



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Revisión sistemática: Clasificación de los sistemas de celda de combustible planta microbiana para la generación de bioelectricidad

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Ambiental

AUTORES:

Mendoza Yauri, Edith Monica (ORCID: 0000-0002-8215-610X)

Valeriano Muñoz, Diana Esther (ORCID: 0000-0001-6740-6505)

ASESOR:

Dr. Sernaqué Auccahuasi, Fernando Antonino (ORCID:0000-0003-1485-5864)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Calidad y Gestión de Recursos Naturales

LIMA – PERÚ

2020

Dedicatoria

A mis padres por su gran apoyo incondicional.

A mis hermanos en especial a Carlos y Roxana por ser ejemplo de superación, dándome los mejores consejos para ser una persona de bien.

Y por último para aquellas personas que mantuvieron su confianza y amistad hacia mí.

Monica.

A Dios, por acompañarme y guiarme en todo momento.

A mis padres por el apoyo incondicional y sobre todo por sus palabras de aliento para no decaer y seguir adelante.

A mis hermanos, por el apoyo que siempre me brindaron en el transcurso de mi etapa Universitaria.

Y por último a Samantha, por ser motivo de superación.

Diana.

Agradecimiento

Agradecemos a nuestro Padre Celestial, por habernos forjado en el camino, por darnos fortaleza, paciencia, sabiduría y salud para poder compartir este logro con los nuestros.

A nuestros padres, por habernos inculcado que con esfuerzo, trabajo y perseverancia todo se puede lograr.

A nuestros maestros y de manera muy especial al Dr. Fernando Sérnaque y al Dr. Lorgio Valdiviezo, por transmitirnos sus conocimientos científicos y dedicación durante el desarrollo de la presente investigación.

Por ultimo agradecemos a todas las personas que contribuyeron a este logro y esperamos contar siempre con su valioso e incondicional apoyo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Carátula	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenidos	iv
Índice de tablas	v
Índice de figuras	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
I.INTRODUCCIÓN.....	3
II.MARCO TEÓRICO	7
III.MÉTODO	21
3.1 Tipo de investigación y diseño.....	22
3.2 Categorías, subcategorías y matriz de categorización apriorística 23	
3.3 Escenario de estudio	24
3.4 Participantes.....	24
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	24
3.6 Procedimientos.....	25
3.7 Rigor científico.....	26
3.8 Método de análisis de información	27
3.9 Aspectos éticos	27
IV.RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	28
V. CONCLUSIONES	36
VI. RECOMENDACIONES	38
REFERENCIAS	40
ANEXOS	

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Antecedentes (Especies de plantas, características, resultados y autor)</i>	13
Tabla 2 <i>Matriz de categorización apriorística</i>	19
Tabla 3 <i>Datos incluidos en la revisión</i>	20
Tabla 4 Principios de operación	21
Tabla 5 <i>Factores que influyen en la generación de electricidad</i>	13

Índice de figuras

Figura 1. Celda de combustible planta microbiana (CCPM)	9
Figura 2. Tipos de CCPM a) CCPM Sedimento, b) CCPM techo o azotea, c) CCPM placa plana d) CCPM tubular, e) CCPM cilíndrica y f) CCPM tipo caja o de dos cámaras.	13
Figura 3. Reacción química en el ánodo y cátodo	31
Figura 4. Factores ambientales.....	32

Resumen

El objetivo de este informe de investigación es identificar los principios de operación y los factores que afectan al CCPM para la generación de bioelectricidad. Para ello se realizó una revisión sistemática y se recopiló información de los 5 últimos años, en idioma inglés y español, obtenidas de diferentes buscadores como en: Science Direct, Web of Science, Dialnet, Sprint, IEE, Google Académico, etc., en la cual se utilizó palabras claves teniendo en cuenta los criterios de exclusión e inclusión. De acuerdo a esta revisión realizada los resultados en base a los principios de operación de CCPM se identificó en su mayoría que tienen el mismo proceso para la generación de bioelectricidad, por lo tanto, de acuerdo a esta revisión realizada consideramos como principios de operación de CCPM a la reacción química que sucede en el ánodo y en el cátodo. Así mismo en base a los factores que afectan la eficiencia en la generación de bioelectricidad tales como la temperatura, humedad, intensidad de luz, pH, suelo, componentes de la celda son muy esenciales para mejorar el rendimiento en CCPM.

Palabras clave: CCPM, bioelectricidad, microorganismos, ánodo y cátodo.

Abstract

The objective of this research report is to identify the operating principles and factors that affect CCPM for the generation of bioelectricity. For this, a systematic review was carried out and information was collected from the last 5 years, in English and Spanish, obtained from different search engines such as: Science Direct, Web of Science, Dialnet, Sprint, IEE, Google Scholar, etc., in which will have keywords taking into account the exclusion and inclusion criteria. According to this review, the results based on the principles of operation of CCPM were identified as having the same process for the generation of bioelectricity, therefore, according to this review, considered as principles of operation of CCPM. to the chemical reaction that happens at the anode and at the cathode. Likewise, based on the factors that affect the efficiency in the generation of bioelectricity, stories such as temperature, humidity, light intensity, pH, soil, and cell components are very essential to improve performance in CCPM.

Keywords: CCPM, bioelectricity, microorganisms, anode and cathode.

I. INTRODUCCIÓN

El consumo diario de energía en el mundo, actualmente tiene una dependencia de los combustibles fósiles como fuente energética, debido al aumento poblacional, ya que cuenta con la necesidad del servicio para mejorar su calidad de vida y actividades que beneficie su hogar (Greenman et al., 2019, párr. 2-3). Debido al uso constante de los recursos fósiles, no solo ha aumentado la contaminación atmosférica, calentamiento global y enfermedades respiratorias, sino que también se ha visto afectado el agotamiento de la reserva de los combustibles fósiles que afecta la seguridad del abastecimiento de energía en el futuro (Mishra et al., 2017, p.991).

Es por ello que en Europa se ha llevado a cabo rigurosas políticas de energía renovable, la Directiva de Energía Renovable ha establecido una meta de un 20% de producción de energía a través de fuentes renovables para el 2020 (Castresana et al., 2018, p.3), mostrando una obtención de electricidad de 21 GJ/ha por año (5800 KWh/ha por año) por medio de nuevas tecnologías renovables (Moqsud et al., 2015, párr.4).

Existen tecnologías que generan energías limpias, a partir del uso de los recursos renovables, tal como la energía eólica, hidroeléctrica, geotérmica y solar que ayudan a disminuir el CO₂ (Sarma y Mohanty, 2020, párr.2); de modo que, estas últimas utilizan células fotovoltaicas convencionales, lo cual conlleva a restricciones por costos económicos en la producción de energía a gran escala (Kabutey et. al., 2019, párr. 1).

No obstante, en relación al uso de células fotovoltaicas se desarrolla otra nueva tecnología que proporciona energía de manera sostenible, ecológica, confiable y rentable (Baicha, et. al., 2016, p. 104) con bajo costo económico y con producción de energía renovable para las asociaciones, comunidades pequeñas y viviendas individuales (Wu, et.al., 2020, párr.1).

El sistema de celda de combustible planta microbiana (PMFC, por su sigla en inglés) en un reactor electroquímico innovador (Cheng, et. al., 2020, p. 1163), que se ha convertido en una nueva fuente de energía renovable asistido con plantas microbianas (Treesubstorn y Thiravetyan, 2020,

párr.1) y se logra aprovechar su capacidad fotosintética que suministra con la acción microbiana, la biomasa y energía renovable que pasa hacia las raíces del suelo de la planta (Pamintuan, et. al., 2018, párr. 1), entorno a ello, al proporcionar dos electrodos (ánodo y cátodo) generan bioelectricidad sin poner en riesgo el crecimiento de la planta (Sarma y Mohanty, 2018, párr. 3).

Según el Instituto Nacional de Estadísticas (INEI, 2019, párr.1) dio a conocer la población total estimada del Perú con 32 millones 131 mil 400 habitantes, el 90% de la población peruana cuenta con acceso a electricidad en los 19 departamentos, mientras que, en otros departamentos como Amazonas y Loreto son los que tiene menos cobertura del servicio eléctrico (Gutiérrez, 2017, p.35), es decir, todavía existe la brecha de cubrir la falta de acceso de energía en zonas rurales ya que al no hacerlo, trae como consecuencia enfermedades, falta de desarrollo y baja calidad de vida.

En el Perú el servicio energético convencional es de uso diario en las industrias, hogares, entre otros, lo cual genera una amenaza del agotamiento de los recursos naturales (Greenman, Gajda y Leropolos, 2019, p. 2), a diferencia del campo energético a partir de las fuentes no convencionales aún entra a limitaciones prácticas como el bajo potencial de energía en desarrollo del país (Mishra et al., 2017, p.991). Debido a la situación es importante identificar técnicas económicas con fácil construcción y operación del sistema.

Por lo expuesto, el informe de investigación tiene como problema general: ¿Cuáles son las clasificaciones de los sistemas de celda de combustible planta microbiana usadas en la generación de bioelectricidad? El primer problema específico es: ¿Cuáles son los principios de operación del sistema de celda de combustible planta microbiana para la generación de bioelectricidad?, el segundo problema específico es: ¿Cuáles son los factores del sistema de celda de combustible planta microbiana que afectan la eficiencia en la generación de bioelectricidad?

Este estudio tiene una justificación teórica, ya que se pretende llenar el vacío de conocimientos, dado que, la existencia de información actualizada solo se encuentra en idiomas inglés, siendo escasa la información en nuestro idioma. Es por ello que se pretende aportar información ya realizada por los investigadores, profundizando en el contenido del marco teórico que permite obtener conocimientos actuales de las clasificaciones de los sistemas de celda de combustible planta microbiana para la generación de bioelectricidad, que consiste en nuevas tecnologías suministrado con las plantas biológicas que mediante su actividad en la etapa de rizosfera de la planta libera protones y electrones para luego ser transportados a los electrodos para obtener energía sostenible. Esta tecnología permite minimizar el uso de combustible fósil, evitar la contaminación ambiental, deterioro del ecosistema, reducción de los recursos convencionales e impacto a la salud humana.

Cabe destacar que, según Nitisravut y Regmi, esta tecnología comprende áreas multidisciplinarias que van desde el estudio de microbio, plantas, electroquímica y la ingeniería del campo actual, dado que la estructura y funciones desde una perspectiva de ingeniería es desde la detección ambiental bioquímica hasta la recolección y transporte de energía (Salim, 2019, p.3).

Por lo expuesto el objetivo general de la investigación es: Clasificar los sistemas de celda de combustible planta microbiana usada en la generación de bioelectricidad. El primer objetivo específico es: Identificar los principios de operación del sistema de celda de combustible planta microbiana para la generación de bioelectricidad, el segundo objetivo específico es: identificar los factores del sistema de celda de combustible planta microbiana que afectan la eficiencia en la generación de bioelectricidad.

II. MARCO TEÓRICO

En esta investigación se describirá de manera detallada los conceptos claves de la bioelectricidad, el uso de la celda de combustible planta microbiana como tecnología para la obtención de energía renovable, su clasificación de sistemas, los principios de operación y los parámetros fundamentales que afectan a los sistemas en el desarrollo del proceso.

Así mismo, se define que la bioelectricidad es energía sostenible (Souza, 2019, p. 256) puesto que se aprovecha de las fuente biológicas provenientes de plantas fotosintéticas y microorganismos del suelo (Rios, 2016, p. 5) ya que es parte de la producción de energía a través de un sistema de celdas de combustible planta microbiana (CCPM) (Mounia, et al., 2018, p. 254), esta tecnología es emergente en desarrollo de modo que no emite contaminantes de la fuente energética, minimiza la contaminación ambiental y conserva la biodiversidad (Kumar, et al., 2019, parr. 1).

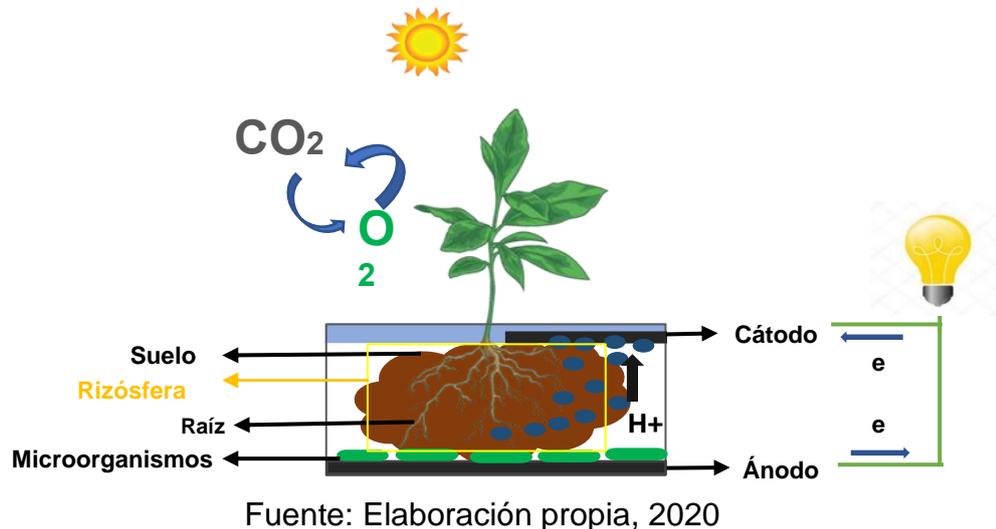
La CCPM es un sistema que interactúa con plantas, intensidad de luz y comunidad microbiana para el rendimiento y producción de energía (Jyoti y Mohanty, 2020, p. 137), basándose en los procesos que ocurre naturalmente sin necesidad de añadir materia orgánica (Ramos, 2019, p. 9). Es decir que, a través de la fotosíntesis, la planta absorbe la energía solar y el dióxido de carbono (CO_2) (Pamintun, 2018, párr. 1) con un promedio de 35 a 40 por ciento de energía para su respiración (Salin, et al., 2019, p. 12). Por tanto, el porcentaje que no se utiliza el aproximado de 60 a 70 por ciento se transfiere por la raíz de planta que se libera en la rizósfera, por medio del excretado en forma de rizodeposición (Chiranjeevi et al., 2019, párr.1).

La rizósfera es la pequeña área de suelo poblada de microorganismos (Venturi y Keel, 2016, p. 187), mientras que la rizodeposición es la reserva de materia orgánica liberado por las raíces de las plantas y que son degradados por los microorganismos (Chiranjeevi et al., 2019, párr.1)

Figura N° 1: Se muestra el tipo de CCPM con limitación y desarrollo, como se logra observar, en la parte superior del suelo se encuentra el cátodo y

en la parte inferior del suelo se encuentra el ánodo, donde se produce la degradación de la materia orgánica, a través de microorganismos electroquímicamente activos que liberan electrones y protones (Shen, et al., p. 312). No obstante, los electrones producidos por los microbes son transferidos directamente al ánodo (Borker, 2017, p. 402) y posteriormente se transportan a través un circuito externo hacia el cátodo donde los protones liberados migran al cátodo, ambos electrones y protones se encuentran y genera una reacción reduciendo el oxígeno formando agua (Wetser, 2016, p. 17.18). Lo que resulta la generación de energía que está establecido por los electrodos (ánodo y cátodo) (Chicas, et al., 2018, p.51)

Figura N° 1 celda de combustible planta microbiana (CCPM)



Este sistema cuenta con dos reacciones químicas que se dan en el ánodo y cátodo las cuales son: (Ramos, 2019, p.6).

En el ánodo:

Se produce la descomposición de la materia orgánica proveniente de las raíces de la planta en una solución acuosa, donde los microorganismos realizan dicha reacción de la siguiente manera:



En el cátodo:

El producto obtenido en el ánodo es captado a través del cátodo donde se produce una reacción electroquímica como se muestra en la siguiente reacción química.



La CCPM en la obtención de energía se clasifica en diferentes tipos de sistemas los cuales son: CCPM de sedimento, CCPM azotea, CCPM cilíndrico CCPM, tubular, CCPM tipo caja (macetero) (Borker, 2017, p. 404).

La CCPM en sedimento, consiste en la transformación y movilidad de los metales pesados presentes en sedimentos, para su posterior uso en la producción de bioelectricidad (Liu, Ji y Zhai, 2018, p. 739), utilizando plantas pantanosas como: lengua de agua (*Ipomoea acuatica*) (Nitorisavut y Regmi, 2017, p. 76), este sistema según Zhu, et al., construye un cilindro polimetacrilato de métilo (acrílico) con dimensión de 40 cm de diámetro y el interior de 40 cm de altura con una profundidad de sedimento de 15 cm y agua superpuesta a una profundidad de 5 cm (2019, p. 2159). Este proceso se aplica en los ríos contaminados con metales pesados, aguas residuales y lodos activados (Tiquia y Deepak, 2019, pp. 317 – 318).

Para la obtención de energía en CCPM de sedimento se considera la profundidad de las regiones anódicas que normalmente son sumergidos de 2 – 5 cm debajo del suelo y cátodo se deja en la superficie del agua (Nitorisavut y Regmi, 2017, p. 87), esta consideración consiste en mantener la distancia entre los electrodos ya que es un factor clave, que depende la resistencia interna del sistema y la densidad de potencia, así como también evita el corto circuito, mientras se da el proceso de obtención de energía (Fernández, 2015, p. 289).

Para CCPM en techo o azotea, es el desarrollo urbano sostenible que agregan el espacio verde no solo en las edificaciones, sino también, en zonas urbanas y en ciudades cubiertos con pavimentos (Tapia, et al., 2017, p. 72), entre sí generando bioelectricidad utilizando materia

orgánica liberada en el sustrato a través del sistema radicular por plantas fotosintéticas (Rusyn, 2020, p. 21), según los investigadores la planta más utilizada en el tipo de sistema es el musgo (*Hypnum cupressiforme* Hedw).

La construcción de CCPM en techos es importante considerar el grosor de unos 10 cm de arcilla que sirve para crear estructura de soporte de calor y agua (Konyuhov, et al., 2019. párr. 1 – 8). No obstante, este sistema beneficia a mejorar el rendimiento ambiental, reduciendo la contaminación atmosférica, los gases del efecto invernadero, CO₂, efectos al cambio climático y otros (Shafique, Kim y Rafiq, pp. 765 -766).

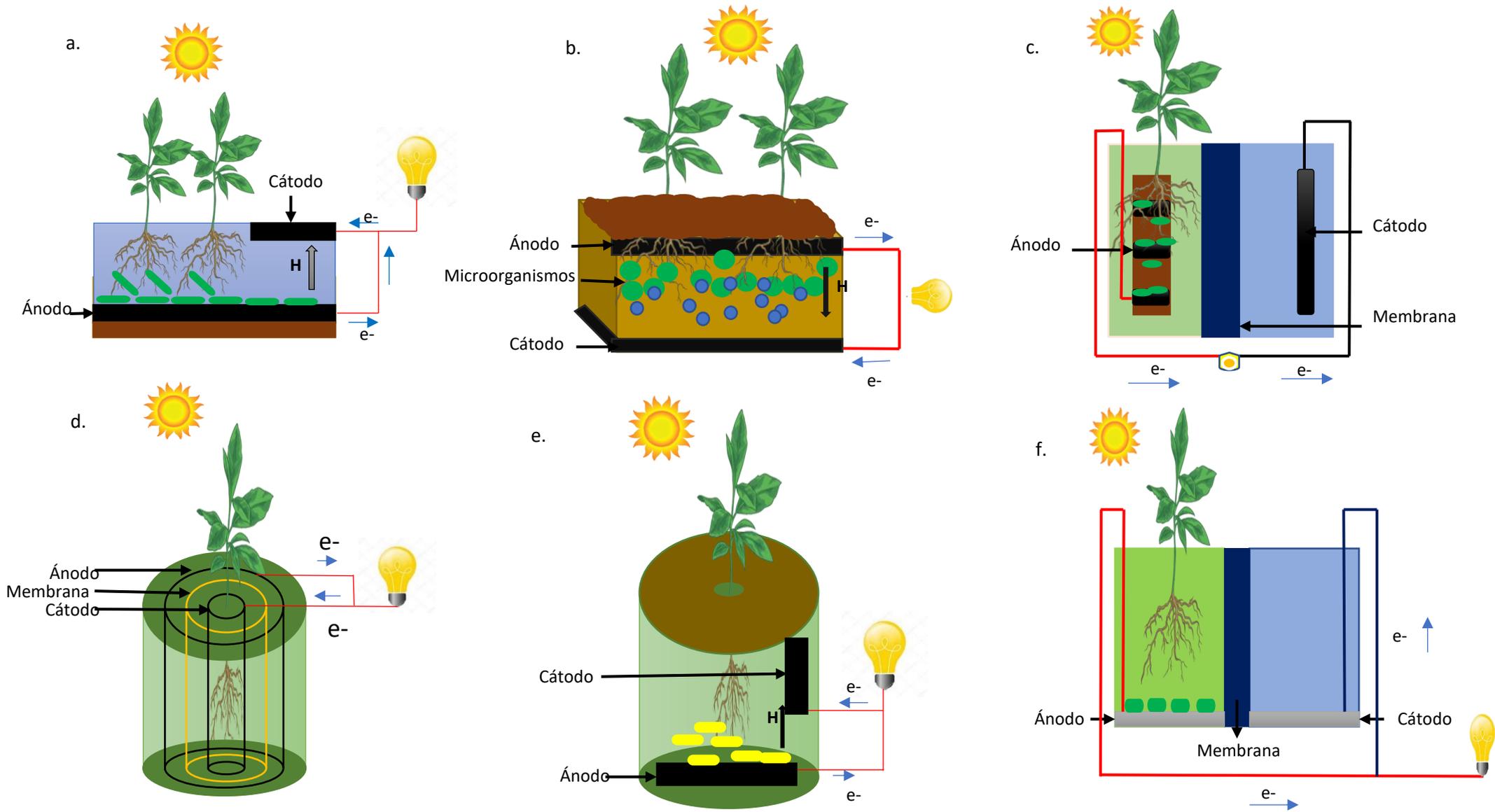
La CCPM cilíndrico, es un diseño que muestra los efectos del suministro de la materia orgánica como sustratos para la generación de bioelectricidad (Regmi, et al., 2018, parr. 3), este sistema se construye con diferentes dimensiones y materiales de acuerdo al tamaño de estudio a realizar, así según el trabajo de investigación del autor Lu et al., el cual elabora para esta investigación un recipiente de polimetacrilato de metilo con dimensiones de 13 cm de diámetro interno, 20 cm de altura y 1 cm de grosor para el estudio en humedales naturales (2015, p. 116). De igual manera el autor Regmi et al., construye usando una olla cilíndrica de tierra como cámara anódica con dimensiones de 14.85+- 0.45 cm de diámetro, 25,8 +- 0.2 cm de altura y 1.23 de espesor, mientras que la cámara catódica tiene 24 cm de diámetro 9 cm de altura y 2 cm de espesor con volumen de 250 – 2000 ml en estudio para el tratamiento de aguas residuales (2018, párr. 4). En ambos casos los autores usan la fibra de grafito como ánodo y acero laminado como cátodo, porque aumenta la producción de energía (Zhang, et al., 2019, párr. 1). Cabe destacar que, la CCPM cilíndrica de dos cámaras cuenta una membrana para la separación de cámara anódica y cámara catódica aplicables en tratamientos de aguas residuales (Zhang, et al., 2019, párr. 1), mientras que, una sola cámara se aplica en los tratamientos de suelos contaminados con metales (Yu, et al., 2019, p. 137) y en humedales naturales (Lu et al., 2015, p. 117).

La CCPM tubular, es un diseño que aumenta la viabilidad de la tecnología en reducir costos, se instala directamente en los humedales naturales y salinas sin escavar el suelo que altere su perturbación humedal (Wester, et al., 2017, p. 643), en ello los tubos son conectados a los humedales que es el núcleo de sistema de aire (Sugioka, Yoshida y Kazuki, 2019, párr. 1), donde está instalada el cátodo como reductor de oxígeno, colocada en la profundidad, el cual dependerá del tamaño de área estudiada como 1 metro aproximadamente (Wetser et al. 2017, p. 642) y el ánodo son envueltos alrededor del exterior de una membrana tubular de ultrafiltración, donde los microorganismos oxidan la materia orgánica, y la membrana de ultrafiltración son instaladas en los extremos del tubo (Borker, 2017, p. 406). Este sistema aplicado en los humedales salinos tiene 10 veces mayor producción de energía que en los mismo CCPM en suelos (Wetser, 2016, p.9).

En la CCPM en placa plana, posee reactores de tamaños iguales, en el cual está un cátodo y ánodo colocados en lados del otro separados por una membrana vertical (Chirajeevi, 2019, p. 555), separados por distancias iguales, dado que las distancias sean menores de los electrodos tiene alta resistencia interna y aumenta la tasa del intercambio iónica o catiónico (Pandit, Salva y Jung, 2020, p. 351), este sistema es el que menos transporta electrones, así como también cuenta con alta resistencia interna mejor que el sistema de CCPM tubular (Chirajeevi, 2019, p. 555)

La CCPM de tipo caja o de dos cámaras, consiste en una cámara anódica y una cámara catódica, ambos tienen la forma de caja y con las mismas dimensiones geométricas, el cual optimiza aumentar la concentración de materia orgánica y la densidad de potencial eléctrica durante el crecimiento de la planta (Borker, 2017, p. 407). Estas tecnologías se aplican en la agricultura y selvicultura donde despliega grandes fuentes de energía. (Imbrogno, et al., 2019, p. 269)

Figura N° 2: Tipos de CCPM a) CCPM Sedimento, b) CCPM techo o azotea, c) CCPM placa plana d) CCPM tubular, e) CCPM cilíndrica y f) CCPM tipo caja o de dos cámaras.



Los principios de operación de los sistemas consisten en la clasificación de las plantas, configuración de cámaras, materiales de electrodos, membrana y sustratos (Regmi, Nitisoravut y Jaranaboon, 2018, p. 606), el cual serán detallados tal como: la clasificación de las plantas por rutas fotosintéticas de tipo C3, C4 y CAM y por su fijación de oxígeno y dióxido de carbono (CO₂) (Guadarrama, et al., 2019, p. 5109).

Las plantas de tipo C3 (tres carbonos) son plantas vasculares terrestres como: dientes de león (*Taraxacum officinale*), arroz (*Oriza sativa*), tomate (*Solanum lycopersicum*), entre otros (Andrews, et al., 2018, p. 683), su crecimiento se extiende con la intensidad a luz solar y son adaptables a las temperaturas de 10 – 35°C con concentraciones de dióxido de carbono (Girsowicz, Moroenyane y Steiberger, 2019, p. 58), realiza su actividad fotosintética en proceso fotorespiración en condiciones cálidas y secas (Nitisoravut y Regmi, 2017, p. 83).

Las plantas de tipo C4 son plantas micrófitos que en su mayoría son plantas tropicales y fuentes de carbono orgánico como las plantas de helechos (*Tracheophyta*), musgos (*Bryophyta*), maíz (*Sea mays*), caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), entre otros (Mortillaro, et al., 2016, p. 90), viven en climas cálidos, secos y húmedos, tiene la estrategia de fijación de CO₂ que minimiza la fotorespiración (Chiranjeevi, et al., 2019, pp. 550), su condición óptima de la planta C4 es requerir alta cantidad de luz solar, humedad (Monza y Signorelli, 2017, p 89- 88), produce una cantidad de biomasa y son considerados de mayor actividad fotosintética en condiciones de humedad, en sequia moderada, en alta temperatura a comparación de otros tipos de plantas (Guadarrama, et al., 2019, p. 5109).

Para las plantas de tipo CAM (metabolismo ácido de las crasuláceas) son plantas como: nopal (*Opuntia ficus - indica*), piña (*Ananas comosus*), orquídeas (*Orchidaceae*) entre otros, desafiantes al clima (Brautigam, et al., 2017, p. 447) provenientes de la familia crasuláceas, suministra el CO₂, adaptables a condiciones ambientales desérticas ya que la planta tiene la disponibilidad de agua (Thomas, Murray y Murphy, 2017, p. 60) a diferencia de muchas plantas, crecen en ecosistemas áridos y semiáridos, donde constituyen el 50 % de biomasa vegetal (Hartzell, Bartlett y Porporato, 2018, p. 173), tiene un crecimiento muy lento con baja producción de biomasa (Nitisravut y Regmi, 2017, p. 83).

No obstante, la clasificación de las plantas mencionadas, son básicamente referente a sus actividades fotosíntesis que permite transportar oxígeno a sus raíces, en tales entornos del sistema de las raíces de la planta libera compuestos orgánicos donde las bacterias y microorganismos electroquímicamente activa convierte en electricidad (Mounia, et al., 2018., p. 254).

Los materiales de los electrodos consisten en mejorar la conductividad eléctrica, la resistencia a la corrosión y la resistencia mecánica en los sistemas de CCPM como el ánodo y cátodo (Kaur, et al., 2020, párr.1).

Los electrodos son componentes de CCPM de materiales de carbono como varillas de carbono, papel carbono, fibra de carbono, fieltro de grafito y materiales metálicos como malla de acero inoxidable, lámina de níquel y láminas de cobre (Wang, et al., 2016, p. 699), estos materiales son aplicados como ánodos y cátodos conocidos como polo positivo y negativo, receptores microbianos en CCPM (Mishra, et al., 2017, p. 912).

El electrodo anódico donde los microbios oxidan la materia orgánica presentes en CCPM en condiciones anaeróbicas (Cabezas et al., 2015, p.489), mediante el cual, produce electrones, protones y dióxido de carbono, en el que, los protones se transportan al cátodo a través del circuito externo, con o sin membrana de intercambio protónico (Allami, et al., 2018, párr. 5). El cátodo es el segundo electrodo, en donde los

protones y electrones reaccionan en función de reducir oxígeno (Rizzo, 2019, p. 16).

Cabe destacar que los materiales principales hechos de carbono o grafito, como papel o tela de carbón, se usan comúnmente para electrodos debido a la alta densidad de potencia (Niwa, zhenni y Shimamoto, 2020, parr. 9), en conexión con una varilla de grafito mejora adhesión al sustrato durante los periodos sin alimentar agua (Tapia, et al., 2017, p 205) así mismo el ánodo granulado de grafito enriquece con los microbios en la eliminación de los contaminantes y la generación de bioelectricidad (Tetteh, et al., 2019, p. 404) por otro lado se utiliza la tela de carbono como ánodo y cátodo conectados con el cable de cobre en la obtención de energía (Carmalin y Sreeja, 2017, p.61), los electrodos mencionados son prometedoras de mejorar el rendimiento en la producción de bioelectricidad.

CCPM se divide en dos categorías de cámara doble y una sola cámara, se enfatiza en CCPM de una sola cámara involucra a una cámara anódica sin membrana sin una cámara catódica, donde el cátodo esta acoplada en el exterior o en la superficie del sistema, es decir que el ánodo está expuesto en el interior del suelo con ausencia de oxígeno y el cátodo al aire libre (Kaur, 2017, p. 635), mientras que CCPM de doble cámara consiste en una separación de cámara anódica y cámara catódica, es decir que son separados por membrana de intercambio de protones (Narayan, solanki y Srivastava, 2019, p. 423), lo cual, este separador permite que el protón se transfiera a través del cátodo mientras evita la difusión de catolito (corrosivo) y O_2 al ánodo, para ello es importante considerar la distancia entre los electrodos y el separador por membrana, ya que es el factor clave de la resistencia interna del sistema.

Los parámetros fundamentales que afectan en el rendimiento de los sistemas de CCPM son: la temperatura, humedad intensidad de la luz y pH. Lo cual se define que, la temperatura es un factor importantes que influye en el rendimiento para la generación de energía en CCPM debido a mayores conducción que descarga de materia orgánica en forma de

rizodeposición (Rizzo, 2019, p. 21), las altas temperaturas en la operación de CCPM son beneficios en transferencia de electrones, baja resistencia, alta densidad de corriente, aumenta la velocidad bioquímica y mejora el crecimiento de los microorganismos en la rizosfera (Beevi, et al., 2019, p. 7), se han establecido algunos aspectos de la ciencia en relaciones con la temperatura, donde puede afectar la formación de biopelícula y la conductividad electrolítica, por lo tanto es favorable estudiar los PMFC para la generación de bioelectricidad es en términos de temperaturas muy bajas (0-20 ° C), de rango medio (20-50 °C) y altas (más de 50 ° C). (Regmi, Nitorisravut y Jaranaboon, 2018, p. 609).

La humedad, es un papel importante para el crecimiento de la planta en condiciones de baja humedad (Alani, Joseph y Moses, 2016, p. 139), así mismo durante la humedad los microbios oxida la materia orgánica que mejora el rendimiento en los sistemas (Rizzo, 2019, p. 21) una humedad alta prosperan los patógenos como también afecta a los cables conductores que se encuentra en malas condiciones (Moqsud, 2015, p. 65), En el caso de CCPM, el suelo se riega regularmente para retener la humedad, ya que la humedad es uno de los aspectos importantes que mantienen el flujo de electrones de manera eficiente (Howe, et al., 2019, p. 95). Para Rusyn indica en su estudio de CCPM en techo, cuando cae 70.9 mm de precipitación durante un periodo lluvioso aumenta el potencial de bioelectricidad (2018, p. 25). Por lo tanto, la humedad relativa es de aproximadamente de 30% a 35 % en los sistemas, las mediciones deberán ser realizados bajo condiciones climáticas de día, despejado y soleado (Popek, 2018, p. 57).

La intensidad de la luz son factores físicos que afecta fuertemente el crecimiento de la planta inicial (Nguye y Nitorisravut, 2019, p. 241), por tanto, la CCPM son implementadas en condiciones de luz natural con una intensidad de luz promedio de 700 Wm², iluminado por 12 horas por día desde su crecimiento de semilla (Carmalin y Sreeja, 2017, p.61), de tal forma a condiciones de temperatura ambiente promedio de 20 +/- 2 ° C y 32 +/- 2°C los periodos de la luz se extienden durante los 14 horas por día

en una radiación promedio de $23 \pm 2 \text{ Wm}^{-2}$ (Tapia, et al, 2017, p. 205) cabe destacar que, con mayor intensidad solar, la planta captura energía y genera mayor cantidad de compuestos orgánicos en la rizosfera (Rizzo, 2019, p. 22), y con mayor cantidad de microorganismos presentes en el suelo que degradan la materia orgánica aumenta la producción de energía (Regmi, 2017, p. 12) y en caso de ausencia de la luz solar reduce la potencia energética (Khudzari, et al., 2018, p. 77).

El pH facilita la transferencia de electrones y protones desde el ánodo hacia el cátodo en el sistema de CCPM (Nava y Castillo, 2018, p.28), cuando un pH es neutro en el ánodo conserva las condiciones ambientales para actividad microbiana y proporcionan mayor corriente eléctrica en los sistemas de CCPM (Pineda y Rosas, 2016, p. 126), si el gradiente de pH es alto entre el ánodo y cátodo conduce a una disminución en el rendimiento de los sistemas (Regmi, Nitisoravut y Jaranaboon, 2018, p. 608) para el rendimiento a largo plazo de los dichos sistemas debe mantenerse en desequilibrio del pH en la región anódica y catódica.

A continuación, como parte del marco teórico se mencionan los antecedentes que se refieren a la revisión de trabajos del presente informe de investigación.

Tabla N°1: Antecedentes (Especies de plantas, características, resultados y autor)

Especies de plantas	Características de la celda	Resultados (Densidad de potencia maxima)	Autor
plantas de arroz	Se uso estiercol de vaca y tierra de jardin, CCPM en techo, 1 camara, el material de electrodos (anodo, catodo) fueron de fibra de carbono, no posee membrana, el tiempo fue de 110 días	12.17 mW/cm ²	Moqsud et al., 2015
Anglica espartina	Se uso humedales de marisma y suelo de turba respectivamente. Se usaron macetas de tubos de PVC (75mm de diametro). El material de electrodos (ánodo, cátodo) fueron de filtros de grafito, tiene una membrana de intercambio de protones. Dos cámaras. El tiempo del experimento fue de 151 días	18 mW/m ²	Wetser et al.,2015
Phragmites australis		1.3 mW/m ²	
Canna indica	Se uso suelo, El material de electrodos para anodo fue la tela de carbono y para catodo el paño de carbono, se uso grava como membrana de intercambio de protones. Dos camaras. El tiempo de operación fue de 90 días	18 mW/cm ²	Lu et al.,2015
Totora(Typha latifolia)	Se uso aguas residuales. El material de electrodos para anodo y catodo fue el carbon activado. Una camara. El tiempo del experimento fue de 228 días	93 mW/m ³	Oon et al.,2016
Echinochloaglabrescens	Se uso suelo. El material de electrodos para anodo fue la fibra de carbono y para catodo el acero inoxidable. Una camara. El tiempo del experimento fue de 70 días	67.9 mW/m ²	Bombelli et al.,2016
especies de hierbas (Sporobolasarabicus)	Se uso suelo. El material de electrodos para anodo como para catodo fue el grafito. Una camara. El tiempo del experimento fue de 120 días	120 mW/m ²	Gilani et al., 2016
O. sativa	Se uso suelo. El material de electrodos para anodo como para catodo fue el filtro de grafito. Una camara. El tiempo del experimento fue de 93 días	140 mW/m ²	Ueoka et al.,2016
Phragmites australis	Se uso suelo. El material de electrodos para anodo como para catodo fue el filtro de grafito. Una camara. El tiempo del experimento fue de 160 días	22 mW/m ²	Wetser et al.,2017
Anglica espartina		82 mW/m ²	

Caña común (<i>Phragmites australis</i>)	Se uso lodos anaerobios. El material de electrodos para anodo como para catodo fue el carbon activado granular. Una camara. El tiempo del experimento fue de 120 días	0.15 mW/m ³	Song et al.,2017
<i>Vallisneria spiralis</i> L.	Se uso sedimento de lago. El material de electrodos para anodo como para catodo fue el filtro de grafito. Una camara. El tiempo del experimento fue de 190 días	3.16 mW/m ²	Xu et al., 2017
Plantas de agua dulce	Se usaron 2 tipos de suelo: suelo orgánico y sedimento marino respectivamente, se usaron cubos de plásticos de 28 cm de longitud y 28 cm de diámetro, no se agregaron fertilizantes ni productos químicos, se usó un electrodo (anodo, catodo) de forma circular hecho de fibra de carbono.	20 mW/m ²	Moqsud et al., 2017
Plantas de agua de mar			
<i>Cyperus involucratus</i>	Se suelo y aguas residuales. El material de electrodos para anodo como para catodo fue el filtro de grafito. Una camara. El tiempo del experimento fue de 5 días	5.99 mW/m ²	Nitorisravut y Regmi,2017
<i>Brassica juncea</i>	Se uso suelo mezclado con compost (desechos de jardín). Se usaron macetas de 10 cm de altura y 5 cm de ancho.Se construyó un CCPM cilíndrico. Se uso anodo hecho de escobillas de carbón y como catodo de aire tela de carbón hidratada con un separador de mezcla de arcilla. Dos camaras. El tiempo que duro el experimento fue de 35 dias	69.32 mW/m ²	Sophia y Sreeja,2017
<i>Trigonella foenum-graecum</i>		80.26 mW/m ²	
<i>Canna stuttgart</i>		222.54 mW/m ²	
<i>Epipremnum aureum</i>	Se uso estiércol de vaca y suelo de jardin. Se usaron contenedores de 12 cm de diametro y 8 cm de altura de plástico. Se uso un electrodo (anodo, catodo) hecho de fibra de carbono y 1 menbrana de arcilla basada en bentonita.Dos camaras. El tiempo que duró el experimento fue de 60 días	15.38 mW/m ²	Sarma y Mohanty,2018
<i>Dracaena braunii</i>		12.78 mW/m ²	
<i>Chasmanthe floribunda</i>	Se uso tierra de jardin. Se uso anodo hecho de cepillo y como catodo filtro de grafito. Una camara. El tiempo que duro el experimento fue de 100 dias	0.21 mW/m ²	Azri et al.,2018
<i>Papyrus diffusus</i>		1.083 mW/m ²	
<i>Acorus tatarinowii</i>	Se uso arena de silice y sedimentos. El material de electrodos para anodo como para catodo fue el filtro de grafito. Una camara. El tiempo del experimento fue de 51 días	21 mW/m ²	Llu et al.,2018
Planta de Maiz (<i>Zea mays</i> L.)	Se uso suelo preparado (50%de musgo, 30 % de compost, 20% de suelo de chacra). Macetas transparentes (Altura: 20 cm, diámetro: 22 cm).Se colocaron los electrodos (ánodo y cátodo), como ánodo se uso el grafito y como catodo se uso la alcayata de acero. Una cámara. El tiempo que duro el experimento fue de 46 dias.	80 mW/cm ²	Ramos,2019
<i>Agapanthus africanus</i>	Se uso suelo con compost. Altura (16.5 cm), diametro superior (21 cm), diametro inferior (15 cm). Se uso electrodos (anodo, catodo) hecho de fibra de carbono. Una cámara. El tiempo que duro el experimento fue de 31 días.	15.55 mW/cm ²	Gomora et al.,2020

III. MÉTODO

3.1 Tipo y diseño de investigación

El tipo de investigación del presente informe es BÁSICA, ya que se caracteriza por originarse de un marco teórico y mantenerse en él, así mismo amplía los conocimientos científicos, sin contrastarlos con ningún aspecto práctico (Muntané, 2010, p.221), es necesario contar con una base de conocimientos previos, basados en la obtención y recopilación de información.

En el presente informe se dio un diseño cualitativo narrativo de tópicos, en la cual se utilizó una perspectiva que provee de una estructura para que sea entendible la investigación y de esa manera escribir la narrativa que se enfoque entorno a un tema, así mismo se recolecta la información a través de libros, artículos publicados, etc. y posteriormente se narró e identifico las categorías (Antología, 2017, p.506).

3.2 Categorías, subcategorías y matriz de categorización apriorística

El informe se dividió por categorías y subcategorías, lo cual nos permitió alcanzar los objetivos específicos y responder a los problemas específicos, para ello se presentó en la tabla N° 2:

Tabla N°2: Matriz de categorización apriorística

Objetivos Específicos	Problemas específicos	Categoría	Subcategoría	Unidad de análisis
Identificar los principios de operación del sistema de celda de combustible planta microbiana para la generación de bioelectricidad.	¿Cuáles son los principios de operación del sistema de celda de combustible planta microbiana para la generación de bioelectricidad?	Principios de operación	Reacciones químicas En ánodo En cátodo	Kaur, (2017, p. 635) Narayan, et al. (2019, p. 423) Cabezas et al., (2015, p.489) Allami, et al., (2018, párr. 5) Rizzo (2019, p. 16), Doherty et al., 2015, p.40) Girsowicz, et al., (2019, p. 58) Nitorisavut y Regmi, (2017, p. 83).
Identificar los parámetros fundamentales del sistema de celda de combustible planta microbiana para la generación de bioelectricidad	¿Cuáles son los factores del sistema de celda de combustible planta microbiana que afectan la eficiencia en la generación de bioelectricidad?	Factores que afectan la eficiencia en la generación de bioelectricidad	Ambientales (T, Humedad, Intensidad de la luz, ph) Suelo Componentes de celda	Rizzo (2019, p. 21) <u>Beevi</u> , et al. (2019, p. 7) Regmi, et al., 2018, p. 609) Alani, et al. (2016, p. 139) Moqsud (2015, p. 65) Regmi, et al., 2018, p. 609) Nguye y Nitorisavut,(2019, p. 241) Rizzo (2019, p. 22 Regmi, (2017, p. 12).

Fuente: Elaboración propia

3.3 Escenario de estudio

En esta investigación, no existe un escenario específico de estudio por tratarse de una revisión sistemática.

3.4 Participantes

Los participantes son artículos científicos de revistas indexadas, capítulos de libros, tesis doctorales, de las cuales se seleccionaron de las siguientes bases de datos: google académico, Science Direct, Web of science, Dialnet, Sprint, IEE publicados en los últimos cinco años (desde el 2015 hasta la fecha).

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica usada en este estudio fue de análisis documental, ya que se describió y representó los documentos (libros, artículos científicos, revistas) de manera sistemática para suministrar su recuperación, para ello, se seleccionó los documentos relevantes y se recolecto la información, mediante una estructura de datos (Dulzaides y Molina, 2004, p.2).

Asimismo, el instrumento de recolección de datos se encuentra en el **Anexo 1** (tabla 3), la cual estuvo conformada por los datos sobre el autor, año de publicación, tipo de documento, país, título, tipo de celda, objetivo, metodología y resultados, de los cuales fueron organizados en una tabla para extraer la información.

3.6 Procedimientos

Se realizó una búsqueda específica que seleccionamos de las siguientes bases de datos como: google académico, Science Direct, Web of science, Dialnet, Sprint, IEE, para ello se determinó las siguientes palabras claves:

celda de combustible planta microbiana, PMFC, bioelectricity reviews pmfc, microbial plant fuel cell, generation of bioelectricity microbial plant fuel cell, green energy generation from cells. De esa manera obtuvimos 100 revisiones de las cuales se filtraron a través de los criterios de inclusión y exclusión, dando como resultados 85 artículos científicos, 5 tesis y 10 capítulos de libros.

En esta investigación se tuvo en cuenta los siguientes criterios de inclusión: artículos originales publicados en bases de datos científicas, entre los años 2015 y 2020, en idioma inglés y español, que mencionan las celdas de combustible planta microbiana utilizadas para la generación de bioelectricidad, los cuales se organizó y registro bajo un protocolo que recopila información de los siguientes campos: autor, año de publicación, tipo de documento, país, título, tipo de celda, objetivo, metodología y resultados (Anexo 1). Como criterio de exclusión: artículos que solo mencionen a las celdas de combustible microbiana. A continuación, en la **Tabla N°4** se muestra el resumen con los documentos empleados considerando los criterios de inclusión y de exclusión, la cual aparece a continuación:

Tipo de documento	Cantidad	Palabras clave de búsqueda	Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Artículo científico	85	Celda de combustible planta microbiana, PMFC, bioelectricity reviews pmfc, microbial plant fuel cell, generation of bioelectricity microbial plant fuel cell, green energy generation from cells.	-Se consideró de los últimos 5 años -Revistas indexadas	-Artículos que procedan de datos no confiables
Tesis	5		-Tesis de maestría o doctorado -Tesis de pregrado de instituciones confiables	-Tesis de pregrado de instituciones poco confiables

Capítulo de libros	10		-Base de datos confiables	-Escasa información -Capítulo de libros que procedan de datos no confiables
--------------------	----	--	---------------------------	--

Tabla 4. Criterios de búsqueda para la elaboración del presente estudio

Fuente: Elaboración propia.

3.7 Rigor científico

Nuestra investigación cumple con el rigor científico ya que consiste en establecer criterios, empleando para ello:

- la dependencia, Según Saumure y Given (2008) y Franklin y Ballau (2005), es el grado en el cual distintos investigadores recolectan información similar y realizan los mismos análisis para luego generar resultados semejantes (como se citó en Hernández et al., 2014, p.453), para ello se demostró la evidencia especificando el contexto de la recolección de datos y como se introdujo en el análisis.
- credibilidad, también llamado “máxima validez”, lo cual significa si el investigador ha comprendido a profundidad las experiencias de los participantes (Hernández et al., 2014, p.455), nos preocupamos por constatar las interpretaciones contrastándolas con las distintas fuentes que obtuvimos.
- transferencia (aplicabilidad de resultados), es la posibilidad de desplazar los resultados a otro contexto en estudios posteriores (Arias y Giraldo, 2011, p.503), cabe mencionar que la transferencia no lo hace el investigador, sino el lector que se preguntará si puede emplearlo a su contexto (Hernández et al., 2014, p.458), es por ello que se obtuvo información relevante para el contexto que llevamos a cabo.
- confirmación (confirmabilidad), es la neutralidad en el análisis e interpretación de la información que se obtiene cuando otros investigadores logran seguir la pista y llegar a hallazgos semejantes (Castillo y

Vásquez, 2003, párr.1), es por ello que en esta investigación la información obtenida se analizó neutralmente.

3.8 Método de análisis de información

El análisis de información es identificar conceptos principales de las diversas fuentes de información, lo cual permite interpretar el contenido sin ambigüedades, con el fin de recopilar y recuperar toda la información (Sarduy, 2007, p.3), de tal manera que se recopiló la información mediante la matriz de categorización **tabla 2**, así también se analizó las semejanzas y diferencias de las categorías de principios de operación y parámetros que afectan la eficiencia de la generación de bioelectricidad.

3.9 Aspectos éticos

El presente informe de investigación se ejecutó con fines académicos, brindando resultados fidedignos. Así mismo, la información es auténtica y verídica en todo su contenido, en el cual se tomó en cuenta a los autores que aportaron en nuestro informe de investigación los cuales fueron debidamente citados.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Principios de operación de las CCPM en el ánodo y en el cátodo.

En base a la revisión realizada por 7 estudios sobre la reacción química en CCPM del ánodo y cátodo se muestra en la siguiente Tabla N° 5.

Tabla N° 5 Reacción Química en CCPM

AUTORES	REACCION QUÍMICA (REACCIÓN REDOX)	
	Ánodo	Cátodo
Wester, 2016	$C_2H_3O_2^- + 4H_2O \rightarrow 2HCO_3^- + 9H^+ + 8e^-$	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
Borker, et al., 2017	$2C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_6H_{10}O_6 + 4H^+ + 4e^-$	$O_2 + 4H + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
Nguyen, y Nitorisavut, 2019	$C_{12}H_{22}O_{11} + 13H_2O \rightarrow 12CO_2 + 48H^+ + e^-$	$24H^+ + 24e^- + 6O_2 \rightarrow 12H_2O$
Rizzo, 2019	$CH_3COO^- + 4H_2O \rightarrow 2HCO_3^- + 9H^+ + 8e^-$	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
Zapien, et al., 2019	$2C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_6H_{10} + 4H^+ + 4e^-$	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
Howe, et al., 2020	$CH_3COO^- + 4H_2O \rightarrow 2HC_2O_3 + 9H^+ + 8e^-$	$2O_2 + 8H^+ + 8e^- \rightarrow 4H_2O$

Jyoti y Mohanty, 2020	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 6\text{CO}_2 + 24\text{H}^+ + 24\text{e}^-$	$6\text{O}_2 + 24\text{H}^+ + 24\text{e}^- \rightarrow 12\text{H}_2\text{O}$
--------------------------	--	--

Fuente: Elaboración propia, 2020

En los estudios obtenidos en la Tabla N° 5 se muestra la reacción química del ánodo y cátodo, mediante el cual sucede una reacción Redox que convierte la energía química en energía eléctrica.

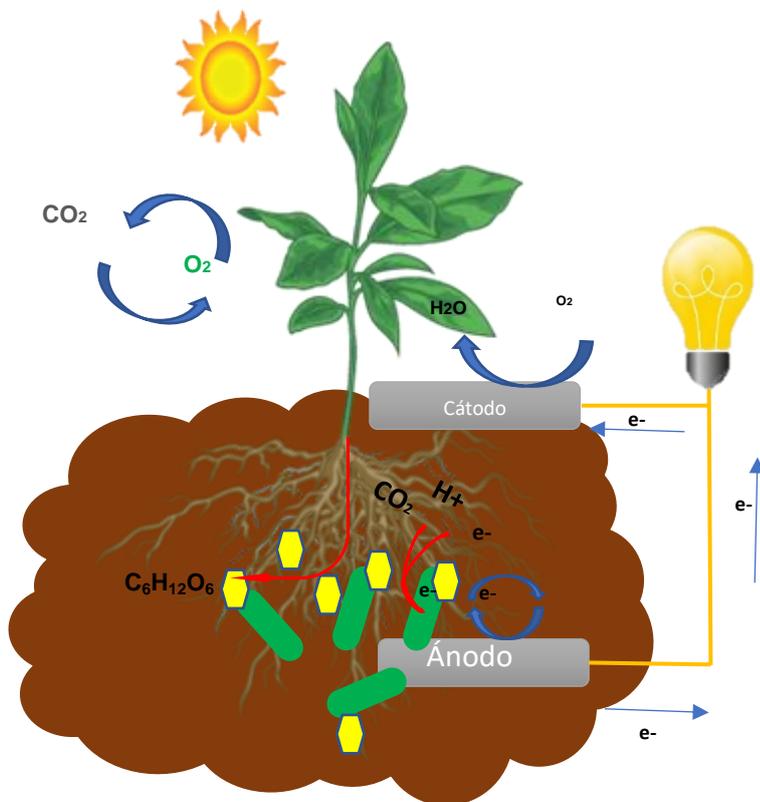
En la figura N°3 muestra la reacción química que sucede entre el ánodo y el cátodo, en donde se oxida la materia orgánica, produciendo la liberación de dióxido de carbono, protones y electrones. Según Borker et al. (2017, p.402) muestra la reacción $2\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow 2\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_6 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$, en esta fórmula los componentes de la glucosa y fructosa unidas a través de sus carbonos que se descarga por la raíz de la planta como lirio de la paz, Spathyphilum Anglica, espartina Glyceria maxima, Oryza sativa, Arundinella anómala, Musa acumulada entre otros tiene una reacción de gluconolactona (oxidación de glucosa). Esta reacción ocurre cuando los compuestos orgánicos que descarga la planta son oxidados por los microorganismos y bacterias, dado que mediante la oxidación se liberan electrones que se dirigen hacia al ánodo.

No obstante, realizando una comparación de la reacción química en el ánodo se diferencia en la liberación de electrones, cuando el suelo tiene la presencia de materia orgánica, microorganismos más la fotosíntesis de la planta se produce mayor liberación de electrones porque existe mayor oxidación de los componentes orgánicos (Jyoti y Mohanty, 2020, p. 141). Así mismos, utilizando el inóculo de acetato como catalizador de alimentos para los microbios, esto genera que se acelere la degradación de la materia orgánica, liberando carbonatos, electrones y protones como por ejemplo $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2^- + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HCO}_3^-$

$+9\text{H}^++8\text{e}^-$ (Wester, 2016, p. 20). Después de haberse generado el producto se dirige hacia el ánodo para luego dirigirse hacia el cátodo.

La reacción química en el cátodo, por ejemplo, en esta fórmula $\text{O}_2+4\text{H}^++4\text{e}^-\rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$, sucede que los electrones se dirigen hacia el ánodo mediante una corriente eléctrica para conducirlos hacia el cátodo, así también se reduce el oxígeno y con los protones forman agua, donde finalmente se genera la energía eléctrica (Wester, 2016, p. 20 y Borker, et al., 2017, p. 401).

Figura N°3: Reacción química en el ánodo y cátodo

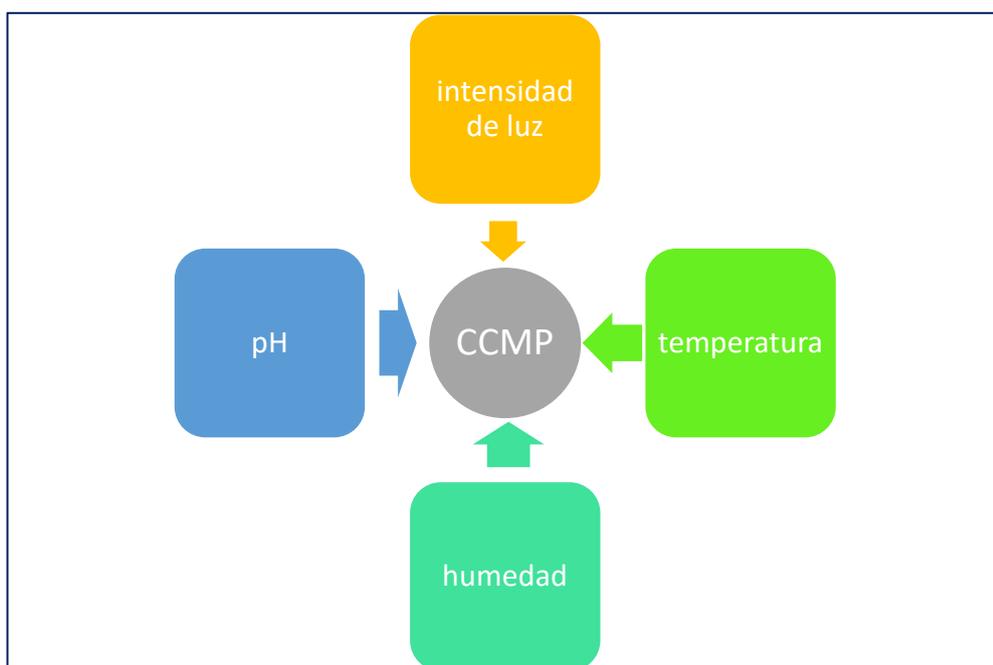


Fuente: Elaboración propia, 2020

4.2. Factores que afectan la eficiencia en la generación de bioelectricidad.

A continuación, los resultados con respecto a los factores ambientales que afectan la eficiencia de las celdas de combustible planta microbiana en la generación de bioelectricidad: Se muestran en la siguiente Figura 4:

Figura 4: Factores ambientales



Fuente: Elaboración propia, 2020.

Como se observa en la **figura 4** los factores ambientales son: temperatura, humedad, intensidad de luz y pH.

La temperatura tiene diversas funciones que desempeñan en las CCMP, ya que el rendimiento del sistema puede estar influenciadas por este factor, sin embargo, según Ramos (2019, p.61), estudio el factor de la temperatura ambiental en condiciones naturales de 15 a 35 C° y observó que este factor no afecto a la generación de electricidad.

La temperatura es el factor principal en el desarrollo del maíz; siendo la óptima para este cultivo entre 30 y 34 grados para tierras bajas y de media altitud, y 21 para maíces tropicales de tierras altas. En otros

estudios utilizaron ambientes con temperatura controlada comprobando que sí hay una influencia entre la temperatura y la generación eléctrica

La humedad es uno de los aspectos importantes que mantienen el flujo de electrones de manera eficiente. Según Regmi et al (2017, p.44) la alta humedad causa la prevalencia de varios microorganismos en las plantas. Un estudio de Moqsud et al. menciona una leve humedad lo cual generó un bajo voltaje en una etapa inicial de CCMP asistido con arroz. (2015, p.61).

La intensidad de la luz, es un factor importante para que se forme la fotosíntesis en las especies de plantas y se pueda lograr el funcionamiento óptimo del sistema (Ge et al.,2014, p.138). En la investigación de Ramos (2019, 47), se dio en verano en donde se presentó el fenómeno de el “Niño costero”, por ello la mayoría de días tuvo una gran intensidad de luz que se dio de manera natural, en el horario de 7 a 11 a.m. con una radiación solar de 150 Watt/m² se registraron los mayores voltajes, sin embargo, en las horas nocturnas, se registraron los menores valores de voltaje. Así mismo Moqsud et al., (2015, p.198), menciona que la intensidad de la luz tiene algunos efectos en la generación de energía, ya que en el día empezaron a darse altos valores de energía, pero una vez que ya no hay luz solar el voltaje empieza a disminuir y se mantiene constante. Algunos estudios como el Sophia y Sreeja (2017, p.168) han demostrado que el incremento en la intensidad de luz en el CCMP maximiza el voltaje alcanzado y mencionan que el sombreado de las plantas puede disminuir la producción eléctrica debido a la inhibición de la fotosíntesis.

El pH cumple un rol importante, según Regmi et al. (2018, p.35) menciona que si el pH es mayor a neutro puede generar mayor corriente y voltaje. Según Sarma y Mohanty (2018, p.135) tienen un pH en la cámara del anodo de 7 y en la cámara del cátodo de 7.4, lo cual generó un buen rendimiento en el sistema. Así también Ramos (2019, p.80), en su análisis tuvo un pH inicial en el suelo de 8.09, se

observó que el pH empezó a disminuir en todas las muestras, obteniendo un pH final de 7.9, la disminución del pH se debe a que el sustrato es consumido por microorganismos y estos liberan protones al ánodo. Cabe mencionar que cuando un pH es mayor a neutro mejora la disponibilidad de protones lo cual resulta un mayor voltaje. Según el artículo revisado por Gomora et al. (2020, p.99) respecto al factor del suelo, compararon el voltaje obtenido de CCMP con o sin compost, lo cual dio como resultado en el voltaje máximo sin compost fue de 460 mV a los 6 días del experimento, después de ese tiempo, el voltaje disminuyó a 300 mV que permaneció hasta el final del experimento, sin embargo para el resultado del voltaje máximo con compost aumentó en función del tiempo, mostrando un máximo de 690 mV después de 31 días, el CCMP sin compost mostró el voltaje máximo al comienzo, esto se debe a la presencia de materia orgánica en el suelo y su degradación por microorganismos en compuestos y electrones de bajo peso molecular y en caso del CCMP con compost su aumento de voltaje en función al tiempo puede deberse a la presencia de minerales en el compost, lo cual mejora la absorción de nutrientes por la planta y aumenta las reservas de alimentos en el rizoma. El positivo efecto del compost en la generación de energía también ha sido informado por Moqsud et al. (2015), menciona que utilizó compost de residuos orgánicos como sustrato en plantas de arroz y al quinto día se incrementó el voltaje a 0.62 voltios y luego disminuyó a 0.15 voltios, así también Sophia y Sreeja (2017), quienes investigaron el uso de compost en un CCMP con tres clases de plantas.

Según los artículos revisados por Sarma y Mohanty (2018) respecto a los componentes de CCMP sin plantas produce un voltaje mucho más bajo en comparación con otros CCMP con plantas (tabla x), esto se debe a que las plantas brindan insumos en forma de materia orgánica en el suelo que son utilizados por los microbios para generar bioelectricidad, así también Gomora et al. (2020) para los sistemas de

control mostraron la producción de voltaje más bajo, este voltaje puede deberse a la degradación biológica de la materia orgánica presente en el suelo.

Gomora et al. (2020), estudio la variación de la posición del ánodo en la cual midió la generación de voltaje, el voltaje obtenido del ánodo ubicado a 6.5 cm del fondo de la maceta resulto similar al obtenido con el ánodo colocado a 13 cm del fondo, es por ello que menciona que la posición del ánodo no afecta en el rendimiento del CCMP. Así mismo Sophia y Sreeja (2017), estudiaron el efecto de distancia entre el ánodo y cátodo en una cámara doble de CCMP, investigaron que el efecto de la posición de los electrodos no es significativo para la generación de voltaje.

V. CONCLUSIONES

Las conclusiones de la investigación fueron las siguientes:

CCPM es una tecnología prometedora que tiene el alcance para el desarrollo eficiente ambiental y aplicabilidad práctica en zonas con deficiencia energética, lo que se requiere son los principios de operación en CCPM para la generación de bioelectricidad relacionada con la planta y microorganismos, lo que implica a los elementos principales como la ruta fotosintética de la planta, material de electrodos, la configuración de una o dos cámaras, la colocación de electrodos, exudado en la raíz de la planta, los microorganismos en el suelo y los sustratos, estos son altamente calificados para evaluar el rendimiento en CCPM. Los microorganismos como catalizadores que ayudan a transferir electrones y eliminar los metales pesado existentes en el suelo o agua contaminada.

Cabe destacar que las plantas y suelos son impulsadores para dar forma a la comunidad microbiana finalmente alterar la producción de energía y la tendencia de la generación de voltaje es un efecto por la naturaleza de la exudación utilizada por los microbios, en la rizosfera de la raíz y la materia orgánica.

Los factores que afectan en el rendimiento de CCPM dependen de los parámetros ambientales lo que indica el papel de la fotosíntesis en la generación de bioelectricidad tales como la temperatura, humedad, intensidad de luz, pH y conductividad, estos son muy esenciales para mejorar el rendimiento de CCPM. Destacando que los factores ambientales dependen de la ubicación de sistemas de CCPM ya sea en condiciones de la estación otoño, verano y primavera. Así mismo por los tipos de CCPM construidas como CCPM Sedimento, techo o azotea, placa plana, tubular, cilíndrica o de tipo caja aplicadas en los tratamientos de las aguas residuales, suelos contaminados con metales pesados, sedimentos y otros.

VI. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones para futuras investigaciones son las siguientes:

En el desarrollo de CCPM para la generación de energía es importante que se considere las condiciones ambientales de la planta ya que es el principal factor para la liberación de los compuestos orgánicos mediante la fotosíntesis, así mismo los microorganismos propios del suelo o inoculados como catalizador, se encargan de degradar los compuestos orgánicos que dona electrones para la generación eléctrica. Por el cual, también se debe seleccionar el material de electrodo ya que es el factor principal de aceptor de electrones y receptor de electrones y protones.

Para el desempeño de CCPM con alta calidad, es estudiar las condiciones ambientales de la planta, la exploración en el exudado de la raíz y los componentes orgánicos en la optimización de las condiciones de funcionamiento del sistema, asimismo su mantenimiento y sostenibilidad en condiciones económicas y ambientales que desarrolle el avance de recolección y almacenamiento de energía.

REFERENCIAS

1. AGUILAR, Mariana, BUITRON, German, SHIMADA, Armando, MORA, Ofelia. Estado actual de los sistemas bioelectroquímicos: factibilidad de su uso para aumentar la producción ruminal de propionato. *Agrociencia* [en línea]. Marzo 2016, vol. 50 n° 2. [Fecha de consulta: 27 de abril de 2020].
Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v50n2/1405-3195-agro-50-02-00149.pdf>
2. ALANI, Kabiru; JOSEPH, Durodoluwa y MOSES, Kayode. The effects of moisture content at tillage on soil strength in maize production. *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences* [en línea] Abril 2017, Vol. 4, pp. 139 – 142.
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ejbas.2017.04.001>
3. ANDREWS, Mitchell; et al. Elevated CO₂ effects on nitrogen assimilation and growth of C₃ vascular plants are similar regardless of N-form assimilated. *Journal of Experimental Botany* [en línea]. Enero 2019 Vol. 70, N° 2, pp. 683–690.
Disponible en: <https://doi.org/10.1093/jxb/ery371>
4. ANTOLOGÍA, Magaly. Diseño de teoría fundamentada [en línea], 2017 [fecha de consulta: 30 de mayo de 2020]. Capítulo 15. Diseños del proceso de investigación cualitativa.
Disponible en: <https://issuu.com/cea-uiem/docs/4>
5. ARIAS, María, GIRALDO, Clara. El rigor científico en la investigación cualitativa. *Invest Educ Enferm*. 2011, vol. 29, n°3:500-514
Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3845203>
6. AZRI, Yamina, et al. Bioelectricity generation from three ornamental plants: *Chlorophytum comosum*, *Chasmanthe floribunda* and *Papyrus diffusus*. *International Journal of Green Energy*, 2018, vol. 15, no 4, p. 254-263.
Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15435075.2018.1432487>
7. BAICHA, Z., SALAR-GARCÍA, M., ORTIZ-MARTÍNEZ, V., HERNÁNDEZ-FERNÁNDEZ, F., DE LOS RÍOS, A., LABJAR, N., LOFTI, E., ELMAHI, M. A critical review on microalgae as an alternative source for bioenergy pro-

duction: A promising low cost substrate for microbial fuel cells. *Fuel Processing Technology*, [en línea]. Diciembre 2016, vol. 154, n° 1. [Fecha de consulta: 27 de abril de 2020].

Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382016303587>

ISSN: 0378-3820

8. BAJRACHARYA, Suman; et. al. An overview on emerging bioelectrochemical systems (BESs): Technology for sustainable electricity, waste remediation, resource recovery, chemical production and beyond. *Renewable Energy* [en línea]. Diciembre 2016, vol 98, pp. 153 – 170.

Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.002>

9. BEEVI, Sabeela; et al. Microalgae microbial fuel cell. National institute for Interdisciplinary Science and Tecnology. Indica, 2019, vol. 46, pp 1 – 20.

ISBN: 9781644900109

Disponible en: https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=ly2bDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=effect+of+temperature+in+fuel+cell+microbial+plant&ots=MttL5brwR&sig=ZQLEavc2ImcxcDrKx_64G_ptRG8#v=onepage&q=effect%20of%20temperature%20in%20fuel%20cell%20microbial%20plant&f=false

10. CABEZAS, Angela, et al. Geobacter, Anaeromyxobacter and Anaerolineae populations are enriched on anodes of root exudate-driven microbial fuel cells in rice field soil. *Environmental Microbiology Reports*, 2015, vol. 7, no 3, p. 489-497.

Disponible en: <https://doi.org/10.1111/1758-2229.12277>

11. BOMBELLI, Paolo, et al. Electrical output of bryophyte microbial fuel cell systems is sufficient to power a radio or an environmental sensor. *Royal Society open science*, 2016, vol. 3, no 10, p. 160249.

Disponible en: <https://doi.org/10.1098/rsos.160249>

12. BORKER, Mohnish, SUCHITHRA, T., SRINIVAS, M. Sustainable Bioelectricity Generation from Living Plants. *Microbial Biotechnology* [en línea]. 2017. [Fecha de consulta: 27 de abril de 2020].

Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-981-10-6847-8_17

13. BRAUTIGAM, Andrea; et al. On the Evolutionary Origin of CAM Photosynthesis. *Plant Physiology* [en línea] junio 2017, Vol. 174, pp. 474 – 477.
Disponible en: www.plantphysiol.org/cgi/doi/10.1104/pp.17.00195
14. BRUNELLY, Davide; TOSATO, Pietro y ROSSI, Maurizio. Microbial fuel cell as a biosensor and a power source for flora health monitoring [en línea]. Noviembre 2016.
Disponible en: 10.1109/ICSENS.2016.7808831
15. BUSTOS ALVAREZ, Luis Alejandro. Producción de bioelectricidad por medio de una celda de combustible microbiana fotosintética (PMFC). 2019.
Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12495/2568>
16. CASTILLO E, VÁSQUEZ ML. El rigor metodológico en la investigación cualitativa. Colombia: Medellín. 2003, vol. 3, n°3 164-167
Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/283/28334309.pdf>
17. CASTRESANA, Pablo, MARTINEZ, Sara, FREEMAN, Emma, ESLAVA, Salvador, DI LORENZO, Mirella. Electricity generation from moss with light-driven microbial fuel cells. *Electrochimica Acta* [en línea]. Marzo 2019, vol. 298, n° 1. [Fecha de consulta: 27 de abril de 2020].
Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468618328184>
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.12.108>
18. CASTRILLO, Erick Daniel Rincón; PABÓN, Juan José García; SANTAECLA, José Ricardo Bermúdez. Estado del arte de las celdas de combustible. *revista colombiana de tecnologías de avanzada*, 2019, vol. 1, no 33.
Disponible en: http://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/RCTA/article/view/3320
19. CASTRO TORRES, Eduardo Roberto. Comparación de la electroactividad de biopelículas formadas por *Pseudomonas aeruginosa* y *Bacillus subtilis* para posible uso en celdas de combustible microbiana. 2019. Tesis Doctoral. Universidad de El Salvador.
ISSN: 0013-4686

20. CHENG, Teng, CHING, Kok, UTTRAPHAN, Chessda, HEONG, Yee. Electrical energy production from plant biomass: an analysis model development for pandanus amaryllifolius plant microbial fuel cell. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science [en línea]. Junio 2020, vol. 18, n° 3. [Fecha de consulta: 27 de abril de 2020].
Disponible en: <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v18.i3.pp1163-1171>
21. CHENG, Ce; et al. Simultaneous Cr(VI) reduction and electricity generation in Plant-Sediment Microbial Fuel Cells (P-SMFCs): Synthesis of non-bonding Co₃O₄ nanowires onto cathodes. Environmental Pollution [en línea] abril 2019. Vol. 247, pp. 647-657.
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.084>
ISSN: 2502-4752
22. CHIRANJEEVI, P; et. al. Plant-Microbial Fuel Cell Technology. Microbial Electrochemical Technology, 2019, pp. 549 – 564
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64052-9.00022-4>
23. CHUNG, Guan; et al. Wetland plant microbial fuel cells for remediation of hexavalent chromium contaminated soils and electricity production. Journal of Hazardous Materials [en línea] Marzo 2019, Vol. 365, pp. 137 – 145.
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.10.086>
24. COLLAZOS, Alexander Mora; MONTAÑO, Enrique Bravo. Diversidad bacteriana asociada a biopelículas anódicas en celdas de combustible microbianas alimentadas con aguas residuales. *Acta biológica colombiana*, 2017, vol. 22, no 1, p. 77-84.
Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3190/319050490008.pdf>
25. CONDORI PACHECO, Aracel Erica; TORRES ZAMATA, Gustavo. Biodegradación de la materia orgánica y producción de Bioelectricidad en Celdas de Combustible Microbiano (CCM) a partir del agua residual doméstica–Lima. 2019.
Disponible en: <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/UPEU/1655>
26. DE LA TORRE VALDÉS, Raciél; GARCÍA PARRA, Lázaro Roger; GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, Daniel. Análisis y optimización de una celda de combustible de membrana de intercambio protónico. Ingeniería Energética, 2015, vol. 36, no 1, p. 113-124.
Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/5662>

27. DULZAIDES, María, MOLINA, Ana. Análisis documental y de información: dos componentes de un mismo proceso. *Acimed*, 2004, vol. 12, no 2, p. 1-1.
Disponible en: <http://eprints.rclis.org/5013/1/analisis.pdf>
28. FERNANDEZ, Hernandez; et al. Recent progress and perspectives in microbial fuel cells for bioenergy generation and wastewater treatment. *Fuel Processing Technology* [en línea] October 2015, Vol. 138, pp. 284-297.
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.05.022>
29. GE, Zheng, et al. Recovery of electrical energy in microbial fuel cells: brief review. *Environmental Science & Technology Letters*, 2015, vol. 1, no 2, p. 137-141.
Disponible en: <https://doi.org/10.1021/ez4000324>
30. GÓMORA, J., SERMENT, J., CARREÑO, M., FLORES, N. VOLTAGE Production in a plant microbial fuel cell using *agapanthus africanus*. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 2020, vol. 19, no 1, p. 227-237.
Disponible en: <https://doi.org/10.24275/rmiq/IA542>
31. GONZALES, et al. Estado actual de los sistemas bioelectroquímicos: factibilidad de su uso para aumentar la producción ruminal de propionato. *Agrociencia* [en línea] Marzo 2016, Vol. 50 N° 2, pp. 149 – 166.
Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v50n2/1405-3195-agro-50-02-00149.pdf>
32. GREENMAN, Jhon, GAJDA y Iwona LEROPOULOS, Loannis. Microbial fuel cells (MFC) and microalgae; photo microbial fuel cell (PMFC) as complete recycling machines. *Sustainable Energy & Fuels* [en línea]. Enero 2019, vol. 3, no 10. [Fecha de consulta: 27 de abril de 2020].
Disponible en: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/se/c9se00354a/unauth#!divAbstract>
DOI: 10.1039/C9SE00354A
33. Gutiérrez, Cirila. *Peru: LÍNEA DE BASE DE LOS PRINCIPALES INDICADORES DISPONIBLES DE LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS) 2016* [en línea]. Perú: [s.n], 2017 [fecha de consulta: 24 de abril de 2020].

- Disponible en: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1429/libro.pdf
34. FERNANDEZ, Hernandez; et al. Recent progress and perspectives in microbial fuel cells for bioenergy generation and wastewater treatment. *Fuel Processing Technology* [en línea]. Octubre 2015, vol. 138, pp. 284-297. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.05.022>
35. HERNÁNDEZ, Roberto, FERNÁNDEZ, Carlos, BAPTISTA, Pilar. *Metodología de la investigación* [en línea]. 6° ed. México, DF: Mcgraw-hill, 2014 [fecha de consulta: 02 de junio de 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/34151370/Metodologia-de-la-Investigacion-sampieri-6ta-EDICION-Libro-auto=download&email_work_card=download-paper
ISBN: 978-1-4562-2396-0
36. Instituto Nacional de Estadísticas e Informática (INEI). [s.n.]. 11 de julio de 2019. Disponible en: <http://m.inei.gob.pe/prensa/noticias/peru-tiene-una-poblacion-de-32-millones-131-mil-400-habitantes-al-30-de-junio-del-presente-ano-11659/>
37. IMBROGNO, Francesca; et al. Experimental Characterization of the Electrical Energy Produced by Microbial Fuel Cells Supplied by Pot Plants. *Biomedical Engineering*, 2019, pp. 269 – 273. Disponible en: <10.1109/MetroAgriFor.2019.8909234>
38. KADIER, Abudukeremu; et. al. Una revisión exhaustiva de los diseños y configuraciones de reactores de células de electrólisis microbiana (MEC) para la producción sostenible de gas hidrógeno. *Alexandria Engineering Journal*, [en línea] marzo 2016, Vol: 55, N° 1, pp. 427 – 443. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.10.008>
39. KABUTEY, Felix, ZHAO, Qingliang, WEI, Liangliang, DING, Jing, ANTWI, Philip, QUASHIE, Frank, WANG, Weiye. An overview of plant microbial fuel cells (PMFCs) Configurations and Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea]. Agosto 2019, vol. 110 [Fecha de consulta: 27 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119303223>
ISSN: 1364-0321

40. KAZEMI, Sona; et al. Systematic Study of Separators in Air-Breathing Flat-Plate Microbial Fuel Cells—Part 2: Numerical Modeling. *Energies* [en línea]. Enero 2016, vol. 9 n° 2, pp 79
Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en9020079>
41. KAUR, Rajnish; et al. Recent developments on functional nanomaterial-based electrodes for microbial fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea] Marzo 2020, Vol. 119, pp. 109551.
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109551>
42. KAUR, Gagandeep. A Review of Microbial Fuel Cells for Bioelectricity Generation. *Science and Technology* [en línea]. Octubre 2017, vol. 3 n° 7, pp. 635-638
ISSN: 23956011
43. KLAISONGKRAM, Nuttawut; HOLASUT, Kanyarat. Electricity Generation of Plant Microbial Fuel Cell (PMFC) using *Cyperus Involucratus* R. *Engineering and Applied Science Research*, 2015, vol. 42, no 1, p. 117-124.
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105415>
44. KUO, Kuan-Wen, et al. Diseño y validación experimental de una celda de combustible de alta densidad de potencia eléctrica. 2016.
Disponible en: <http://risisbi.uqroo.mx/handle/20.500.12249/1279>
45. LINARDI, M., et al. Thermal treatment effects over carbon support properties used in PEMFC fuel cells.
Disponibile en: <http://repositorio.ipen.br/bitstream/handle/123456789/26458/22363.pdf?sequence=1>
46. LU, Lu, XING, Defeng, REN, Zhiyong. Microbial community structure accompanied with electricity production in a constructed wetland plant microbial fuel cell. *Bioresource technology*, 2015, vol. 195, p. 115-121.
Disponibile en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852415007804>
47. LUI, Boyyue; JI, Min; ZHAI, Hongyan. Anodic potentials, electricity generation and bacterial community as affected by plant roots in sediment microbial fuel cell: Effects of anode locations. *Chemosphere* [en línea] octubre 2018, Vol. 209, pp. 739 – 747.
Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.122>

48. MA, Jinxing, et al. Cost-effective Chlorella biomass production from dilute wastewater using a novel photosynthetic microbial fuel cell (PMFC). *Water Research*, 2017, vol. 108, p. 356-364.
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.016>
49. MISHRA, Bharat; AWASTHI, Sanjay Kumar; RAJAK, Raj Kumar. A Review on electrical behavior of different substrates, electrodes and membranes in microbial fuel cell. *International Journal of Energy and Power Engineering* [en línea]. Agosto 2017, vol. 11, n° 9. [Fecha de consulta: 24 de abril de 2019].
Disponible en: doi.org/10.5281/zenodo.1132290
50. MISHRA, P., MISHRA, S., DATTA S., TARAPHDER, S., PANDA, S., SAIKHOM, R., LAISHRAM, M., SWAIN, D., NANOTKAR, R. Microbial Fuel Cell (MFC): Recent Advancement and Its Application. *Int. J. Pure App. Biosci.* [en línea]. Octubre 2017, vol. 5, n° 5. [Fecha de consulta: 24 de abril de 2019].
Disponible en: <http://dx.doi.org/10.18782/2320-7051.2770>
ISSN: 2320 – 7051.
51. MOQSUD, M., YOSHITAKE, J., BUSHRA, Q., HYODO, M., OMINE, K., STRIK, David. Compost in plant microbial fuel cell for bioelectricity generation. *Waste management* [en línea]. Febrero 2015, vol. 36, n° 1. [Fecha de consulta: 24 de abril de 2019].
Disponibile en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X14005200>
ISSN: 0956-053X
52. MORTILLARO, J.M; et al. The fate of C₄ and C₃ macrophyte carbon in central Amazon floodplain waters: Insights from a batch experiment. *Limnologia* [en línea] Julio 2016, Vol. 59, pp. 90-98.
Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.limno.2016.03.008>
53. MUNTANÉ, J. Introducción a la investigación básica [en línea]. Mayo-Junio 2010, vol. 33 n.º 3. [Fecha de consulta: 30 de mayo de 2020].
Disponibile en: <https://www.sapd.es/revista/2010/33/3/03/resumen>
54. NAVA, Pedro y CASTILLO, Marcela, Celdas de combustible microbianas como alternativa para atender los retos de la sostenibilidad: Agua, energía y contaminación, [en línea] Marzo 2018, Vol. 2, N° 5, pp 18 – 34.

Disponible en: 0000-0002-4980-227X

http://www.ecorfan.org/republicofperu/research_journals/Revista_de_Ingenieria_Innovativa/vol2num5/Revista_de_Ingenieria_Innovativa_V2_N5_3.pdf

55. NARAYAN, SOLANKI Y SRIVASTAVA. A review of constructed wetland coupled with microbial fuel cell: A recently emerged technology. The Pharma Innovation [en línea] Marzo 2019, Vol. 8, N°4, pp. 422 – 428.

Disponible en: <http://www.thepharmajournal.com/archives/2019/vol8issue4/PartG/8-2-110-896.pdf>

56. NGUYEN, Vinh Y NITISORAVUT, Rachnarin. Bioelectricity Generation in Plant Microbial Fuel Cell Using Forage Grass under Variations of Circadian Rhythm, Ambient Temperature, and Soil Water Contents. The Asia Power and Energy Engineering Conference, 2019, pp. 240 – 244

Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8720344>

57. NITISORAVUT, Rachnarin, REGMI, Roshan. Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering. Renewable and Sustainable Energy Reviews [en línea]. Setiembre 2017, Vol: 76, pp. 81 – 89.

Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117303805>

ISSN: 1364-0321

58. PAMINTUAN, K., CLOMERA, J., GARCIA, K., RAVARA, G., SALAMAT, E. Stacking fuel cells of aquatic and microbial plants that they grow water spinach (*Ipomoea aquatica*) and water lettuce (*Pistia stratiotes*). Earth and Environmental Science [en línea]. Octubre 2018. [Fecha de consulta: 24 de abril de 2019].

Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/191/1/012054/pdf>

<http://doi:10.1088/1755-1315/191/1/012054>

59. PAÑA, Silvia. Identificación y aprovechamiento de la cepa *Pseudomona* spp en una celda de combustible microbiano para la producción de bioelectricidad a desarrollarse en el centro de energías alternativas (ESPOCH).2017, pp. 93

Disponible en <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/7870/1/236T0296.pdf>

60. PANDIT, Soumya; SALVA, Nishit y JUNG, Sokhee. 16 - Avances recientes en la ampliación de las celdas de combustible microbianas. Pilas de combustible microbianas integradas para el tratamiento de aguas residuales. 2020, pp. 349-368.
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817493-7.00016-3>
61. PINEDA, Ana y ROSAS, Martha. Estado del arte en celdas de combustible microbianas (CCM) para producción de bioenergía. Tesis [Título: Ingeniería Ambiental], 2016, pp. 223.
Disponible en: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/3837/2/PinedaMar%C3%ADnAnadelPilarRosasTafurMarthaLizeth2016.pdf>
62. RAMOS, Aracelli. Evaluación de la celda de combustible plantamicrobiana (PMFC) y las condiciones de su entorno en la generación de energía eléctrica. Tesis [Título: Ingeniería Ambiental], 2019 pp. 128.
63. RAHIMNEJAD, Mostafa; et al. Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review. Alexandria Engineering Journal [en línea] Setiembre 2015, vol. 54, n° 3, pp. 745-75.
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.03.031>
64. REGMI, Roshan; NITISORAVUT, Rachnarin; KETCHAIMONGKOL, Jaranaboon. A decade of plant-assisted microbial fuel cells: looking back and moving forward. Strategies for Bioenergy Production from Agriculture and Agrifood Processing Residues [en línea] Febrero 2018, Vol. 9 N°5, pp. 605 – 612.
Disponible en: <https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1432272>
65. REVELO, Dolly M., et al. Uso de Microorganismos Nativos en la Remoción Simultánea de Materia Orgánica y Cr (VI) en una Celda de Combustible Microbiana de Biocátodo (CCM). *Información tecnológica*, 2015, vol. 26, no 6, p. 77-88.
Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642015000600010>
66. Ríos, Alberto. Futuro de la energía en Perú: Estrategias energéticas sostenibles. Copyright, 2016, Lima, 162 pp.
Disponible en: https://www.internationalrivers.org/sites/default/files/attached-files/estudio_-_futuro_de_la_energia_en_peru_-_alberto_rios._fsp_-_ir_0.pdf

67. RIOS, Shawny. Generación de bioelectricidad microbiana con estiércol de ganado vacuno, mediante celdas de combustible microbiano, estación experimental Tunshi Epoch. Tesis [título: Ingeniera en Biotecnología Ambiental], 2016, pp. 137.
 Disponible en: <http://dspace.es-poch.edu.ec/bitstream/123456789/5662/1/236T0214.pdf>
68. RIZZO, Alessandro. Automatic Test Equipment for Plant Microbial Fuel Cells for Energy Harvesting. Department of Electronics and Telecommunications Master's Degree in Electronic Engineering. Tesis, [Grado: Master's degree thesis], 2019 pp. 161.
69. RUSYN, Iryna y HAMKALO, Khrystyna. Electro-biosystems with Mosses on Green Roofs. Journal of Environmental Research, Engineering and Management [en línea] Febrero 2020, Vol. 76, N° 1, pp. 20 – 31.
 Disponible en: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.erem.76.1.22212>
70. SANTORO, Carlo et al. Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. Journal of Power Sources [en línea]. Julio 2017, vol. 356, n°15, pp. 225-244
 Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.109>
71. SARDUY, Yanetsys. El análisis de información y las investigaciones cuantitativa y cualitativa. Revista cubana de salud pública, 2007, vol. 33.
 Disponible en: <https://www.scielo.org/articulo/rcsp/2007.v33n3/10.1590/S0864-34662007000300020/es/>
72. SARMA, Pranab, MOHANTY, Kaustubha. Epipremnum aureum and Dracaena braunii as indoor plants for enhanced bio-electricity generation in a plant microbial fuel cell with electrochemically modified carbon fiber brush anode. Journal of bioscience and bioengineering [en línea]. Septiembre 2018, vol. 126, no 3. [Fecha de consulta: 24 de abril de 2019].
 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389172317309854>
 ISSN: 1389-1723
73. SHAHGALDI, Samaneh; HAMELIN, Jean. Improved carbon nanostructures as a novel catalyst support in the cathode side of PEMFC: a critical review. Carbon, 2015, vol. 94, p. 705-728.
 Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.07.055>

74. SEGIOKA, Mari; YOSHIDA, Naoka y LIDA, Kazuki. On Site Evaluation of a Tubular Microbial Fuel Cell Using an Anion Exchange Membrane for Sewage Water Treatment. *Frontiers in Energy Research* [en línea] Setiembre 2019, Vol. 7, N° 91, 9 pp.
 Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00091>
75. SHAFIQUE, Muhammad; KIM, Reeho y RAFIQ, Muhammad. Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea] Julio 2018, Vol. 90, pp. 757 – 773.
 Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.006>
76. SHEN, Xiaotong; et al. Enhance performance of microbial fuel cell coupled surface flow constructed wetland by using submerged plants and enclosed anodes. *Chemical Engineering Journal* [en línea] Noviembre 2018, Volume 351, pp. 312-318.
 Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.117>
77. STALE, Anthony; et.al. Microbial fuel cells: An overview of current technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea] setiembre 2019, Vol: 101, pp. 60 – 81.
78. SOPHIA, Carmalin, SREEJA, S. Green energy generation from plant microbial fuel cells (PMFC) using compost and a novel clay separator. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2017, vol. 21, p. 59-66.
 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213138817302564>
79. SOUZA, zilmar. Sugarcane Bioelectricity: A Study Brazil's case and perspectives. *Sugarcane Biorefinery. Technology and Perspectives*, 2019, pp. 256 – 279.
 Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814236-3.00013-5>
80. TAPIA, Natalia; et al. Evaluation of *Sedum* as driver for plant microbial fuel cells in a semi-arid green roof ecosystem. *Ecological Engineering* [en línea]. Noviembre 2017, vol. 108, pp. 203 – 210.
 Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.017>
81. TAPIA, Natalia; et al. A New Method for Sensing Soil Water Content in Green Roofs Using Plant Microbial Fuel Cells. *National library of medicine* [en línea] Diciembre 2017, Vol. 18, N° 1, pp. 71 – 80.
 Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29283378/>

82. TETTEH, Felix et. al. An overview of plant microbial fuel cells (PMFCs) Configurations and Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, vol 110, pp. 402 – 414
Disponible en: www.elsevier.com/locate/rser
83. TIMMERS, Ruud A., et al. Rhizosphere anode model explains high oxygen levels during operation of a *Glyceria maxima* PMFC. *Bioresource Technology*, 2015, vol. 108, p. 60-67.
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.088>
84. TIQUIA y DEEPAK. Microbial electrochemical technologies. USA, University of michigan, 2019, 445 pp.
ISBN: 139781138597112
85. TREESUBSUNTORN, Chairat, THIRAVETYAN, Paitip. Suitable Application of *Echinodorus Cordifolius*-Microbial Fuel Cells Inoculated with *Bacillus Thuringiensis*. *Waste and Biomass Valorization* [en línea]. Marzo 2020. [Fecha de consulta: 24 de abril de 2019].
Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01024-2>
86. UEOKA, Nagayoshi, et al. Sizes of anode and cathode affect electricity generation in rice paddy-field microbial fuel cells. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 2016, vol. 6, no 01, p. 10.
DOI: [10.4236/jsbs.2016.61002](https://doi.org/10.4236/jsbs.2016.61002)
87. UGGETTI, Enrica y PUIGAGUT, Jaume. Photosynthetic membrane-less microbial fuel cells to enhance microalgal biomass concentration. *Bioresource Technology* [en línea] Octubre 2016, Vol. 218, pp. 1016-1020.
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.062>
88. VENTURE, Vittorio y KEEL, Christoph. Signaling in the Rhizosphere. [En línea] Marzo 2016, vol. 21, N° 3, pp. 187-198
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.01.005>
89. WANG, Yingmu, et al. Cost-effective domestic wastewater treatment and bioenergy recovery in an immobilized microalgal-based photoautotrophic microbial fuel cell (PMFC). *Chemical Engineering Journal*, 2019, vol. 372, p. 956-965.
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.05.004>

90. WETSER, Koen, et al. Electricity from wetlands: Tubular plant microbial fuels with silicone gas-diffusion biocathodes. Applied Energy [en línea]. Enero 2017, vol. 185, n° 1, pp. 642-649
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.122>
91. WETSER, Koen, et al. Electricity generation by a plant microbial fuel cell with an integrated oxygen reducing biocathode. Applied energy, 2015, vol. 137, p. 151-157.
Disponibile en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261914010460>
92. WETSER, Koen. Electricity from wetlands. Technology assessment of the tubular Plant Microbial Fuel Cell with an integrated biocathode. Tesis. Wageningen University, Wageningen [en línea] Abril 2016, 156 pp. ISBN 978-94-6257-696-4
Disponibile en: <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/379597>
93. WETSER, Koen; et al. Electricity from wetlands: Tubular plant microbial fuels with silicone gas-diffusion biocathodes. Applied Energy [en línea] Enero 2017, Vol. 185, Part. 1, pp 642 – 649.
Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.122>
94. J.WINFIELD, J.GREENMANI y IEROPOULOS. Response of ceramic microbial fuel cells to direct anodic airflow and novel hydrogel cathodes. International Journal of Hydrogen Energy [en línea] Junio 2019, Vol. 44, N° 29, 7 pp. 15344-15354
Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.024>
95. WANG, Junfeng; et al. Microbial community structure of different electrode materials in constructed wetland incorporating microbial fuel cell. Biore-source Technology [en línea] diciembre 2016, vol. 221, pp. 697-702.
Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.116>
96. WU, Qing, JIAO, Shipu, MA, Mengxing, PENG, Sen. Microbial fuel cell system: a promising technology for pollutant removal and environmental remediation. Environmental Science and Pollution Research [en línea]. Enero 2020, vol. 27. [Fecha de consulta: 27 de abril de 2020].
Disponibile en: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07745-0>
ISSN: 6749–6764

97. YANG, Zhigang, et al. Coupling a photosynthetic microbial fuel cell (PMFC) with photobioreactors (PBRs) for pollutant removal and bioenergy recovery from anaerobically digested effluent. *Chemical Engineering Journal*, 2019, vol. 359, p. 402-408.
Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.136>
98. YE, Yonyao, et al. Feasibility study on a double chamber microbial fuel cell for nutrient recovery from municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal* [en linea]. Febrero 2019, vol. 358, pp. 236-242.
Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.215>
99. ZABIHALLAHPOOR, Atieh, RAHIMNEJAD, Mostafa, FARID, Talebnia. Sediment microbial fuel cells as a new source of renewable and sustainable energy: present status and future prospects [en linea]. Setiembre 2015, vol. 5 pp. 41.
Disponibile en: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2015/ra/c5ra15279h>
100. ZHANG, Man; et al. Increased power generation from cylindrical microbial fuel cell inoculated with *P. aeruginosa*. *Biosensors and Bioelectronics* [en linea] Setiembre 2019, Vol. 141, pp. 111394
Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.111394>

ANEXOS

Anexo N° 1 (Tabla 3): Modelo de ficha de recolección de datos

Título:			
Autor (es):	Lugar de publicación:	Año de publicación:	
Tipo de documento:		Indexado:	
Objetivo:			
Componentes, diseño de celda:			
Metodología:			
Resultados:			

Fuente: Elaboración propia.

Anexo N° 3 (Tabla 6): Factores que influyen en la generación de electricidad

N°	Plantas	Caracteriztica	Sustrato	Tratamiento	tiempo	rendimiento		Ph			temperatura (°C)	Intensidad de luz	Humedad (%)		Distancia de electrodos (cm)	Fuente de información	
						voltaje (mV)	densidad de potencia (mW/m ²)	suelo		Compost			Suelo	Compost			
								camara de anodo	camara de catodo								
1	Epipremnum aureum +biomasa	plantas de interior	Estiércol de vaca + suelo de jardín (2:3)	Se inoculo con cultivo microbiano en el dia 25 y 45	60 días	620	15.38	7	7.4	-	25°	no requieren luz solar directa, la luz ambiental fue proporcionada por iluminacion artificial utilizando 4 LED de 1200 LUX	-	-	-	Sarma y Mohanty,2018	
	Dracaena braunii					432	12.42										
	control (sin planta)	-				58	-										
2	Brassica Juncea	planta mesofito	Suelo + Compost de desechos de jardín (1:1)	No hay crecimiento artificial	30 días	523	69.32	7.1		7.68	-	Luz natural (700 nanometros)	5.2	24.6	-	Sophia y Sreeja, 2017	
	Trigonella foenumgraecum	planta leguminosa				485	80.26										
	Canna Stuttgart	planta tuberosa				505	222.54										
	control (sin compost)	-				Suelo	105										-
3	Agapanthus africanus	produce una gran cantidad de rizomas	Suelo + Compost	No hay crecimiento artificial	31 dias	690	15.55	5.71		5.15	21°	Luz natural	6.74	22.56	16.5	Gomora et al., 2020	
	control (sin compost y sin planta)		Suelo			460	6.92										
4	Plantas de arroz	-	Suelo + Compost de residuos orgánicos	No hay crecimiento artificial	56 días	700	39.2	7.51		6.92	-	Luz natural	35	40	5	Moqsud et al., 2015	
	control (sin compost y sin planta)	-	Suelo			90	0.618										
5	Hydrocotyle verticillata	plantas de agua dulce	suelo orgánico	No hay crecimiento artificial	30 días	200	20	6.17		-	45°	Luz natural	-	-	5	Moqsud et al., 2017	
	Phragmites australis	plantas de agua de mar+	suelo marino			520	40										7.13
	control (sin planta)	-	suelo organico y marino			55	-										7.1
6	Ipomoea aquatica	planta de maiz	suelo arenoso	No hay crecimiento artificial	46 dias	-	29.77	8.09	-	26°	Luz natural	8.8	-	-	Ramos, 2019		

Fuente: Elaboración propia.