 2247-2268. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.087>
- 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/TO33\\_72160467\\_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unasam.edu.pe/bitstream/handle/UNASAM/4333/TO33_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>
- 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>
- Miranda, J. (2019). *Obtención de energía eléctrica a partir de la materia orgánica biodegradable mediante el sistema integrado humedal construido - celda combustible microbiana* [Tesis de grado, Universidad de Concepción]. Repositorio Institucional UDEC. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/3589>
- 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.
- 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.
- 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>
- 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/m<sup>3</sup>. *Nanoscale*. 8, 3539-3547.
- Ríos, R.R. (2017). *Metodología para la investigación y redacción* (1ª ed.). Servicios Académicos Intercontinentales S. L. <https://www.eumed.net/libros-gratis/2017/1662/1662.pdf>
- 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 tororco (Axonopus compressus), 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>
- Saeed, T. & Khan, T. (2019). Constructed wetlands for industrial wastewater treatment: alternative media, input biodegradation ratio and unstable loading. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 7 (2), 103042. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103042>
- 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. <https://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/11321>
- Saz, Ç., Türe, C., Türker, 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>
- 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> (REVISAR)
- 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>
- Takanazawa, 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. *Electrochimica 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>
- 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, G., Guo, Y., Cai, J., Wen, H., Mao, Z., Zhang, H., Wang, X., Ma, L., Zhu, M. (2019a). 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>
- Wang, X., Tian, Y., Liu, H., Zhao, X. & Peng, S. (2019b). The influence of incorporating microbial fuel cells on greenhouse gas emissions from constructed wetlands. *Science of The Total Environment*. 656, 270–279. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.328>
- 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. (2017a). 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. (2017b). 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 biocathodes 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 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> removal at low temperature. *Science of The Total Environment*, 724. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138017>
- 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>
- 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>

## XI. ANEXO

### 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	General	General	Independiente: X1: Tipo de celdas de combustible microbiana integrada a un humedal construido (CW-MFC)	Parámetros monitoreables	- pH - Conductividad - Temperatura - Oxígeno disuelto	- pH - µS/cm - °C - mg/L
¿Cómo es el potencial energético en 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC)?	Determinar el potencial energético de 3 tipos de celdas de combustible microbiana integrada a un humedal construido (CW-MFC).	El potencial energético en los 3 tipos de celdas de combustible microbiana integrada a un humedal construido (CW-MFC), son diferentes.				
Específicos	Específicos					
-¿Cómo estarán conformados los 03 tipos de celdas de combustible microbiana integradas a un humedal construido (CW-MFC)?	-Construir 03 tipos de celdas de combustible microbiana integrada a un humedal construido (CW-MFC) a nivel laboratorio.					
- ¿Cuál es el potencial energético en una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal huama amarilla ( <i>Limnocharis flava</i> )?	- Determinar el potencial energético de 01 celda de microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal huama amarilla ( <i>Limnocharis flava</i> ).		Dependiente: Y1: Potencial energético	Cantidad de bioelectricidad	-Tensión eléctrica -Intensidad eléctrica -Potencia eléctrica	- mV - mA -mW
- ¿Cuál es el potencial energético en una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal yahuar piri piri ( <i>Eleutherine bulbosa</i> ) ?	- Determinar el potencial energético de 01 celda de microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal yahuar piri piri ( <i>Eleutherine bulbosa</i> ).					
--¿Cuál es el potencial energético en una celda de combustible microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal hierba imperial ( <i>Axonopus scoparius</i> , <i>Hitchc</i> ) ?	- Determinar el potencial energético de 01 celda de microbiana integrada a un humedal construido con especie vegetal hierba imperial ( <i>Axonopus scoparius</i> , <i>Hitchc</i> ).					