



**Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“Diseño de un prototipo de celda de combustible
microbiano de bajo costo basado en *Eichhornia
crassipes*”**

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el Título de:

Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Presenta:

Johan de Jesús Andrade Rodríguez

Fecha: 07/21

Director de Tesis:

M.I.A. Miriam Vega Hernández

Puebla, Pue. 2021

Agradecimientos

Agradezco enormemente a....

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por brindarme las oportunidades, materiales, disposición y tiempo para formarme como persona y profesionista dentro de sus instalaciones.

A la facultad de ingeniería química por otorgarme sus instalaciones y por darme todas las facilidades para que pudiera desarrollarme profesionalmente lo largo de mi carrera y durante la elaboración de esta tesis

Mis padres, la razón por la que el autor de esta investigación siempre ha seguido sus sueños sin que le faltara nada, las palabras no podrán expresar lo agradecido que estoy con los pilares de mi vida, con quienes siempre me han apoyado en cada paso que doy y quienes están pendientes siempre.

Mi madre, María Luisa, quien siempre ha luchado porque su hijo el más pequeño tuviera el mundo a la mano, quien está dispuesta a arriesgarlo todo por el bienestar de sus hijos y quien nunca tomó una decisión sin pensar primero en ellos, eres la definición perfecta de la palabra madre, eres el mejor regalo que me pudo dar esta vida.

Mi padre, quien siempre me guio para salir adelante, para que no me pusiera límites y que trabajara arduamente para seguir mis sueños, nadie nunca me dará los consejos que aprendí de mi padre, uno de los propósitos de culminar este trabajo era hacerte sentir orgulloso, espero así sea.

Mis hermanos, quienes siempre están ahí para mí, quienes han sido mis mejores amigos toda mi vida y hacen de mi existencia una más feliz, Gracias por nunca dejarme solo. Jair y Víctor, hermanos, gracias por todo el apoyo incondicional, si enlistara cada una de las cosas que tengo que agradecerles no terminaría de escribir, los amo.

A Rubí y Ricardo, quienes siempre se encargaron de hacerme sentir en casa aun estando fuera de ella, quienes me han dado tantas cosas sin pedir nada a cambio, las personas más amables y dispuestas a ayudar que conozco. No saben lo agradecido que estoy por todo lo que han hecho por mí, muchas gracias primos y mi mayor respeto y admiración a las personas que son.

A todas las personas que me ayudaron y me asesoraron por hacer esta tesis, mi asesora de tesis M.I.A. Miriam, y mi estimado profesor M.I.A Ángel gracias por confiar en mi desde un principio, por darme todas las facilidades, su completa disposición y su tiempo para que este trabajo pudiera ser culminado, pero más que nada por ofrecerme su amistad, el destino me ofreció un equipo de tesis muy profesional, amable y considerado que siempre se preocupó por mí y eso lo llevaré siempre en el corazón.

A mis amigos de la universidad: Osvaldo, Omar, Chema, Je-nny, Diana, Ilse, Mariana, Andrés, Alejandra y Grecia, la vida me dio todo para acercarme a los mejores amigos que pude tener, sin ustedes simplemente no hubiera podido disfrutar esta etapa como lo hice, por ser un tipo de familia para mí, gracias por todo el apoyo y por dejarme ser parte de sus vidas.

A Brayan, Ruth, Miranda, Luis y Fermín por ser mis amigos incondicionales desde la preparatoria, en la universidad y espero para toda la vida, gracias por su compañía y por lo agradable y feliz que me hacía sentir pasar un fin de semana junto a ustedes.

A mis amigos de Badajoz, Santiago, Ezequiel, Estrella, Jessica, Brayan, Joaquín, Karen, Rachell, gracias por ser mis amigos en la mejor etapa de mi vida hasta el momento, es increíble que pueda pasar tiempo sin verlos y hablar con ustedes casi todos los días, siempre estaré muy feliz de poder coincidir con ustedes.

A todos y cada uno de ustedes, muchas gracias.

“Solo que la mar se seque, no me bañaré en sus olas”

INDICE

1. Introducción	11
2. Planteamiento del problema	13
3. Justificación	15
4. Objetivos.....	16
5. Estado del arte.....	17
6. Marco teórico	22
6.1. Problemática de las energías convencionales	22
6.2 Energías renovables y emergentes.....	23
6.2.1 Bioelectricidad	24
6.3 Celda de combustible microbiológicas basada en plantas.....	25
6.3.1. Configuración de una celda de combustible microbiana basada en plantas.....	27
6.3.2. Componentes utilizados en las celdas de combustible microbianas basadas en plantas.....	29
6.3.2.1. Ánodo	29
6.3.2.2. Cátodo	30
6.3.2.3. Contenedor	30
6.3.2.4. Circuito externo.....	30
6.4. Parámetros de operación	31

6.5	Raíces de la planta/ Rizodeposición	32
6.6	Comunidad microbiana	33
6.7	Reacciones involucradas	34
6.8	Sistema de alimentación	37
6.9	Lirio (<i>Eichhornia crassipes</i>)	37
6.9.1.	Producción de electricidad con lirio.....	38
7.	Descripción de cuerpos de agua	41
7.0.1	Río Bobos	41
7.0.2	Presa de Valsequillo	41
7.1.	Calidad de agua	42
7.1.1.	Río bobos	42
7.1.2.	Presa Valsequillo	42
8.	Marco metodológico	44
8.1	Muestreo de especímenes de Lirio acuático	45
8.2.	Descripción de prototipos.....	46
8.2.1.	Prototipo 1	46
8.2.2.	Prototipo 2	47
8.2.3.	Prototipo 3	48
8.2.4.	Prototipo 4	50
8.3.	Diseño de celda de combustible microbiana basada en plantas.....	51

8.4. Medición y mantenimiento.....	52
8.4.1. Medición de parámetros químicos	52
8.4.1.1. Medición de oxígeno disuelto	52
Medición de pH.....	53
8.4.2. Medición de parámetros físicos	54
8.4.3. Obtención de densidad de potencia	55
9. RESULTADOS	56
9.1. Prototipo.....	56
9.2. Oxígeno disuelto	58
9.3. pH	59
9.4. Corriente eléctrica y voltaje.....	60
9.5. Comparación eficiencia/precio.	63
10. Conclusiones	65
11. Bibliografía.....	66

Índice de tablas

Tabla 1. Tabla comparativa de comunidades microbianas. Fuente: propia.	34
Tabla 2. Comparación con otros prototipos. Fuente propia.....	40
Tabla 3. Componentes de prototipo 1. Fuente propia.	46
Tabla 4. Componentes prototipo 2. Fuente propia.	48
Tabla 5. Componentes prototipo 3. Fuente propia.	49
Tabla 6. Componente prototipo 4. Fuente propia.....	50
Tabla 7. Oxígeno disuelto en primer prototipo. Fuente propia.....	58
Tabla 8. pH en segundo prototipo. Fuente: Propia.....	59
Tabla 9. Medición de corriente y voltaje de prototipos 4 y 5. Fuente propia.....	62
Tabla 10. Comparación de precios. Fuente: Propia	64

Índice de ecuaciones

(Ecuación 1. Oxidación de acetato).....	35
(Ecuación 2. Ecuación de Nernst).....	35
(Ecuación 3. Redox Cátodo)	36
(Ecuación 4. Potencial de Nernst).....	36
(Ecuación 5. Potencial de celda electroquímica).....	37
(Ecuación 6. Densidad de potencia).....	55

Índice de figuras

Figura 1. Esquema de celda de combustible biológico con plantas. (Fuente: Darren Quick, 2020).....	26
Figura 2. Celda de combustible microbiano basado en plantas de dos cámaras. (Fuente: Paul Spackman, 2020).....	28
Figura 3, Celda de combustible microbiana basado en plantas de una cámara con suelo. Fuente: (Guan, Tseng, Tsang, Hu, & Yu, 2018).	29
Figura 4. Laguna de valsequillo, segunda visita.....	45
Figura 5. Laguna de Valsequillo, primera visita.....	45
Figura 8. Obtención de sedimentos en Río Filobobos.....	46
Figura 7. Río filobobos.	46
Figura 8. Primer prototipo.....	47
Figura 9. Prototipo 3.....	49
Figura 10. Cuarto prototipo.....	50
Figura 11. Prototipo 5 de celda de combustible microbiológico	52
Figura 12. A) Medición de oxígeno disuelto primer semana. B) Medición de oxígeno disuelto, última semana	53
Figura 14. Medición pH, segundo prototipo.....	54
Figura 15. Medición de corriente del prototipo 4.	55
Figura 16. A) Prototipo de celda de combustible microbiana basado en plantas. B) Prototipo de celda de combustible microbiana basada en plantas con medidas. .	56

Figura 17. A) Prototipo de celda sin contenedor. B) Prototipo de celda sin contenedor ni capa de suelo.	57
Figura 18. Distancia entre electrodos de celda de combustible microbiana	57
Figura 19. Gráfico de comportamiento de oxígeno disuelto	59
Figura 20. Gráfico de comportamiento de pH. Fuente: propia.....	60
Figura 21. Gráfico de generación de corriente para prototipos 4 y 5.....	62
Figura 22. Gráfico de generación de voltaje para prototipos 4 y 5.	63

1. Introducción

Los combustibles fósiles son unas de las principales fuentes de energía en la actualidad, sin embargo, estos generan un gran número de emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera que contribuyen a uno de los mayores problemas ambientales recientes; el calentamiento global (Power-Porto, 2009).

Muchos países con la intención de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, dirigen su mirada hacia nuevos horizontes, las energías renovables. México cuenta de manera abundante con recursos energéticos renovables y con recursos humanos capaces de generar investigación y desarrollo para apropiarse o crear las tecnologías necesarias y promover una industria nacional (Olivera-Beatriz, 2011).

Las Celdas de Combustible Microbianas Basadas en plantas (CCMBPs) son una tecnología emergente que podrían contribuir a solucionar dos de los problemas más críticos que afronta la sociedad actual: la crisis energética y la disponibilidad de agua no contaminada. Una CCMBPs es un dispositivo que utiliza microorganismos para convertir la energía química presente en un sustrato en energía eléctrica, esto es posible cuando bajo ciertas condiciones algunos microorganismos transfieren los electrones producidos en su actividad metabólica a un electrodo (ánodo) en lugar de a un aceptor natural de electrones (como oxígeno) (Revelo, 2013).

En la actualidad los desarrollos tecnológicos en materia de CCMBPs, implican altos costos en su construcción que dificultan aplicarlos en el contexto real para generar energía a gran escala, hasta ahora las aplicaciones y los resultados de las investigaciones se han centrado en pequeñas cantidades de energía.

El presente trabajo pretende identificar la estructura y condiciones de operación para una celda de combustible microbiana basada en plantas utilizando *Eichornia Crassipes* (lirio acuático) de acuerdo con criterios de bajo costo de inversión y simplicidad en la arquitectura.

Se realizaron 5 prototipos en lote empleando *Eichhornnia Crassipes* y agua residual, las variantes de diseño consistieron en el tipo de ánodo, cátodo, sedimento en la cámara y tamaño de la cámara, las variables de seguimiento que se contemplaron fue el voltaje, la corriente eléctrica, el tiempo de operación.

El desarrollo del prototipo de una celda de combustible microbiano basado en *Eichhornias crassipes*, permitió identificar los materiales más económicos del mercado y la configuración para lograr la generación de energía eléctrica. De acuerdo a los resultados obtenidos en las configuraciones probadas, la opción con mejores valores de generación de energía que cumple con los criterios de bajo costo es una celda configurada de una sola una cámara, que permite la flotación libre de la planta *Eichhornia crassipes*, en un sistema por lote dentro de un contenedor plástico con 17 L del electrolito (agua) que tiene una profundidad de 25 cm, un circuito eléctrico conformado por un ánodo y cátodo de grafito (enterrado en una cama de suelo de 1 cm), conectados mediante un cable de aluminio y separados paralelamente a una distancia de 25.5 cm. El prototipo desarrollado generó valores de 4.18 mW/m², lo que representa un aumento de 14.5 veces respecto al valor mínimo, en una celda similar a la diseñada en este trabajo y reportado en la bibliografía.

Las condiciones de operación establecidas por medio de los prototipos son el antecedente para escalar el diseño en contextos de aplicación a bajo costo y requisitos menores de mantenimiento y construcción simple en lugares donde *Eichhornnia Crassipes* puede aprovecharse para la implementación de sistema de Celdas de combustible microbiana basada en plantas.

2. Planteamiento del problema

En México, con el fin de incrementar la generación eléctrica con fuentes renovables, la Secretaría de Energía (SENER) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE) han construido dos escenarios. El primero se explica en el documento *Prospectivas de Energías Renovables 2013-2027*, éste estima que para 2024 la participación de la energía renovable en la generación de electricidad sea de 21%, con un 2% adicional de energía nuclear y un 3% adicional de las carboeléctricas limpias (SENER, 2013c). El escenario “alternativo” presentado en el documento de *Prospectivas del Sector Eléctrico 2013-2027* busca cumplir con las metas de la Ley para el Aprovechamiento y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE) y de la Ley General de Cambio Climático (LGCC), en particular aquella que establece que la generación de electricidad proveniente de fuentes de energía limpia alcance al menos un 35 por ciento a partir de 2024 (Larios Vázquez, 2015).

El uso de energías renovables es una alternativa sustentable para México, derivado de su ubicación geográfica, de la variedad de climas, de sus recursos naturales y de las actividades primarias que realiza, ya que impulsa el crecimiento y desarrollo de este tipo de energías; además la inversión de capital mexicano como extranjero apuntala un interés creciente por la consolidación de este tipo de energías en relación con el creciente interés por parte de la sociedad, empresa y gobierno por minimizar el daño ocasionado al medio ambiente por el uso de tecnologías obsoletas y sucias (Cuevas Zuñiga, Rocha Lona, & Soto Flores, 2017).

Las Celdas de Combustible Microbianas (CCMs) son una tecnología emergente que podrían contribuir a solucionar dos de los problemas más críticos que afronta la sociedad actual: la crisis energética y la disponibilidad de agua no contaminada. Una CCM es un dispositivo que utiliza microorganismos para convertir la energía química presente en un sustrato en energía eléctrica, esto es posible cuando bajo ciertas condiciones algunos microorganismos transfieren los electrones producidos en su actividad metabólica a un electrodo (ánodo) en lugar de a un aceptor natural de electrones (como oxígeno) (Revelo, 2013).

Uno de los puntos a tener en cuenta en esta tecnología es mejorar la arquitectura de las celdas, se tienen diferentes retos que alcanzar para hacer de esta tecnología una más eficiente; se debe conseguir un aumento de la resistencia interna, así como intentar conservar la viabilidad de las plantas con una potencia de salida estable y evitar que los electrodos se deterioren con el tiempo, evitar pérdidas óhmicas y de concentración, entre otros (Nitorisravut & Regmi, 2017).

Se han hecho estudios sobre las plantas que podrían utilizarse, entre todas, las plantas acuáticas son las que han dado mejores resultados, entre ellas, algunas destacan sobre la mayoría, entre ellas, *Glyceria Maxima*, las plantas de arroz, *S. anglica*, *Anisogramma anómala* y *Arundo donax* (Deng, Chen, & Zhao, 2012).

Para fines de este proyecto se usará *Eichornnia Crassipes*, ya que esta planta invasiva posee múltiples peligros tanto ecológicos como económicos y sociales, es considerada como una del top 10 de las peores hierbas malas del mundo. Esta maleza invasiva tiene impactos desfavorables en la vida a través de varios estratos. Su colonización desenfrenada de esta hierba en los cuerpos de agua amenaza la biodiversidad, causa eutrofización y causa agotamiento de oxígeno, alberga agentes causantes de enfermedades, bloquea las vías fluviales, obstaculiza la agricultura y la acuicultura (Patel, 2012).

Los métodos de controles existentes han sido insuficientes para contener su propagación agresiva. Se ha intentado darle uso a esta plaga por la gran cantidad de biomasa que posee en conjunto y puede ser usada como tratamiento de aguas, remediación de metales pesados y detergentes, como sustrato para la producción de bioetanol y biogás y para producción de electricidad, que es el enfoque de esta investigación (Patel, 2012).

3. Justificación

Las celdas de combustible microbianas basadas en plantas son un gran opción para lograr hacer un futuro más verde aportando a la transición de energías basadas en carbono a energías renovables, otras fuentes de energía como, la del viento, la solar, la geotérmica y la hidroeléctrica indudablemente decrecen la producción de dióxido de carbono, pero estas tienen algunas desventajas como, transformación del paisaje, procesos intensivos de energía y limitaciones geográficas, en contraste las celdas de combustible microbiológico basadas en plantas pueden producir energía continua sin competir por alimento y pueden ser operadas en cualquier lugar (Nitorisavut & Regmi, 2017).

La presente investigación se enfocará en el análisis de la producción de energía de las celdas de combustible microbiológico basadas en plantas, estas últimas consideradas un medio de desarrollo de energía eléctrica renovable que, de la mano con su rentabilidad, debido a sus condiciones de funcionamiento, sus materiales de composición y la sustitución de fuentes de energía basadas en carbono por esta tecnología permitiría reducir en gran o pequeña escala las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera originadas por el uso de combustibles fósiles y así, por ende el cambio climático (Nitorisavut & Regmi, 2017), además, se pretende dar un uso a *Eichornnia crassipes*, una especie de planta que ha infestado algunos cuerpos de agua de la república Mexicana y otros países (Patel, 2012).

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

- Diseñar un prototipo de una celda de combustible microbiana basada en *Eichhornia crassipes*.

4.2 Objetivos específicos

- Identificar la estructura y condiciones de la celda de combustible microbiana basada de acuerdo con las características de *Eichhornia Crassipes*.
- Monitorear las variables voltaje y corriente eléctrica del sistema.
- Calcular la potencia eléctrica generada en el prototipo de la celda de combustible biológica basada en *Eichhornia Crassipes*.
- Comparar la generación de energía respecto a otras plantas y arquitectura de bioceldas reportadas en la bibliografía.

4.3. Hipótesis

El prototipo de bajo costo de una celda de combustible microbiana basada en plantas diseñada con *Eichhornia crassipes* tienen la capacidad de generar energía eléctrica con una mejor relación costo-producción que otros sistemas en desarrollo.

5. Estado del arte

El presente estado del arte fue creado con la finalidad de recopilar información referente al uso de *Eichhornia crassipes* para la creación de celdas de combustible biológico basados en plantas, se hizo una investigación en donde se incluyen artículos de la última década que a criterios del autor se consideran relevantes para esta investigación. Las palabras y conceptos clave empleados para la búsqueda de información fueron *Celdas de combustible microbianas basadas en plantas, energía con plantas y Eichhornia Crassipes en celdas de combustible microbiológicas*.

Se han desarrollado algunos intentos para recrear un ecosistema de macrofitas flotadoras diseñado con *Eichhornia crassipes*. Venkata Mohan, Mohanakrishna, & Chiranjeevi, 2011 en su investigación evaluaron la generación de electricidad empleando la especie junto con el tratamiento de agua contaminada. Instalaron tres celdas de combustible las cuales fueron alimentadas con agua residual doméstica y agua residual de una destilería, las celdas se instalaron en una pecera agregando sedimentos de un lago, siendo un 17% del volumen total de la pecera, se agregaron algas y caracoles para prevenir que las algas se reprodujeran, el sistema se alimentó continuamente por 210 días para medir el tratamiento de agua. Se usaron discos de grafito como electrodos, los ánodos de dos sistemas se enterraron a 1 cm de profundidad del sedimento y a 8 centímetros de la superficie se instaló la última celda. Todos los cátodos se instalaron en la sub-superficie del sistema, en donde una porción de los cátodos estaba en contacto con el aire y otra porción con el agua. Evaluaron algunos parámetros como la turbidez, color, nitratos, pH, potencial de oxidación-reducción, temperatura, oxígeno disuelto, entre otras.

Se observó la generación de electricidad en la celda de combustible utilizando un ecosistema de macrófitos flotadores con *Eichhornia crassipes* y alimentado con agua residual doméstica y agua residual de la destilería. Concluyeron que la producción de energía y la eficiencia del tratamiento de aguas residuales mejoraban con el aumento de condiciones de carga orgánica. También se notó una influencia en cómo se ensamblan las celdas de combustible para la producción de energía.

Otra investigación desarrollada por Pamintuan *et al.*, 2018 usó *Eichhornia crassipes* para crear una celda de combustible microbiano basado en plantas, en donde se hibridizó para incluir la fitorremediación de níquel.

Se designaron tres sistemas para este estudio. El sistema A es un control para una celda de combustible microbiológico basado en plantas, el sistema B es un control para fitorremediación y el sistema C fue una combinación de ambos procesos. El sistema combinado mostró que tiene una potencia significativamente más alta que el sistema controlado (Sistema A), al igual que en remoción. Los sistemas utilizaban un contenedor con capacidad de 5 galones de sustrato con varillas de grafito de 10 mm de diámetro y 100 mm de largo como electrodos, el sistema utiliza como sustrato agua corriente de clorada, el sistema B es un sistema batch de fitorremediación con una planta y una solución de 2.5 ppm NiSO₄, sin electrodos, el sistema C fue similar al del sistema A, pero con un sustrato de 2.5 ppm NiSO₄.

Este estudio ha demostrado la factibilidad y posibles beneficios de combinar una celda de combustible biológico basada en planta y la tecnología de la fitorremediación. La reducción en la resistencia óhmica y la introducción de una terminal de aceptor de electrones alternativa son vistas como una de las posibles razones por una salida de potencia creciente en el sistema híbrido.

Por otro lado, Tao *et al.*, 2020, hacen mención al uso de una celda de combustible microbiológico con un humedal construido con *Eichhornia crassipes* para remover el nitrógeno y componentes orgánicos de los efluentes de las plantas de tratamiento municipal.

Los resultados mostraron que el Xylano, como fuente de carbono, demostró una mayor remoción de nitrato (arriba de 92%), comparado con la celulosa (10.9%). Con xylano como fuente de carbono el paquete del ánodo removió nitrato arriba de 80%, mientras que el cátodo solo removió 50%. Con glucosa como única fuente de carbono, el máximo total del nitrógeno removido fue de 87.66%. La demanda química de oxígeno y el nitrógeno total en el efluente de la celda se mantuvieron menores a 25 mg/l y 1.5 mg/l respectivamente. En adición a esto, el xilano como

fueron fuente adicional de carbono promovió la densidad de potencia comparado con solo la glucosa. La comunidad microbiana fue dominada por *Proteobacteria* y *Cyanobacteria_norank*.

El sistema se construyó con vidrio orgánico con un diámetro interno de 30 cm y altura de 55 cm. Desde el fondo hacia arriba, las capas de embalaje consistían en gravas, arenas y gravas. Tableros de grafito de alta pureza se usaron y se les hicieron agujeros con un mini taladro para atraer el crecimiento y la adhesión de microorganismos fueron usados como ánodo y cátodo. El cátodo se instaló en la superficie y se conectó con cables a él ánodo que estaba ubicado en la mitad del sistema entre la capa de arenas y gravas.

La mejora de la remoción de nitrógeno de los efluentes de la planta de tratamiento se alcanzó satisfactoriamente en la celda de combustible biológico con un humedal construido. El xylano fue más redituable como fuente de carbono que la celulosa, y la remoción de nitrato del ánodo fue mejor que en el cátodo.

La influencia de plantas flotadoras como *Eichhornia crassipes*, la aireación suplementaria y la conexión de circuitos en el tratamiento de aguas residuales y la producción de electricidad usando una celda de combustible microbiana con un humedal construido de flujo ascendente fueron investigadas por Teoh, Ong, Ho, Wong, & Oon, 2020; en su trabajo. Este estudio fue operado en cuatro etapas, donde la etapa 1 fue llevada a cabo sin aireación ni planta, la etapa 2 fue incluida con *Eichhornia Crassipes*; la aireación suplementaria fue incluida en la etapa 3 y la etapa 4 fue operada con circuito abierto. La etapa que incluía la aeración mostró un mayor desempeño de la celda de combustible, comparada con la etapa de circuito abierto y la de la planta flotadora. El desempeño óptimo del tratamiento de agua y la producción de electricidad fue encontrado en la etapa 3 mientras el oxígeno era suplementado por la planta y aireación suplementaria para que la materia orgánica se degradara también como la potencia eléctrica.

El biorreactor fue construido con una columna de acrílico con un diámetro interno de 17.5 cm y una altura de 75 cm. Se instalaron camas de vidrio al fondo del sistema,

se utilizó grava como medio de soporte y carbón actividad como ánodo y cátodo, se instalaron 5 puntos de muestra a 7, 21, 36, 51 y 66 cm desde el fondo del humedal. Se instalaron tres capas de ánodo para estudiar la influencia del espacio entre electrodos, a 8, 23 y 38 cm mientras que el cátodo se instaló a 53 cm del fondo del biorreactor. La conexión entre electrodos se usó con cables aislados de cobre, acero inoxidable y una varilla de carbón, también se usó una resistencia externa de 1000 ohm.

Los niveles de demanda de oxígeno en la región catódica pueden ser mejorada por la planta y con la aireación que provoca una mejor remoción de amoníaco mientras que incrementa la concentración de la aceptación del electrón para mayor generación de bioelectricidad. La conexión de circuito cerrado mejoró la degradación de la materia orgánica mientras promueve el crecimiento de la bacteria electrogénica y la transferencia de electrones también mejoró la degradación de contaminantes orgánicos. El desempeño de la celda de combustible biológico fue significativamente afectado con la aireación suplementaria comparado con la planta y la conexión de los circuitos. Sobre todo, el desempeño de la celda en la fase 3 demostró un panorama óptimo de la celda en termino de tratamiento de agua residual y generación de electricidad.

El estudio de Widharyanti, Hendrawan, & Christwardana, 2020 demuestra la potencial aplicación de las celdas de combustible microbianas basadas en plantas en pantanos dominados de lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) para producir electricidad biológica y biomasa de plantas. En esta búsqueda, la planta fue integrada en una celda de combustible microbiano que adopta varios tipos de materiales de ánodos como fieltro de carbono, zinc y hierro, con una distancia que varía entre los 10 y 20 cm entre el ánodo y el cátodo.

La celda de combustible basada en plantas consistía en un ánodo y un cátodo separados por barro, el cátodo estaba hecho de fieltro de grafito mientras que el ánodo consistía en varios materiales, fieltro de grafito, cobre o zinc encontrado en el lago Jakarta, Indonesia. El ánodo fue tratado con 1M de HCl y 1M de NaOH para incrementar la conductividad. Se utilizó cable de cobre para conectar los electrodos

con una distancia entre ellos entre 10 y 20 cm, se utilizó la planta *Eichhornia crassipes* que se encontró en un vivero y se aclimató durante 7 días antes de su inclusión al sistema. La solución consistía en agua de grifo y barro que actuaba como electrolito.

Se identificaron compuestos orgánicos producidos durante el proceso de fotosíntesis que fueron depositados por las raíces de las plantas, los cuales son oxidados por las bacterias en el medio de barro. Los resultados mostraron que la celda de combustible microbiana basada en plantas produjo un voltaje y densidad de corriente de 244.8 mV y 185.4 mA/m², respectivamente, por 30 días, con una potencia máxima de 100.2 mW/m² en las celdas usando zinc como material anódico y un espacio de electrodo de 10 cm.

Las celdas de combustible microbianas basadas en plantas que utilizan *Eichhornia crassipes* pueden producir bioelectricidad porque pueden crecer rápidamente y así facilitar la producción de electricidad en las celdas microbiológicas. La pequeña distancia entre el ánodo y el cátodo afecta a movilidad de los protones en los electrodos, así como el pH del medio.

Las celdas de combustible microbianas basadas en plantas son una tecnología que tiene potencial para un futuro, sin embargo, aún sigue en desarrollo, los artículos anteriores mencionaban en su mayoría cómo configurar una celda de combustible microbiológico con plantas, la planta elegida fue *Eichhornia crassipes*, las maneras en las que se puede elegir una configuración adecuada para lograr óptimo rendimiento de la celda, los beneficios de usar esta tecnología a la par con la remediación. A partir de esta investigación utilizaremos la información obtenida para identificar la ubicación del ánodo y el cátodo, así como de los demás componentes de la celda como el sedimento que se debe utilizar, también nos reafirma el beneficio de la utilización de *Eichhornia crassipes* y una base en los resultados para analizar el comportamiento en la producción de energía del prototipo estudiado.

6. Marco teórico

6.1. Problemática de las energías convencionales

Existe evidencia que las actividades humanas están cambiando el clima del planeta. Por cientos de años la atmosfera de la tierra había cambiado muy poco, pero hoy, hay problemas para mantener un balance. Los gases de efecto invernadero se han agregado a la atmósfera en una cantidad alarmante. Desde la revolución industrial, las actividades humanas como el transporte, agricultura, combustibles fósiles, etc., han agregado mayor concentración de gases de efecto invernadero. Uno de los mayores contribuidores causados por el hombre al calentamiento global son los gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera de la tierra a través de la continua quema de combustibles fósiles. Grandes cantidades de combustibles fósiles; vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxido de nitrógeno, y ozono son agregados diariamente (Casper, 2010).

Desde que las mediciones iniciaron a finales de los 1800s, el promedio global de temperatura de la superficie ha aumentado entre 0.3 y 0.6 °F. El aire limpio es esencial para la vida y la buena salud. Muchos contaminantes importantes son producidos por la combustión de combustibles fósiles y son emitidos directamente a la atmósfera: Monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de sulfuro e hidrocarburos. Además, el total de las partículas suspendidas, entran constantemente a la atmosfera desde una fuente antropogénica y otra natural, las cuales contribuyen a la contaminación del aire y los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos se pueden combinar en la atmósfera para formar ozono troposférico, el constituyente mayor del smog (Casper, 2010).

Con las actuales tasas de emisión de CO₂ (Las emisiones aún podrían aumentar mientras India y otras grandes poblaciones se industrialicen), la media estima que, para fines de este siglo, la mitad baja de los Estados Unidos experimentará, en promedio, 100 o más días al año en los cuales la temperatura sobrepasará los 95°F, (35°C). Hay 1 en 20 chances que en todo Estados Unidos se experimentará al

menos esos días calurosos cada año y uno en tres chances de que los Estados Unidos rutinariamente experimentará temperaturas mayores a los 5°C.

Los días verdaderamente peligrosos son esos en los cuales la “temperatura de bulbo húmedo” sobrepasa los 35°C: una combinación de temperatura y humedad en la cual el sudor no se puede evaporar y los humanos no puede regular su núcleo llevando a golpes de calor y muerte (Sommer, 2016).

Los patrones climáticos cambiantes aumentarán la probabilidad de inundaciones y lluvias. Además de su directo e inmediato impacto en salud y supervivencia, ambos resultarán en prolongadas reducciones de la producción de comida, las inundaciones y sequías también cambiarán y expandirán ecosistemas de mosquitos y otros agentes que contienen enfermedades. Además, el derretimiento de las capas de hielo traerá consigo el aumento del nivel del mar en muchos lugares (Sommer, 2016).

La quema de combustibles fósiles tiene otros efectos alarmantes en el medio ambiente y la salud. El aumento del material particulado degrada la calidad del aire, teniendo un impacto inmediato en aquellos que lo respiran. Está representativamente estimado que la contaminación del aire mate a más de tres millones de personas al año (Sommer, 2016), es por eso que se tiene y pretende hacer un cambio, debemos plantear un futuro en donde la quema de combustibles fósiles se reduzca cada vez más. Para ello, es importante que se busquen diversas maneras que puedan ayudar a la reducción de la quema de combustibles fósiles. Una de ellas es el uso de energías renovables para satisfacer de energía a la población.

6.2 Energías renovables y emergentes

Bajo la denominación de energías renovables, alternativas o blandas, se engloban una serie de fuentes energéticas que a veces no son nuevas. Las energías renovables tienen un gran potencial para desempeñar un papel importante en el futuro del mundo. Las fuentes renovables pueden ser usadas para producir energía

una y otra vez, algunos ejemplos son, la energía solar, energía del viento, energía geotérmica, energía marina, energía de biomasa, biocombustibles, y muchos más. Las energías renovables tienen la habilidad de producir energía libre de contaminantes al aire y gases de efecto invernadero emitiendo cero o casi cero por ciento de estos gases. Muchas tecnologías renovables están en práctica en el siglo XXI, pero muchas de estas aún están en desarrollo (Hussain, Arif, & Aslam, 2017).

Actualmente, las fuentes de energías renovables suministran cerca del 23.7 % de la demanda de energía del mundo. Algunas de las energías renovables como hidrotérmica, la energía del viento, energía solar, biocombustibles, biomasa y energía geotérmica son ahora convencionales y están contribuyendo.

A parte, de estas fuentes de energía renovables, hay unas nuevas tecnologías de energías renovables, las cuales son equipotenciales y sustentables para restar el conteo de gases de efecto invernadero y riesgo de contaminación del aire (Hussain *et al.*, 2017).

6.2.1 Bioelectricidad

La bioelectricidad es una energía renovable y sustentable producida de la biomasa de la caña de azúcar, desechos de madera, y otras biomásas (Grimnes & Martinsen, 2015).

La bioelectricidad está emergiendo rápidamente de las ciencias de la vida, medicina y bioingeniería, la definición de “Britannica” es: “La generación o acción de corrientes o voltajes eléctricos en un proceso biológico”. La bioelectricidad está centrada en una de las ciencias más fundamentales, y está justo en el centro de nuestra existencia (Djamgoz & Levin, 2020).

La producción de bioelectricidad es una tecnología bien establecida, que opera con una variedad de materias primas, capaz de reemplazar las centrales termoeléctricas a base de carbón que solo convierten un tercio de la energía de combustible en electricidad. Por lo general, en el último caso, el calor restante se pierde, siendo una

forma inútil de producir energía. Esta tecnología de producción de energía es útil donde se necesitan altos costos de producción para la electrificación rural, relacionados con la construcción y operación de largas redes eléctricas que conectan áreas. En algunos casos, estos costos hacen que sea imposible llevar electricidad a estas comunidades (Quintero, Rincón, & Cardona, 2011).

6.3 Celda de combustible microbiológicas basada en plantas

Una celda de combustible microbiológica basada en plantas es una tecnología alternativa para la generación de electricidad, estas usan bacterias y plantas vivas para generar electricidad (Marjolein Helder, 2012). El uso excesivo de combustibles fósiles conlleva a contaminaciones ambientales y ha resultado en la búsqueda de fuentes de energía sustentables. En esas circunstancias, la tecnología que idea la producción de biomasa con un aprovechamiento de bioenergía para mitigar el efecto del cambio climático podría ser un adecuado candidato (Nitisoravut & Regmi, 2017).

Las celdas de combustible microbianas basadas en plantas (Figura 1), producen energía eléctrica a través de la degradación de sustratos por microorganismos. La electricidad es generada por la actividad biológica en un sistema bioelectroquímico, especialmente en una celda de combustible microbiana basada en plantas.

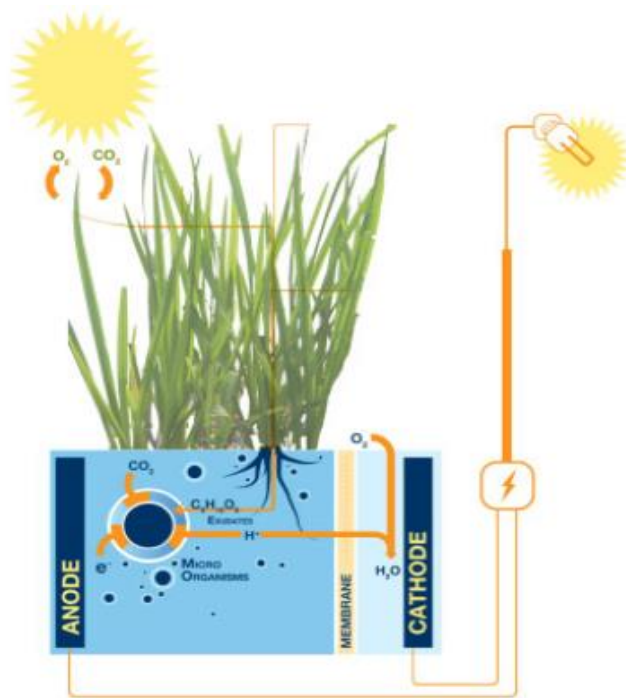


Figura 1. Esquema de celda de combustible biológico con plantas. (Fuente: Darren Quick, 2020).

Esta produce, usando como biocatalizador, el metabolismo microbiológico. La celda de combustible microbiana basada en plantas actúa en un enfoque galvánico con comunidades anódicas microbianas, oxidando materia orgánica de un sustrato o combustible, y transfiriendo los electrones extraídos al ánodo. Un circuito externo transporta los electrones al cátodo. El metabolismo de las bacterias anódicas también produce protones, que transitan del ánodo al cátodo a través del reactor. En el cátodo, una reacción de reducción usa los protones y electrones transferidos para formar agua en la reacción de la reducción de oxígeno. De esta manera, el metabolismo microbiológico ayuda a producir una corriente eléctrica (Salinas-juárez, Roquero, & Durán-domínguez-de-bazúa, 2016).

La disponibilidad de materia orgánica representa una limitación para esta tecnología para términos de operación de larga duración. Una sustentable alternativa para suministrar materia orgánica para las celdas de combustible microbiana es el uso de plantas que pueden proporcionar el combustible de estos sistemas mediante la

fotosíntesis. Este tipo de tecnologías ha sido llamado celdas de combustible microbiana basadas en plantas (Tapia, Rojas, Bonilla, & Vargas, 2017).

Las plantas son el productor primario de un ecosistema. Al ser autótrofas, utilizan energía solar para producir biomasa con la ayuda de un pigmento especial, en la parte verde de sus hojas, llamado clorofila. El 40% de la energía es consumida por la planta misma, con la exudación de la parte restante a la rizosfera. La población microbiana presente en el suelo cerca de la rizosfera rompe los compuestos orgánicos para generar electrones (Nitisoravut & Regmi, 2017).

6.3.1. Configuración de una celda de combustible microbiana basada en plantas.

La configuración física de un sistema bio-electroquímico determina la ubicación y la disposición de los componentes que conforman la bio-celda. Uno de los factores que determina la configuración es la ubicación de los electrodos y el tipo de separación entre ellos, es decir, si se utiliza una membrana selectiva de iones, un material que simule un efecto análogo o si solo se incluye una barrera física. De acuerdo con la opción elegida se ubican los electrodos y la distancia entre ellos, determinando así cual será el receptor final de los electrones (López, 2008).

Para minimizar la resistencia y la difusión de oxígeno se han desarrollado celdas de combustible microbianas basadas en plantas de dos cámaras (Figura 2). En esta configuración, una membrana ha sido introducida al fondo de la cámara del ánodo con un lado en contacto con el sedimento, en el cual el ánodo se encuentra localizado cerca de las raíces y el cátodo se ha localizado en el otro lado de la membrana. La membrana es el principal costo en la celdas de combustible biológico basado en plantas (Deng *et al.*, 2012).

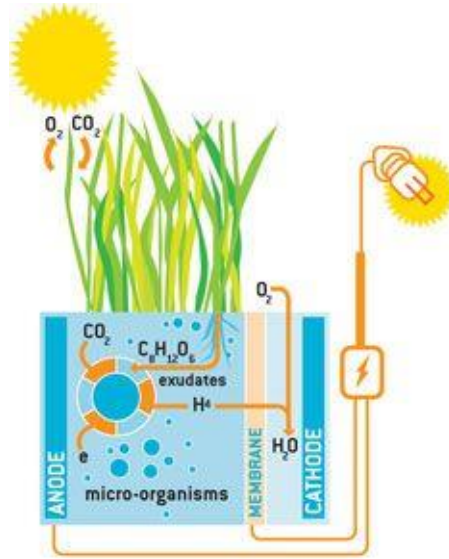


Figura 2. Celda de combustible microbiano basado en plantas de dos cámaras. (Fuente: Paul Spackman, 2020).

El principio de las celdas de combustible microbianas en plantas de una cámara (Figura 3), se basa en que la concentración de oxígeno va disminuyendo conforme más se llega al fondo del agua y el sedimento, por lo tanto, la membrana es innecesaria. La matriz de soporte, en la cual el ánodo está sumergido, es de suelo, o de otros materiales, como gránulos de grafito. El suelo bloquea la migración H^+ desde el ánodo al cátodo y la difusión del depósito de raíces hacia la superficie del ánodo, el cual incrementa la resistencia de transferencia de masa y la resistencia óhmica. Hay dos formas de configuración en una cámara: una en la cual el cátodo está localizado en la superficie del agua para usar el oxígeno del aire en reacciones de reducción, y otra en donde el cátodo está localizado en la rizosfera para usar el oxígeno producido por las raíces como el aceptor de electrones. Esta configuración sin membrana reduce el costo capital, la resistencia de transferencia de masa y las resistencias óhmicas (Deng *et al.*, 2012).

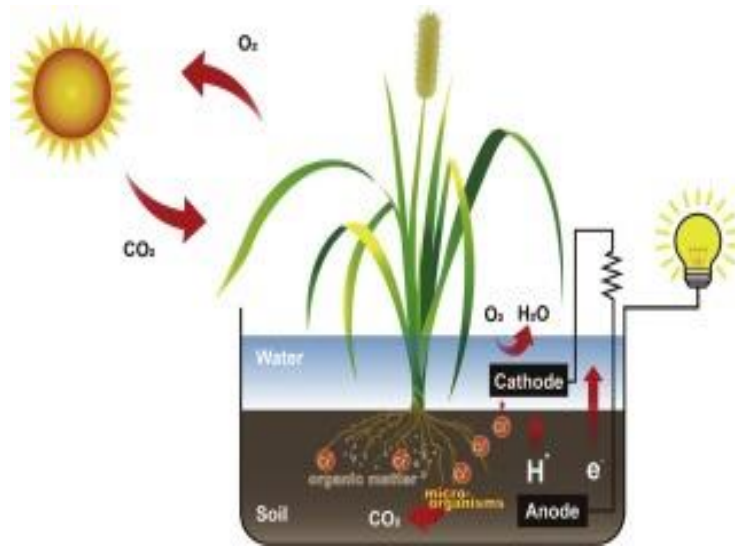


Figura 3, Celda de combustible microbiana basado en plantas de una cámara con suelo. Fuente: (Guan, Tseng, Tsang, Hu, & Yu, 2018).

6.3.2. Componentes utilizados en las celdas de combustible microbianas basadas en plantas.

6.3.2.1. Ánodo

Con el propósito de beneficiar el transporte de electrones, las principales características que debe presentar el material del ánodo son: buena conductividad eléctrica, tener un área superficial grande, no ser corrosivo, que sea químicamente estable en el electrolito y que sea biocompatible con los microorganismos y con la planta, es decir, que no sea tóxico.

El material utilizado en los electrodos con mayor versatilidad es el grafito, éste se encuentra disponible en diferentes presentaciones: placas compactadas, gránulos o polvos, barras, papel y fibras con telas de fieltro; es relativamente económico, fácil de manipular y tiene un área superficial definida (Salinas-juárez, 2016).

6.3.2.2. Cátodo

El oxígeno es el aceptor de electrones más usado para la reacción de reducción del cátodo en las celdas de combustible microbiológicas basadas en plantas.

En el cátodo de las celdas de combustible microbianas basadas en plantas, se reciben electrones y protones liberados desde la cámara anódica, mediante un circuito externo y a través de la membrana de intercambio de iones u otro material que permita el paso de protones, respectivamente. Lo anterior permite que, en el cátodo, se desarrollen las reacciones mediante las cuales un aceptor final de electrones, ya sea oxígeno u otro compuesto químico, es reducido en presencia de e^- y H^+ para formar un producto (Pineda Marín et al, 2016).

Entre los cátodos más comunes encontrados en la literatura son aquellos derivados del carbono, tales como grafito, fieltro de carbono, carbón activado, papel carbón, tela de carbono y otros empleados en distintas presentaciones como placas, materiales granulados, fieltros, barras, telas y demás (Pineda Marín et al, 2016).

6.3.2.3. Contenedor

En las investigaciones realizadas con celdas de combustible microbianas basadas plantas se utilizaron diversos materiales para la construcción de compartimientos, siendo estos recipientes que contienen la mayor parte de los componentes de la celda. Se utilizaron materiales como vidrio o plástico como el plexiglás y PVC (Salinas-juárez, 2016).

6.3.2.4. Circuito externo

Los materiales utilizados en el circuito eléctrico externo 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 la construcción del circuito externo se utilizan una variedad de materiales que van desde cables de cobre hasta cables de oro recubiertos con teflón.

En el circuito externo de las CCMV también se utilizan barras de grafito y las resistencias externas fijas varían en su capacidad desde 10 hasta 1000 ohms (Salinas-juárez, 2016).

6.4. Parámetros de operación

6.4.1. pH

El efecto del pH está pronunciado hacia el metabolismo de los microorganismos para la transferencia intracelular de electrones desde adentro hacia afuera de la célula. A parte de esto, en el suelo, cuando la celda se basa en plantas con suelo, la variación del pH también afecta los nutrientes disponibles para la planta y los microorganismos. La fluctuación cátodo-ánodo es influenciada por la variación del pH en la región de la rizósfera. Considerando que el desempeño de la celda de combustible microbianas basadas es plantas es mayor con un pH neutro, las plantas que prosperan mejor con pH neutro pueden proporcionar mayor corriente y voltaje (Regmi, Nitisoravut, & Ketchaimongkol, 2018).

6.4.2. Concentración del sustrato

La extensión de la contaminación presente en los cuerpos de agua tiene una influencia directa en la generación de poder. La concentración del sustrato del cuerpo de agua mostró una significativa influencia en la generación de poder mientras actúa como fuente de carbono (donador de electrones) para la actividad metabólica béntica. Los cuerpos de agua que contenían mayor materia orgánica fueron capaces de generar mayor salida de potencia (Mohan et al., 2009).

6.4.3. Temperatura

La temperatura tiene diversos roles para desempeñar en las celdas de combustible microbiano. La formación del biofilm bacteriano y la conductividad del electrolito son dos parámetros vitales afectados por una temperatura óptima. Más precisamente en las celdas de combustible microbiano basadas en plantas la descarga de la rizodeposición está dirigida por la temperatura, para finalmente causar fluctuaciones

en el voltaje y la corriente. Además, las fluctuaciones de la temperatura alteran el camino metabólico en las comunidades microbianas, afectando el flujo de carbono. El crecimiento de la planta es afectado por la temperatura también. Un pequeño cambio en la temperatura puede que no afecte al sistema (Regmi et al., 2018).

6.4.4. Oxígeno disuelto

La concentración de oxígeno disuelto es uno de los parámetros importantes cuando la generación de bioelectricidad está concertada en las celdas de combustible. El decrecimiento del gradiente del oxígeno sobre la profundidad del agua genera la diferencia de potencial necesario sin la necesidad de usar una membrana para generar la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo. Debido a la presencia de una mayor concentración de oxígeno, H^+ liberado durante el metabolismo del sustrato se neutraliza antes de llegar al cátodo. De todas formas, una menor concentración de oxígeno disuelto ayuda a una buena transferencia de H^+ y e^- en las operaciones de la celda de combustible. Los cuerpos de agua estancados han mostraron mayor generación de potencial que los cuerpos de agua en donde el agua fluye (Mohan et al., 2009).

6.5 Raíces de la planta/ Rizodeposición

La parte de la biomasa localizada en las raíces será utilizada para el crecimiento y la respiración, así como para la exudación. La materia orgánica de las plantas que será utilizada para la producción de electricidad es de los rizodepósitos y material de células muertas. Esta materia orgánica es asumida por tener todos los componentes de las células de las plantas. Los rizodepósitos consisten en exudados, lisados, mucílago y secreciones. En las plantas anuales el 30-60 % del carbono fijo neto es transferido a las raíces. Las plantas perennes, pueden transferir 70-80 % del carbono neto fijo a las raíces, del cual del 8-65% es exudado como rizodeposición (Marjolein Helder, 2012).

6.6 Comunidad microbiana

La formación de un biofilm en superficie del ánodo es esencial para una eficiente transferencia de electrones en las celdas de combustible microbianas basadas en plantas y la reducción del sobrepotencial del cátodo para facilitar el transporte de electrones al aceptor (Deng et al., 2012).

Los microbios donan electrones al ánodo utilizando los sustratos de la zona de la rizosfera por dos mecanismos; por transferencia directa de electrones o mediando la transferencia de electrones. La última requiere ayuda de un mediador para la ayuda de la producción de electricidad. Hay una única relación entre la zona de las raíces de las plantas y los microbios. La manifestación de esta relación es la disponibilidad de la alimentación desde la rizosfera hacia los microbios y el rol de los microbios para una mejor nutrición de la planta. Mientras mejor se adapte la comunidad microbiana a un sistema, mayor oportunidad para mejora del sistema (Nitisravut & Regmi, 2017). La actividad microbiana alrededor de las raíces es 10 veces más alta que en el resto del sistema (Marjolein Helder, 2012).

La complejidad natural del ambiente de la rizosfera a menudo hace difícil cuantificar la población microbiana en el sistema de las raíces. Sin embargo, se han hecho intentos para identificar la familia microbiana en el área anódica de las celdas de combustible biológico basadas en plantas. La tabla 1 muestra algunos ejemplos de comunidades microbianas relacionadas a plantas. La familia *Geobacteraceae* son las anaerobias obligadas asociadas con la generación de poder en los sedimentos. De cualquier manera, el nivel de aparición de esas dos cadenas en dos diferentes estudios usando *G. Maxima* y *O. Sativa* fue diferente, esto puede ser resultado de los tipos de electrodos utilizados o de los tipos de plantas en sí. Se encontró que la comunidad microbiana puede ser influenciada por el suelo. Esto sugiere que los tipos de suelo afectan la generación de poder en relación con la comunidad microbiana (Nitisravut & Regmi, 2017), con el fin de hacer una síntesis se creó una recopilación de las comunidades o familias microbianas encontradas en la producción de poder de algunos experimentos de celdas de combustible biológicos basados en plantas.

Planta	Medio de crecimiento	de Comunidad microbiana	Referencia
G.		<i>Geobacteraceae</i>	(David P. Strik, 2008)
Maxima		<i>Ruminococcaceae</i>	
G.	Solución	de <i>Geobacteraceae,</i>	(Timmers & Rothballer,
Maxima	Hoagland	<i>Ruminococcaceae,</i> <i>Comamonadaceae</i>	2012)
Rice plants	Suelo de macetas y vermicultura	<i>Desulfobulbus spp,</i> <i>Geobacter spp.</i>	(Schamphelaire et al., 2010)
O. sativa	Campo de arroz	<i>Natronocella</i> <i>Beijerinckiaceae</i>	(Kaku, Yonezawa, Kodama, & Watanabe, 2008)
C. indica		<i>Geobacteraceae</i> <i>Anaerolineaceae</i>	(Lu, Yuan, Yang, Chen, & Yang, 2015)
S.	Arena, limo, arcilla	<i>Micrococcaceae</i>	(Tapia et al., 2017)
hybridum	y materia orgánica		

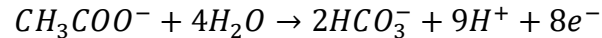
TABLA 1. TABLA COMPARATIVA DE COMUNIDADES MICROBIANAS. FUENTE: PROPIA.

6.7 Reacciones involucradas

El voltaje de la celda es la diferencia entre el potencial del ánodo y el potencial del cátodo. Las celdas de combustible microbianas basadas en plantas utilizan por medio del ánodo, la biomasa sub-superficial de una planta para la producción de electricidad. Esta biomasa es el sustrato para las bacterias del ánodo y se conforma por la raíz, el material muerto de la planta y por los exudados liberados. La diversidad de compuestos orgánicos presentes, así como distribución no uniforme de la rizodeposición, hacen del sustrato una mezcla compleja de sustancias

orgánicas de las cuales no todas son aprovechadas para la generación de electricidad.

Considerando que gran parte de los exudados pueden ser acetato, se plantea la reacción de oxidación del acetato como la reacción que tiene lugar en el ánodo, como se muestra a continuación:



(Ecuación 1. Oxidación de acetato)

Después de liberar electrones, estos son óptimamente usados para la producción de electricidad al donarlos a los ánodos de la celda de combustible biológico basada en plantas. Esto pasa por que las bacterias pueden obtener energía al donar electrones a otro compuesto (Marjolein Helder, 2012).

A partir de esta reacción el potencial del ánodo se determina aplicando la ecuación de Nernst:

$$E_{an} = E_{an}^0 - \frac{RT}{8F} \ln \left(\frac{(CH_3COO^-)}{(H^+)^9(HCO_3^-)^2} \right)$$

(Ecuación 2. Ecuación de Nernst)

En la cual:

E_{an} = potencial del ánodo (V)

E_{an}^0 = potencial estándar del ánodo (298°K y todas las concentraciones 1M), (V)

R = constante universal de los gases (8.314 J /mol K)

T = Temperatura

F = constante de Faraday (9.65*10⁴ C/ mol)

8 = número de electrones involucrados en la reacción

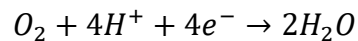
(CH_3COO^-) = concentración de acetato (mol/L)

(H^+) = concentración de protones (mol/L)

$(HCO_3^-)^2$ = concentración de bicarbonato (mol/L)

Bajo estas condiciones el potencial del ánodo en circuito abierto normalmente es de 0.289 V vs el electrodo estándar de hidrógeno o, -0.486 vs el electrodo de plata/cloruro de plata (Marjolein Helder, 2012).

El potencial del cátodo debe ser mayor al del ánodo para que haya generación de electricidad. La reacción del cátodo para las celdas bio-electroquímicas propuesta consiste en la reacción de reducción de oxígeno:



(Ecuación 3. Redox Cátodo)

El potencial de Nernst para la reducción de oxígeno se determina con la ecuación:

$$E_{cat,O_2} = E_{cat}^O - \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{1}{pO_2[H^+]^4} \right)$$

(Ecuación 4. Potencial de Nernst)

En donde,

E_{cat,O_2} = Potencial del cátodo (V)

E_{cat}^O = Potencial estándar del cátodo (298 K y presión atmosférica) , (V)

R = Constante de universal de los gases (8.314 j/ mol K)

T = temperatura (K)

F = Constante de Faraday (9.65 *10⁴ C/mol)

4 = Número de electrones involucrados en la reacción

pO_2 = Presión parcial del oxígeno (Pa)

$[H^+]$ = concentración de protones (mol/L)

El potencial estándar del cátodo, con la reacción de reducción de oxígeno normalmente es de +0.805 a 0.82 V vs el electrodo estándar de hidrógeno o, 0.608 V vs el electrodo de plata/cloruro de plata (Marjolein Helder, 2012).

En condiciones óptimas, la celda de combustible microbiana basada en plantas con la reducción de oxígeno en el cátodo tendría un voltaje máximo de la celda de 1.1 V, de acuerdo con:

$$E_{cell} = E_{cat} - E_{an}$$

(Ecuación 5. Potencial de celda electroquímica)

En donde;

E_{cell} = Voltaje de la celda, (V)

E_{cat} = Voltaje del cátodo, (V)

E_{an} = Voltaje del ánodo, (V)

La concentración de oxígeno en el catodo está sujeto a limitaciones en la difusión de oxígeno en el electrodo. El electrodo necesita estar húmedo para transportar protones y el máximo de oxígeno en el agua es poco (Marjolein Helder, 2012).

6.8 Sistema de alimentación

Proceso por lotes. Se encarga de la alimentación a un sistema al inicio del proceso, eliminándose posteriormente los productos de una sola vez. Ejemplo: el proceso de formulación de jugo, donde se agregan los ingredientes como son pulpa, azúcar, ácido cítrico y se mezclan por un tiempo para tener como producto un jugo formulado.

Proceso continuo. Las entradas y las salidas fluyen continuamente a lo largo del proceso, es decir, la cantidad de materia por unidad de tiempo es constante tanto en la entrada como en la salida como en cualquier punto del proceso. Por ejemplo, el proceso de llenado enfriado y empacado de jugo (Martha Orozco Flores, 1996).

6.9 Lirio (*Eichhornia crassipes*)

La planta de agua fresca *Eichhornia crassipes*, comúnmente conocida como lirio acuático es un miembro de la familia Pontederiaceae. Esta planta de rápido crecimiento, flotadora y perenne es indígena de Brasil y de la región del Ecuador.

Fue introducida en muchos países, hace más de un siglo, como especie de ornamento para adornar cuerpos de agua, por sus atractivas flores azules o purpuras. Pero, después esta planta fue descubierta por ser una especie invasiva. Esta planta se ha convertido en un problema ambiental a través de distintos países del mundo. El rápido y esporádico crecimiento de *E. crassipes* ha destruido muchos cuerpos de agua ecológica y económicamente importantes y humedales productivos (Patel, 2012).

Para mitigar los daños producidos por esta planta, muchas aplicaciones han sido visionadas. Actualmente, es bien sabido que es un recurso de inmenso potencial. La implicación de gran cantidad de biomasa la ha hecho útil para tratamiento de aguas residuales, fuente de biodiesel, generación de electricidad, entre otras aplicaciones (Patel, 2012).

6.9.1. Producción de electricidad con lirio

Se estudió el desempeño de *Eichhornia crassipes* para la producción de electricidad, así como tratamiento para agua de desecho, se adaptó a un modelo llamado “celda de combustible bentónica” o “Celda de combustible tipo sedimento”, la cual es un tipo de celda en donde el sistema ecológico electroquímico híbrido, en el que se utiliza una cama de sedimentos del lago, río o ecosistema marino o de cualquier sedimento orgánico para recobrar poder. Se introdujo *Eichhornia crassipes*, caracoles, microorganismos y algas como componente biológico de la celda en un tanque de 26.6 L. El sistema era alimentado continuamente con agua de desecho mediante gravedad, también contaba con un sistema de entrada y salida para las aguas de desecho junto con deflector en ambos extremos para igualar el flujo de agua y restringir los sólidos que escapan del tanque”.

Los resultados mostraron que la eficacia del poder de salida depende de la carga orgánica del sustrato y el tipo de agua residual utilizada. Otro resultado a tomar en cuenta del artículo fue que el microambiente facilita la oxidación de la materia orgánica disuelta presente en las aguas residuales. En el proceso de tratamiento, la

mayoría de los sólidos suspendidos se depositan y forman sedimentos. La actividad fotosintética facilita la producción de rizodepósitos. Con eso se concluye que tres procesos independientes contribuyen a la generación de bioelectricidad a través de la oxidación de rizodepósitos, sedimentos y materia orgánica presente en las aguas residuales. El sistema también reportó resultados satisfactorios en el tratamiento de aguas residuales (Teoh, Ong, Ho, Wong, & Oon, 2020).

Otro estudio, realizado por Teoh et al, 2020, dice que un humedal construido, es un método para purificar agua usando un proceso natural, el proceso incluye actividades físicas, químicas y microbiológicas, es un sistema de muy bajo costo y con resultados positivos al tratar un diverso rango de aguas residuales, los macrófitos también juegan un papel importante en el humedal artificial, como proporcionar una gran superficie para la adhesión y el crecimiento microbianos, así como proporcionar una gran superficie para la adhesión y el crecimiento microbianos, así como proporcionar una buena condición para la filtración física y estabilizar las camas de superficie. Además, las plantas también liberan y transfieren oxígeno, a través del sistema radicular, que es necesario para mejorar la materia orgánica en el proceso de degradación y nitrificación (Teoh et al., 2020).

Se construyó un biorreactor en una columna de acrílico con un diámetro interno de 17.5 cm y una altura de 75 cm. Se agregaron camas de vidrio al fondo del biorreactor para desarrollar un flujo uniforme de agua de desecho, también se usó grava como medio de soporte y carbón activado como electrodos. Se desarrollaron cinco puntos de muestreo a los 7,21, 36, 51 y 66 cm del fondo del humedal. Se colocaron tres ánodos a los 8, 23 y 38 cm del fondo mientras que el cátodo se instaló a 53 cm del fondo (Teoh et al., 2020).

El biorreactor se operó en cuatro fases para investigar el efecto de la planta flotante. En la primera etapa, no se usó planta flotante, en la segunda etapa se introdujo la planta, en la tercera etapa se operó con aireación y en la última etapa la planta se operó en un circuito abierto. El sistema reportó resultados satisfactorios en relación el objetivo del artículo, obteniendo mejores resultados a partir de la introducción de la planta flotante (Teoh et al., 2020).

La tabla 2 muestra una recopilación de diferentes resultados obtenidos por prototipos hechos por algunos autores con diferentes especies de plantas.

Tipo de planta	Analito	Ánodo	Cátodo	*mW/m ²	Referencias
<i>O. Sativa</i>	Solución de acetato	Fieltro de grafito	Fieltro de grafito	6	(Kaku et al., 2008)
<i>O. Sativa</i>	Solución de Hoagland	Gránulos de grafito	Gránulos de grafito	33	L. D. E. Schampelaire, Boon, & Rabaey, 2008)
<i>Elodea nuttallii</i>	Lodo de cultivo mixto	Carbón activado	Carbon activado	148.8 ± 7.5	(Oon et al., 2016)
<i>G. máxima</i>	Solución de hoagland	Gránulos de grafito	Fieltro de grafito	80	(Timmers & Rothballer, 2012)
<i>G. máxima</i>	Solución de hoagland	Gránulos de grafito	Fieltro de grafito	67	(David P. Strik, 2008)
<i>Phragmites australis</i>	Lodo anaeróbico	Carbón activado granular	Carbón activado granular	0.15	(H. Song, S. Zhang, X. Long, X. Long, H. Li, 2017)
<i>S. Anglica</i>	Solución de hoagland	Varilla de grafito en gránulos de grafito	Fieltro de grafito	222	(M Helder et al., 2010)
<i>S. Anglica</i>	Solución de hoagland	Gránulos de grafito	Fieltro de grafito	110	(Timmers & Strik, 2010)
<i>S. hybridum</i>	Suelo	Fibra de fieltro de grafito	Fibra de fieltro de grafito	0.09	(Tapia et al., 2017)
<i>E. crassipess</i>	Agua de tratamiento	Disco de grafito	Disco de grafito	80.08	(Venkata Mohan, Mohanakrishna, & Chiranjeevi, 2011)
<i>E. crassipess</i>	Agua residual sintética	Carbón activado	Carbón activado	45.46±3.83	(Teoh et al., 2020)
<i>E. crassipess</i>	Lodo y agua/ Agua desminarilizada	Plato de zinc	Fieltro de carbón	100.2	(Widharyanti, Hendrawan, & Christwardana, 2020)

*Máximo densidad de potencial

TABLA 2. COMPARACIÓN CON OTROS PROTOTIPOS. FUENTE PROPIA

7. Descripción de cuerpos de agua

7.0.1 Río Bobos

El río bobos-nautla es el cauce principal de la cuenca hidrológica “Río-Nautla”, la cual pertenece a la región hidrológica “Norte de Veracruz”. Esta cuenca tiene una superficie de 2943 km², es del tipo exorreica y su curso corre a través de terrenos cuya altitud alcanza los 4280 msnm (Universidad Veracruzana, Instituto de Ecología, 2016). Es usado para múltiples actividades, incluyendo minería desde su cursa más alta, la producción de plátano, cítricos, y café en la curse media así como pesca, pasturas inducidas, y asentaciones humanas y las tierras bajas (Rodríguez-Romero et al., 2018).

La parte media de este río atraviesa el área natural protegida a “Río filobobos y su entorno”. Nace como el río Las Minas en el municipio de Altotonga, y al unirse al río Migueta recibe el nombre de río Bobos, el cual pasa por los municipios de Tlapacoyan, Misantla y Martínez de la torre, en los cuales recibe otras corrientes tributarias, para después convertirse en el río Nautla, en el municipio de Nautla y desembocar en el golfo de México (Universidad Veracruzana, Instituto de Ecología, 2016).

7.0.2 Presa de Valsequillo

La presa Valsequillo se localiza en el estado de Puebla, en la parte sur del municipio de Puebla, la presa se ubica a 30 minutos (10 km) del centro de la localidad más grande del estado y municipio de Puebla, la heroica Puebla de zaragoza, en el 2010 el municipio de Puebla contaba con una población aproximada de 1,539,819 habitantes (Rose, 2012);

El sitio consta de 23, 612 hectáreas en la parte sur del municipio de Puebla, en la Cuenca del Alto Basas e incluye un valle aluvial formado por el Río Atoyac, la presa Manuel Ávila Camacho (Presa Valsequillo) que es el cuerpo de agua permanente más grande en el estado de Puebla ocupando 2.832 ha, y zonas boscosas de la

sierra del Tentzo, así mismo, Valsequillo forma parte del corredor migratorio de aves de América (Rose, 2012).

7.1. Calidad de agua

7.1.1. Río bobos

De acuerdo al índice de calidad del agua, el río bobos se puede categorizar de un rango que va desde, un poco contaminado (solo para consumo humano) hasta calidad excelente (para agricultura, uso industrial, pesca y recreación).

La calidad del agua está asociada con asentamientos humanos y muestra indicadores de aguas residuales (Coliformes fecales y totales, amonio, nitrógeno total). Debido al pequeño gradiente de la zona, hay baja capacidad de auto limpiamiento (Rodríguez-Romero et al., 2018).

7.1.2. Presa Valsequillo

El acuífero del Valle de Puebla es el más contaminado en la región IV administrativa de la Cuenca del Balsas, los principales afluentes de la Presa, Ríos Atoyac y Alseseca, pasan por parques industriales y empresas dedicadas principalmente a los giros: textil, químico, construcción, electromecánica automotriz y petroquímica. El río Atoyac descarga con un caudal medio anual de 1.7 m³/seg de aguas residuales, mientras que el Río Alseseca descarga un caudal medio anual de 0.7 m³/seg de descarga de alcantarillado sanitario (Rose, 2012).

Aunque los lirios acuáticos en la Presa tienen desventajas – son introducidos, crecen rápidamente y cuando se mueren, disminuyen el oxígeno disuelto en el agua – tienen ventajas también. El lirio acuático funciona como biofiltro, y provee un servicio ecológico inmenso, los ríos tienen altos niveles de grasas y aceites, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, y coliformes fecales, entre otros. Sin embargo, la presa tiene altos niveles de grasas y aceites solamente. Los niveles de demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno (DBO₅ y DQO

respectivamente), en el río Ayotac y río Alseseca antes de llegar a la presa san Manuel son significativamente más altos que los niveles de presa. El río Atoyac tiene altas concentraciones de metales: Al, Fe, Mn, Cu, Ni, Cr, Cd, Pb y Zn, mientras que la presa tiene valores muy bajos. El pH de la presa está en valores neutros y básicos (entre 7 y 7.8) y los valores más altos de oxígeno disuelto se presentan en la porción oriental (9.40 mg/L) donde hay menos lirios acuáticos, y valores más bajos se presentan en la porción occidental, (1.0 mg/L), donde hay más lirio acuático (Rose, 2012).

8. Marco metodológico

Se hicieron diferentes configuraciones de celdas con el fin de elegir el diseño adecuado que cumpliera con los objetivos de esta tesis, estos prototipos mencionados se describirán a continuación, todos estos contenían los elementos mencionados en el marco teórico, por lo general el procedimiento para armar una celda de combustible microbiano basado en plantas incluye los siguientes pasos:

1. Obtención de los materiales necesarios
2. Se agrega el sedimento (si es que incluye) en el fondo del contenedor
3. Se une el cátodo al cable y se deposita en el fondo del contenedor (La variación de la posición del cátodo con respecto al sedimento varía según la configuración elegida)
4. Se agrega el líquido escogido (analito)
5. Se coloca el ejemplar de *Eichhornia crassipes* sobre el analito
6. El cátodo es colocado en la superficie de la celda, la posición de este varía respecto a la configuración deseada.
7. Se unen los cables con una resistencia externa para cerrar el circuito.

Más adelante, se detallan los 4 prototipos elegidos, cada uno con variaciones pequeñas respecto a la configuración de la celda de combustible microbiana basada en plantas, con los fines del objetivo de esta investigación se tomará más importancia al prototipo 4, ya que fue el que generó resultados medibles y acordes al propósito del proyecto.

8.1 Muestreo de especímenes de Lirio acuático

Para la obtención de los ejemplares de *Eichhornia crassipes* que se usaron en los primeros tres prototipos se acudió a la laguna de Valsequillo, Puebla, una laguna infestada por la planta, se visitó el lugar dos veces para obtener el número de plantas necesario, durante las visitas también se obtuvo agua del lago; Durante la primera visita, nos situamos a la orilla de la laguna y con un contenedor de PVC, se obtuvieron varios ejemplares de la especie, y un poco de agua para aclimatar a la especie durante el traslado. En la segunda visita los especímenes de la orilla de la laguna se habían secado debido a que el nivel del agua de la laguna bajó, esto dificultó la tarea teniendo que insertarnos un poco más en la laguna para obtener las plantas, una vez llegado al punto necesario pusimos los lirios en un contenedor de PVC y con una pala tomamos un poco de sedimento y agua.

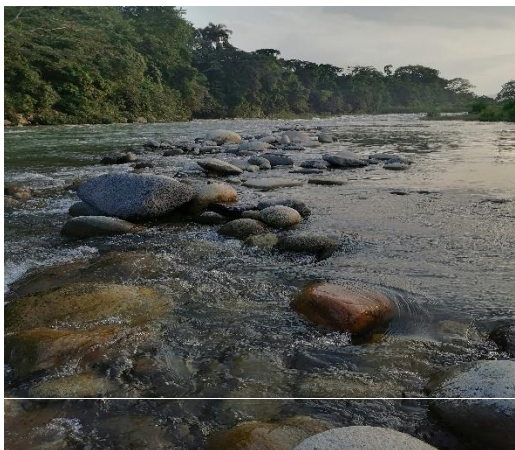
En la figura 7 se puede notar una imagen de la laguna de Valsequillo, en donde se presentan dos tonalidades de color verde, el color más oscuro es la laguna invadida por *Eichhornia crassipes*.



Figura 5. Laguna de Valsequillo, primera visita



Para el cuarto prototipo se obtuvo agua del río filobobos, en Martínez de la torre Veracruz, este río se ha infestado anteriormente por la planta en algunas partes, pero se ha removido antropogénicamente, se infirió que el agua muestra las condiciones necesarias para su desarrollo. El ejemplar de *Eichhornia crassipes* se obtuvo de un vivero en el municipio de Tlapacoyan, Veracruz, por donde también pasa el río filobobos.



8.2. Descripción de prototipos

8.2.1. Prototipo 1

Se hizo un primer prototipo que contenía los materiales mencionados en la tabla 3.

Componente	Material	Detalles
Contenedor	Cubeta de PVC	Cubeta de 5 L
Ánodo	Polvo de grafito	Se colocó una cama de polvo en el fondo de la cubeta
Analito	Solución de hoagland modificada.	
Conector	Cables	Cables de aluminio
Cátodo	Polvo de grafito contenida en una bolsa de fieltro.	Colocado en la superficie, en contacto con el aire.

TABLA 3. COMPONENTES DE PROTOTIPO 1. FUENTE PROPIA.

Este prototipo se hizo en una cubeta de PVC, se fabricó una almohada de fieltro rellena con polvo de grafito para simular un cátodo, y se situó en la superficie del analito de la celda en contacto con el aire. No se utilizó una resistencia al elegir la configuración de este prototipo, este se utilizó para ver la adaptabilidad de la planta fuera de su entorno natural y con los componentes que se necesitan para una celda de combustible microbianos, el espécimen vegeta fue obtenido en la laguna de Valsequillo, eventualmente a los 35 días la planta murió.



Figura 8. Primer prototipo

8.2.2. Prototipo 2

El segundo prototipo de celda de combustible microbiana basada de plantas fue un sistema en lote, el cual contempló el uso de: *Eichornnia Crassipes*, agua residual, cátodo y ánodo de grafito, una cama de grafito en polvo en la zona del ánodo, y agua de grifo como medio de alimentación, el espécimen de la planta se obtuvo de la laguna de Valsequillo, la celda no presentó valores significativos de generación de energía con un tipo de vida media de 4 meses, este prototipo fue importante para la investigación ya que con él se pudo obtener un vistazo de *Eichornnia Crassipes* en un sistema aislado a sus condiciones ideales, también fue importante para conocer ciertos parámetros químicos (O_2 , temperatura y pH) que pueden afectar en el desempeño de una celda de combustible microbiano basado en plantas, más información de los componentes viene mostrada en la tabla 4.

Componente	Material	Detalles
Contenedor	Pecera de plástico	Volumen 15 L
Ánodo	Combinación de cama de grafito y una barra de grafito	Se colocó una cama de grafito en el fondo de la pecera y se introdujo una barra de grafito sobre ella
Analito	Agua de grifo y agua de lluvia	
Conector	Cable aislado de cobre	
Cátodo	Barra de grafito	Se colocó sobre la superficie en contacto con el aire.

TABLA 4. COMPONENTES PROTOTIPO 2. FUENTE PROPIA.

8.2.3. Prototipo 3

Un tercer prototipo consistió en contenedores de menor volumen (355 ml, aproximadamente), los componentes son mencionados en la tabla 5, la planta nuevamente se obtuvo de la laguna de Valsequillo, la separación entre el ánodo el cátodo era menor que el primer prototipo, el ánodo consistía en una barra de grafito acompañado de una cama del mismo material y el cátodo de una barra de grafito, todo esto unido mediante cables de cobre, el sistema de alimentación era agua de grifo, este prototipo no reportó generación de corriente o voltaje, con este prototipo se pudo observar la importancia de la separación entre el ánodo y el cátodo, con menor espacio para poder observar el desempeño de *Eichornnia Crassipes* en contenedores de mayor tamaño.



Figura 9. Prototipo 3.

Componente	Material	Detalles
Contenedor	Vaso de plástico	Vaso de plástico de 1 L
Ánodo	Barra de grafito y cama de grafito	Se colocó una barra de grafito sobre una cama del mismo material en el fondo del recipiente
Analito	Agua de grifo	
Conectores	Cables de cobre aislado	
Cátodo	Barra de grafito	Se colocaron barras de grafito en la superficie en contacto con el aire.

TABLA 5. COMPONENTES PROTOTIPO 3. FUENTE PROPIA.

8.2.4. Prototipo 4

Un último prototipo se realizó con un recipiente de PVC, el cual contenía un ánodo y un cátodo compuestos de barras de grafito unidos mediante cable de cobre y con agua del Río Filobobos como medio de alimentación. Con este prototipo se consiguieron resultados tanto en corriente como en voltaje, por lo tanto, se procedió a duplicar el prototipo para corroborar resultados, los componentes de este último prototipo vienen mostrados en la tabla 6.



Componente	Material	Detalles
Contenedor	Cubeta PVC	20 litros
Ánodo	Barra de grafito	Colocada dentro de una cama de grava y lodo
Analito	Agua de río	
Conectores	Cables de cobre aislados	
Cátodo	Barra de grafito	Colocado en la superficie en contacto con el aire.

TABLA 6. COMPONENTE PROTOTIPO 4. FUENTE PROPIA

8.3. Diseño de celda de combustible microbiana basada en plantas

A continuación, se describirá el procedimiento que se siguió para armar el último prototipo de la celda de combustible microbiana, este prototipo mostró resultados significativos:

- 1) Contenedor, Se eligió un contenedor de mayor tamaño para poder albergar un espécimen de *Eichhornia crassipes* adecuadamente. El contenedor fue una cubeta de PVC de 30 L.
- 2) Se utilizó sedimento del río filobos, este sedimento consistía en lodo del río y grava, el sedimento fue depositado al fondo del contenedor
- 3) Como ánodo se utilizó una barra de grafito de 100 mm de largo y de 10 mm del ánodo se unió a un cable de cobre aislado y se colocó en el fondo del sistema.
- 4) El cable de cobre aislado se midió y fue cortado con una longitud que saliera del contenedor para posteriormente realizar las mediciones
- 5) Se agregó el analito, el cual consistía en agua del río filobobos, se utilizó 4 L del analito.
- 6) Se colocó la planta sobre el analito cuidadosamente
- 7) Como cátodo se utilizó una barra de grafito de las mismas características del ánodo, se unió a un cable de cobre aislado y se colocó en la superficie del analito, haciendo contacto con el aire y el líquido.
- 8) Se usó una resistencia de 100 ohms para cerrar el circuito, de modo que los cables que salían del ánodo y el cátodo se unieran mediante la resistencia.



Figura 11. Prototipo 5 de celda de combustible microbiológico

Al obtener resultados positivos el sistema se replicó modificando la posición del ánodo, este se enterró 1 cm dentro del sedimento.

8.4. Medición y mantenimiento

Se agregaban aproximadamente 100 mL de agua del río filobobos diario a la celda de combustible microbiológico, esto con el fin de contrarrestar la evaporación del analito y agregar un poco de oxigenación a la superficie.

8.4.1. Medición de parámetros químicos

8.4.1.1. Medición de oxígeno disuelto

Para medir el oxígeno disuelto se decidió utilizar el método electrométrico mencionado en NMX-AA-012-SCFI-2001. El instrumento de medición, medidor multiparámetro a prueba de agua HI98194, fue proporcionado por el laboratorio de

ambiental de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. El procedimiento es el siguiente:

1. Calibrar el medidor de oxígeno disuelto de acuerdo con las especificaciones del fabricante.
2. Introducir el electrodo previamente lavado con agua a la muestra.

Agitar uniformemente y leer directamente el instrumento de la concentración de oxígeno.



Figura 12. A) Medición de oxígeno disuelto primer semana. B) Medición de oxígeno disuelto, última semana

Medición de pH

Para medir el pH se optó por usar el método propuesto en la NMX-AA-008-SCFI, la cual señala el procedimiento para medir el pH de acuerdo con la legislación mexicana.

- Se calibró y verificó el equipo, medidor multiparámetro a prueba de agua HI98194.
- Se sumergió directamente en la muestra de agua
- Se agitó brevemente y se esperó a que la lectura de pH se estabilizara y se registraron al menos 3 lecturas sucesivas independientes
- Se enjuagó el electrodo con agua destilada.



Figura 14. Medición pH, segundo prototipo.

8.4.2. Medición de parámetros físicos

La corriente y el voltaje se midieron constantemente desde la instalación de la celda de combustible biológico basada en plantas, las mediciones se hicieron con un voltímetro master DT830B, la corriente se medía con circuito cerrado (Con la resistencia) y el voltaje con circuito abierto (Sin la resistencia).



Figura 15. Medición de corriente del prototipo 4.

8.4.3. Obtención de densidad de potencia

La densidad de potencia expresada como la potencia por unidad de área del electrodo anódico, se calcula de la siguiente manera:

$$DP = \frac{IU}{A}$$

(Ecuación 6. Densidad de potencia)

En donde:

A: Área de la superficie del electrodo anódico

I= Corriente en amperios

U= Voltaje en voltios

9. RESULTADOS

9.1. Prototipo

El prototipo utilizado se representa en una visualización 3D, la imagen muestra la posición y medidas exactas de algunos de la celda de combustible microbiana basada en plantas, en la figura 16 se puede apreciar la celda con contenedor, así como las medidas de esta. En la superficie se puede notar la posición del ánodo que está en contacto con el oxígeno.

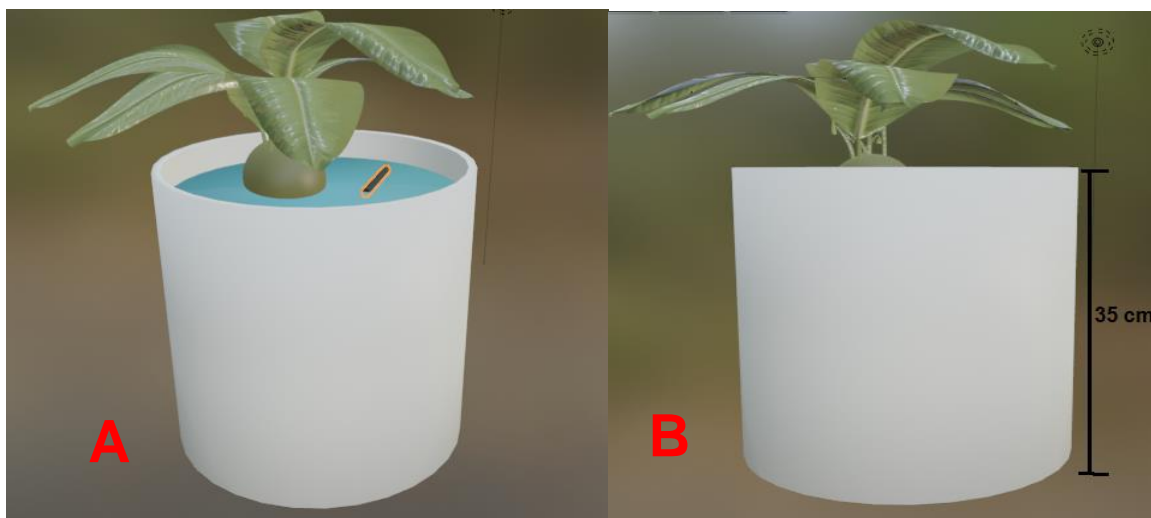


Figura 16. A) Prototipo de celda de combustible microbiana basado en plantas. B) Prototipo de celda de combustible microbiana basada en plantas con medidas.

En la figura 17, se puede notar el prototipo sin el contenedor, en ella se puede apreciar la proporción de agua que se utilizó desde el final de la capa de suelo (25 cm), así como la distancia del fondo de la celda a la última capa del suelo (1 cm) de suelo, también se puede notar la presencia del cátodo, que se encuentra dentro de la capa de suelo, es decir, enterrado en el suelo.

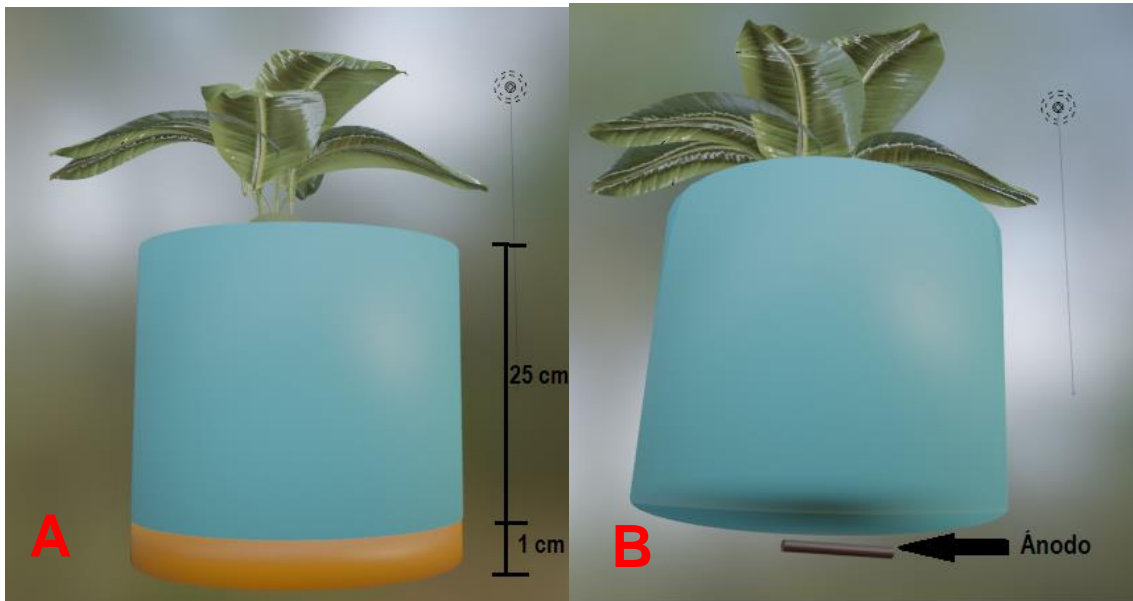


Figura 17. A) Prototipo de celda sin contenedor. B) Prototipo de celda sin contenedor ni capa de suelo.

La figura 18, muestra la imagen del prototipo sin el agua ni el suelo, esto con el fin de poder observar la exacta posición de los electrodos y la distancia entre ellos (25.5 cm).

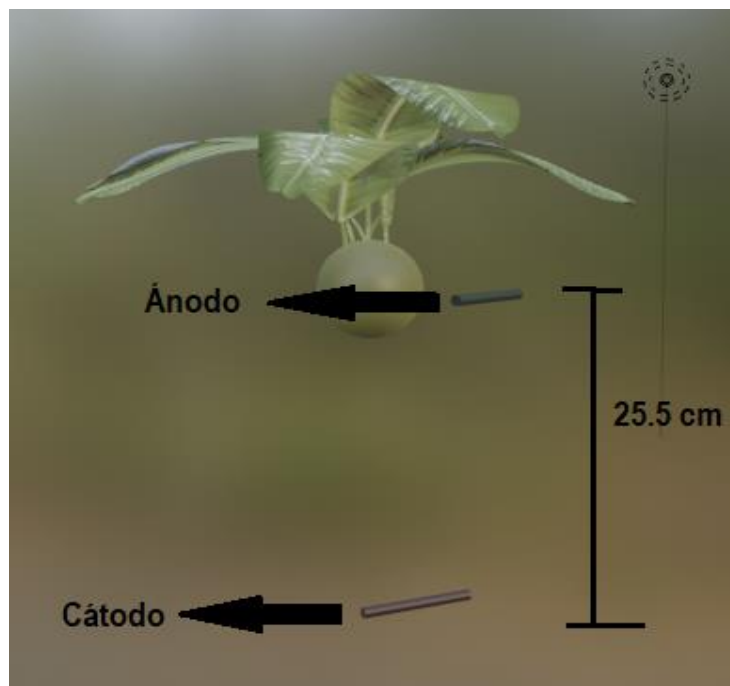


Figura 18. Distancia entre electrodos de celda de combustible microbiana

9.2. Oxígeno disuelto

La medición de oxígeno disuelto del prototipo 1 mostró un decremento en su concentración, esto se ve claramente en la Tabla 6, que muestra las concentraciones de oxígeno disuelto semana a semana durante el tiempo de vida del primer prototipo. Este comportamiento podría ser por la condición de agua estancada en la que se encontraba el electrolito, la planta fue enfermando conforme la concentración de oxígeno disuelto fue disminuyendo.

Tiempo	Oxígeno disuelto (mg/L)
Semana 1	0.6
Semana 2	0.4
Semana 3	0.3
Semana 4	0.3
Semana 5	0.1

TABLA 7. OXÍGENO DISUELTO EN PRIMER PROTOTIPO. FUENTE PROPIA

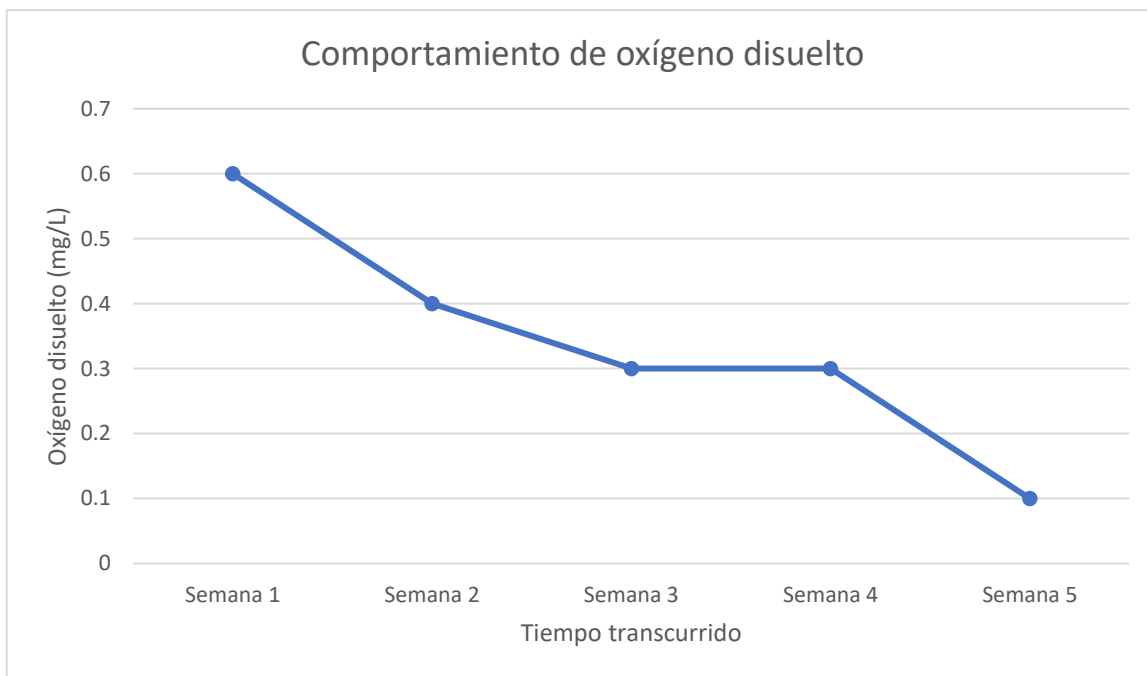


Figura 19. Gráfico de comportamiento de oxígeno disuelto

9.3. pH

Las mediciones de pH en el prototipo 2 no mostraban alteraciones significantes, siendo su valor mínimo 7.94 y su valor máximo 8.22 durante el tiempo de vida de este prototipo, el pH siempre mostró ser alcalino para este tipo de agua. Los resultados al no sufrir alteraciones significativas se plasmaron en la tabla 8 por semanas.

Semana	pH
Semana 1	8.21
Semana 2	8.11
Semana 3	8.07
Semana 4	8.21
Semana 5	7.98
Semana 6	7.94
Semana 7	8.22

TABLA 8. PH EN SEGUNDO PROTOTIPO. FUENTE: PROPIA

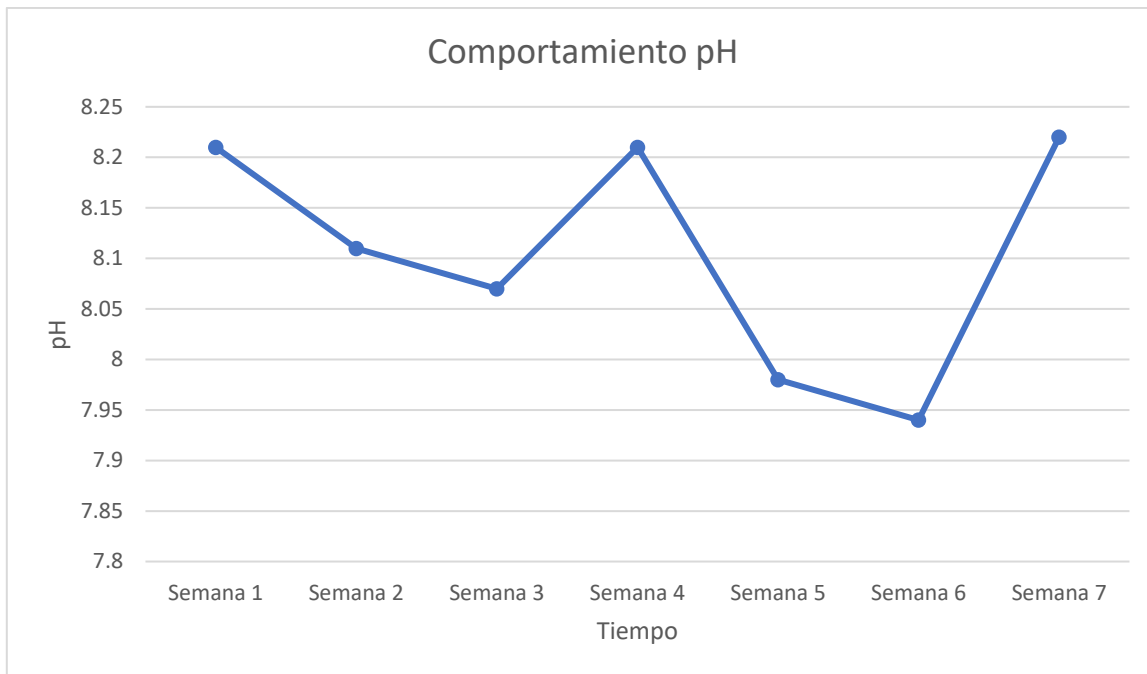


Figura 20. Gráfico de comportamiento de pH. Fuente: propia

9.4. Corriente eléctrica y voltaje

Los resultados de la medición de corriente y voltaje son mostrados en la tabla 9 y representados en las figuras 21 y 22, el prototipo cuatro mostró resultados favorables durante 17 tomas, 30 días, después decreció el nivel de generación de corriente y voltaje a la par, la planta mostró un claro desgaste que eventualmente la llevó a su muerte, el periodo de muerte de la planta se puede ver representado de las tomas 17 a las 22, para posteriormente llevarlo a la desinstalación del prototipo. El prototipo 5 que fue una réplica del cuarto prototipo, mostró una consistencia en sus resultados desde la primera hasta la última toma, la salud de la planta parecía favorable durante todo el periodo de monitoreo, hasta llevarlo a su periódica desconexión.

Prototipo 4				Prototipo 5		
No. de toma	Corriente (μA)	Voltaje (mV)	Densidad de potencia (mW/m^2)	Corriente (μA)	Voltaje (mV)	Densidad de potencia (mW/m^2)
1	011	100	0.33	046	194	2.70
2	010	130	0.39	024	223	1.62
3	008	123	0.30	019	327	1.88
4	009	169	0.46	015	300	1.36
5	012	295	1.07	013	294	1.15
6	011	438	1.46	011	286	0.95
7	027	380	3.11	016	460	2.23
8	017	377	1.94	018	299	1.63
9	028	493	4.18	015	331	1.50
10	010	304	0.91	016	323	1.56
11	007	267	0.56	014	338	1.43
12	022	443	2.95	016	312	1.51
13	009	238	0.65	011	291	0.97
14	010	200	0.60	016	296	1.43
15	009	157	0.42	015	328	1.50
16	005	299	0.45	011	317	1.05
17	006	087	0.15	012	328	1.19
18	000	024	0.00	014	334	1.41
19	004	70	0.08	012	327	1.19
20	011	136	0.45	011	333	1.11
21	000	034	0.00	014	305	1.30
22	001	050	0.01	015	298	1.35
23	000	000	0.00	011	304	1.01

TABLA 9. MEDICIÓN DE CORRIENTE Y VOLTAJE DE PROTOTIPOS 4 Y 5. FUENTE PROPIA.

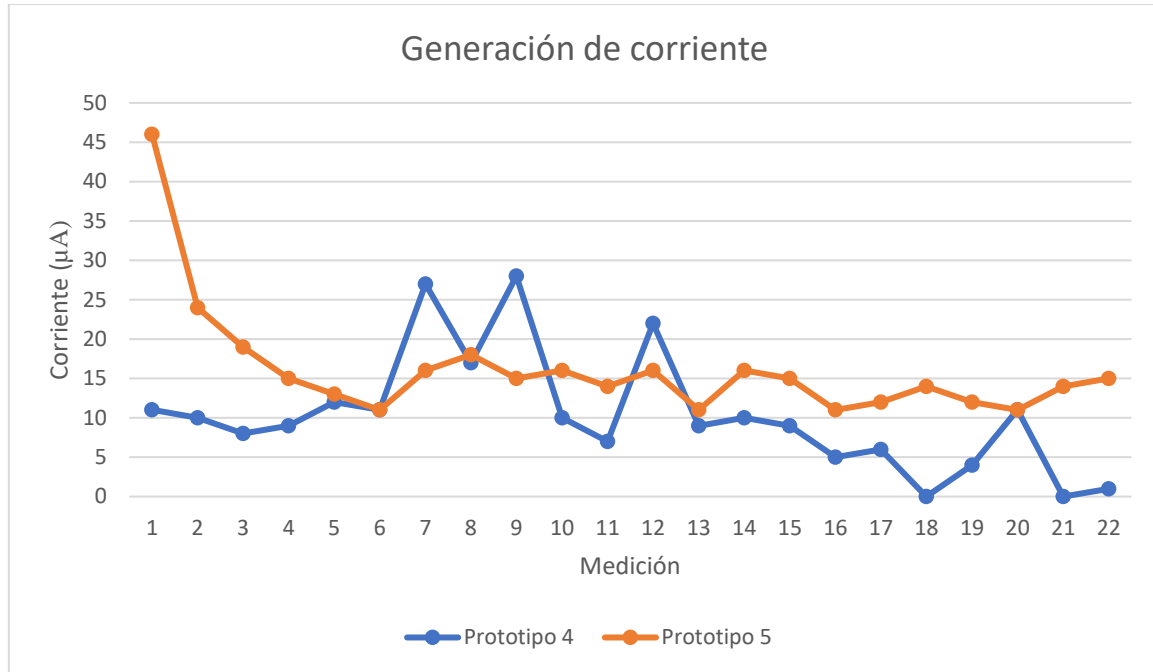


Figura 21. Gráfico de generación de corriente para prototipos 4 y 5.

Los resultados mostraron un decremento en los primeros días posteriores a la instalación del prototipo, de 46 μA a 11 μA , en los días posteriores la corriente se logró mantener dentro de un rango estable que se encuentra entre 11 y 15 μA , el comportamiento de los niveles de corriente son parecidos a los reportados en la investigación de Widharyanti et al en el 2020, en donde los primeros días los resultados decrementaron para después estabilizarse en márgenes inferiores a los de los primeros días.

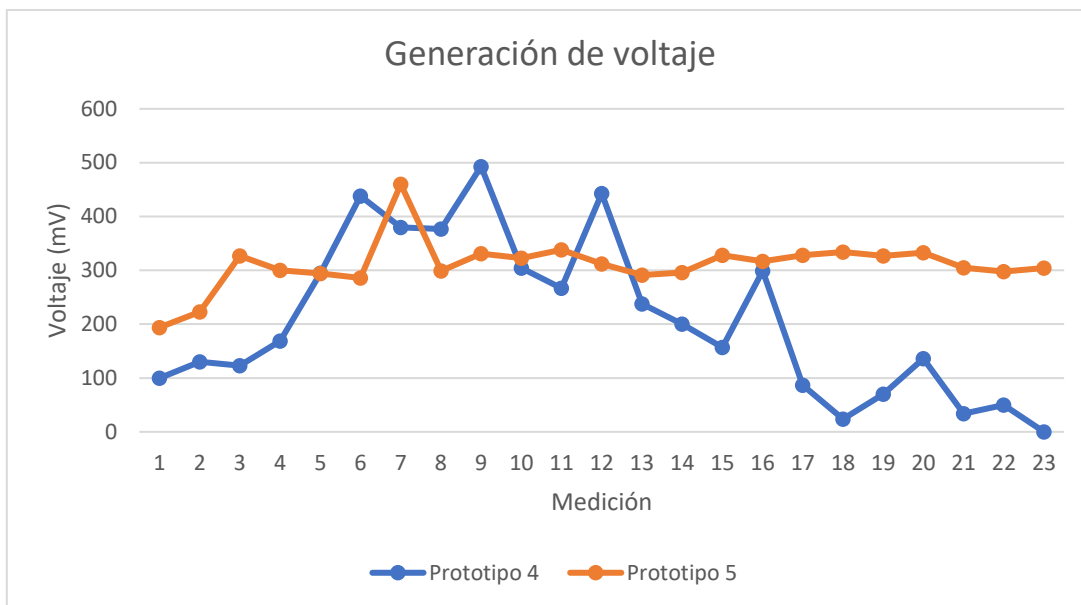


Figura 22. Gráfico de generación de voltaje para prototipos 4 y 5.

Los resultados obtenidos mostraron comportamientos similares para los dos prototipos, manteniendo picos más pronunciados en el prototipo 4, así como el valor más alto de voltaje reportado (493 mV).

El prototipo 5 mostró una consistencia en los resultados, mostrando un breve incremento entre la medición 6 y la 8 a 460 mV, para luego estabilizarse dentro del rango comprendido entre 291 y 338 mV.

9.5. Comparación eficiencia/precio.

La tabla 10 muestra una comparación de los resultados obtenidos en esta investigación con algunos estudios que utilizaron diferentes modelos de celdas de combustible microbianas, este estudio mostró una adecuada producción de densidad de potencial tomando en cuenta el precio que se estableció y la disponibilidad de los materiales, geográficamente hablando. Para obtener los precios de los componentes de los estudios que se compararon se utilizó una

cotización en internet de cada material, que influyó directamente en el resultado de la densidad de potencia, listado en su respectivo artículo de investigación, algunos componentes no son mencionados por ser reciclados.

Tipo	Componentes costeables	Densidad de potencial (DP)	Precio total estimado	Precio por unidad de DP	Autores
Celda de combustible microbiana basada en plantas usando suelo	Filtro de grafito, granulos de grafito, cables de titanio y resistencia.	0.09	645 (Filtro de grafito) + 50 (Gránulos de grafito) + 5 (cables)+5 (resistencia)=705	0.00009	(Tapia et al., 2017)
Celda de combustible microbiana	MIP nafion 117, papel carbón, platino	3900	1505 (Membrana) +645 (Papel carbón) + 200 (Platino) = 2350	1.6	(Oh, Min, & Logan, 2004)
Celda de combustible microbiana basada en plantas	Electrodos de carbono, cables y resistencia	4.18	200 (Tubos de grafito + cables + resistencia)	0.0209	Este estudio
Celda de combustible microbiana basada en plantas usando suelo	Electrodos de carbono, solución de nutrientes, cables, resistencia,	120	500 (Electrodos)+ 200 (Solución) + 5 (Cables) + 5 (Resistencia) = 710	0.169	(Gilani, Yaseen, Zaidi, Zahra, & Mahmood, 2016)
Celda de combustible microbiano con humedal construido	Grafito granulado, catalizador de platino con tela de carbono, varillas de grafito, grava, material epóxico, lana de vidrio	320.8	1300 (Catalizador de platino), 50 (Grafito granulado) + 200 (Varillas de grafito) + 10 (Grava) + 100 (Lana de vidrio) + 10 (Material epóxico) = 1670	0.19	(Srivastava, Yadav, & Mishra, 2015)

TABLA 10. COMPARACIÓN DE PRECIOS. FUENTE: PROPIA

10. Conclusiones

El desarrollo del prototipo de una celda de combustible microbiano basado en *Eichhornias crassipes*, permitió identificar los materiales más económicos del mercado y la configuración para lograr la generación de energía eléctrica. La tecnología de las celdas microbianas basadas en plantas es una buena alternativa para aprovechar la presencia de *Eichhornias crassipes* en cuerpos de agua en donde es catalogada como plaga; una de sus aplicaciones podría estar orientada a lograr la autosostenibilidad energética para operación de sistemas de monitoreo remoto en ecosistemas acuáticos.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las configuraciones probadas, la opción con mejores valores de generación de energía que cumple con los criterios de bajo costo es una celda configurada de una sola una cámara, que permite la flotación libre de la planta *Eichhornia crassipes*, en un sistema por lote dentro de un contenedor plástico con 17 L del electrolito (agua) que tiene una profundidad de 25 cm, un circuito eléctrico conformado por un ánodo y cátodo de grafito (enterrado en una cama de suelo de 1 cm), conectados mediante un cable de aluminio y separados paralelamente a una distancia de 25.5 cm.

El monitoreo constante de la corriente y el voltaje del sistema logró identificar y corroborar que había generación de electricidad. Respecto a la corriente, se obtuvieron valores que oscilaron entre 10 y 17 μA durante un periodo de 35 días. La generación de voltaje mostró valores estables en la segunda semana de operación, presentando un pico de 460 mV, para posteriormente disminuir y mantenerse estable entre 300 y 340 mV durante 20 días, estos resultados son acordes a los reportados en la bibliografía.

El prototipo desarrollado generó valores de 4.18 mW/m², lo que representa un aumento 14.5 veces respecto al valor mínimo, en una celda similar a la diseñada en

este trabajo, en un estudio realizado por Pamintuan et al durante el 2018 y reportado en la bibliografía y un decremento de 11 veces respecto al valor máximo reportado para una celda de combustible microbiana utilizando la misma planta en un estudio realizado por Teoh et al en el 2020, el resultado de esta investigación presenta una alternativa interesante para cuando se necesitan pequeñas cantidades de energía a un costo accesible.

Es importante resaltar la gran ventaja económica que tienen las celdas de combustible microbiano para generar electricidad. Para esta investigación solo se invirtió en las barras de grafito (\$196) y los cables que componen el circuito (\$4 cada metro) así como la resistencia, los demás componentes fueron obtenidos sin costo alguno. En comparación con otros tipos de celda, el prototipo desarrollado en esta investigación logró generar 0.0209 mW/m² por cada peso gastado, eso representa un aumento 0.00002153 veces respecto al prototipo de Tapia et al., 2017 que logró generar menor densidad de potencia por cada peso reportado en la bibliografía (0.00009 Densidad de potencia sobre peso invertidos).

Es recomendable utilizar esta tecnología a la par con el tratamiento de aguas de desecho, ya que con ese enfoque se pretender dar dos soluciones a problemas en un mismo proceso, además, las características de las aguas de desecho en muchas ocasiones resultan ideales para un analito de celdas de combustible microbianas. El uso de esta tecnología

11. Bibliografía

Casper, J. K. (2010). Fossil Fuels and Pollution: The Future of Air Quality. Retrieved October 20, 2020, from <http://books.google.com/books?id=SsIPLitGm6cC&pgis=1>

Cuevas Zuñiga, I. Y., Rocha Lona, L., & Soto Flores, M. del R. (2017). *Tecnologías*

Verdes: Energías Renovables como una alternativa sustentable para México.
1557–1575.

David P. Strik, H. V. M. H. (Bert) J. F. H. S. and C. J. N. B. (2008). Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*. <https://doi.org/10.1002/er>

Deng, H., Chen, Z., & Zhao, F. (2012). Energy from plants and microorganisms: Progress in plant-microbial fuel cells. *ChemSusChem*, 5(6), 1006–1011. <https://doi.org/10.1002/cssc.201100257>

Djamgoz, M. B. A., & Levin, M. (2020). Bioelectricity: A Quick Reminder of a Fast-Advancing Discipline! *Bioelectricity*, 2(3), 208–209. <https://doi.org/10.1089/bioe.2020.0033>

Gilani, S. R., Yaseen, A., Zaidi, S. R. A., Zahra, M., & Mahmood, Z. (2016). Photocurrent generation through plant microbial fuel cell by varying electrode materials. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 38(1), 17–27.

Grimnes, S., & Martinsen, Ø. G. (2015). Introduction. *Bioimpedance and Bioelectricity Basics*, 1–7. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-411470-8.00001-5>

Guan, C., Tseng, Y., Tsang, D. C. W., Hu, A., & Yu, C. (2018). *Wetland plant microbial fuel cells for remediation of hexavalent chromium contaminated soils and electricity production.*

H. Song, S. Zhang, X. Long, X. Long, H. Li, W. xiang. (2017). *Optimization of Bioelectricity Generation in construct wetland-coupled microbial fuel cell systems.* <https://doi.org/10.3390/w9030185>

Helder, M, Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Kuhn, A. J., Blok, C., & Buisman, C. J. N. (2010). Bioresource Technology Concurrent bio-electricity and biomass

- production in three Plant-Microbial Fuel Cells using *Spartina anglica* ,
Arundinella anomala and *Arundo donax*. *Bioresource Technology*, 101(10),
 3541–3547. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.124>
- Helder, Marjolein. (2012). *Design criteria for the Plant-Microbial Fuel Cell Electricity generation with living plants – from lab to application*.
- Hussain, A., Arif, S. M., & Aslam, M. (2017). Emerging renewable and sustainable energy technologies: State of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71(January), 12–28. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.033>
- Kaku, N., Yonezawa, N., Kodama, Y., & Watanabe, K. (2008). Plant/microbe cooperation for electricity generation in a rice paddy field. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79(1), 43–49. <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1410-9>
- Larios Vázquez, A. (2015). Desarrollo y prospectiva de energía renovable. *Economía Informa*, Enero, 132–135. Retrieved from <http://www.economia.unam.mx/assets/pdfs/econinfo/390/09LariosVazquez.pdf>
- López, L. (2008). *Universidad Nacional Autónoma De México*. 3.
- Lu, J., Yuan, J. gang, Yang, J. zhi, Chen, A. kui, & Yang, Z. yi. (2015). Effect of substrate depth on initial growth and drought tolerance of *Sedum lineare* in extensive green roof system. *Ecological Engineering*, 74, 408–414. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.018>
- Martha Orozco Flores. (1996). Operaciones unitarias. Retrieved October 7, 2020, from [https://books.google.com.mx/books?id=_zrNwOEKfAMC&pg=PA19&dq=sistema+por+lotes+y+continuo&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjsqN-zs6PsAhUM7awKHY-8D7QQ6AEwB3oECAkQAg#v=onepage&q=sistema por](https://books.google.com.mx/books?id=_zrNwOEKfAMC&pg=PA19&dq=sistema+por+lotes+y+continuo&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjsqN-zs6PsAhUM7awKHY-8D7QQ6AEwB3oECAkQAg#v=onepage&q=sistema%20por)

lotes y continuo&f=false

- Mohan, S. V., Srikanth, S., Raghuvulu, S. V., Mohanakrishna, G., Kumar, A. K., & Sarma, P. N. (2009). Bioresource Technology Evaluation of the potential of various aquatic eco-systems in harnessing bioelectricity through benthic fuel cell: Effect of electrode assembly and water characteristics. *Bioresource Technology*, *100*(7), 2240–2246. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.10.020>
- Nitorisavut, R., & Regmi, R. (2017). Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *76*(September 2016), 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.064>
- Oh, S., Min, B., & Logan, B. E. (2004). Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells. *Environmental Science and Technology*, *38*(18), 4900–4904. <https://doi.org/10.1021/es049422p>
- Oon, Y., Ong, S., Ho, L., Wong, Y., Dahalan, F. A., Oon, Y., ... Nordin, N. (2016). 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*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.079>
- Patel, S. (2012). *Threats , management and envisaged utilizations of aquatic weed Eichhornia crassipes : an overview*. 249–259. <https://doi.org/10.1007/s11157-012-9289-4>
- Pineda-Marín, A., & Rosas-Tafur, M. L. (2016). *Estado del arte en celdas de combustible microbiana (CCM) para producción de energía*. (Ccm).
- Quintero, J. A., Rincón, L. E., & Cardona, C. A. (2011). Production of bioethanol from agroindustrial residues as feedstocks. *Biofuels*, 251–285.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385099-7.00011-5>

Regmi, R., Nitisoravut, R., & Ketchaimongkol, J. (2018). A decade of plant-assisted microbial fuel cells: looking back and moving forward. *Biofuels*, 9(5), 605–612.

<https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1432272>

Rodríguez-Romero, A. J., Rico-Sánchez, A. E., Mendoza-Martínez, E., Gómez-Ruiz, A., Sedeño-Díaz, J. E., & López-López, E. (2018). Impact of changes of land use on water quality, from tropical forest to anthropogenic occupation: A multivariate approach. *Water (Switzerland)*, 10(11).

<https://doi.org/10.3390/w10111518>

Rose, J. (2012). *Ficha Informativa de los Humedales de humedales*. (2027), 1–34.

Salinas-juárez, M. G. (2016). *Estudio de la generación de electricidad en un humedal artificial asistido electroquímicamente*.

Salinas-juárez, M. G., Roquero, P., & Durán-domínguez-de-bazúa, M. C. (2016).

Bioelectrochemistry Plant and microorganisms support media for electricity generation in biological fuel cells with living hydrophytes. *Bioelectrochemistry*, 112, 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2016.02.007>

Schamphelaire, L. De, Cabezas, A., Friedrich, M. W., Boon, N., Schamphelaire, L.

De, Cabezas, A., ... Verstraete, W. (2010). *Microbial Community Analysis of Anodes from Sediment Microbial Fuel Cells Powered by Rhizodeposits of Living Rice Plants Microbial Community Analysis of Anodes from Sediment Microbial Fuel Cells Powered by Rhizodeposits of Living Rice Plants* □ †.

<https://doi.org/10.1128/AEM.02432-09>

Sommer, A. (2016). Burning fossil fuels: Impact of climate change on health.

International Journal of Health Services, 46(1), 48–52.

<https://doi.org/10.1177/0020731415625253>

Srivastava, P., Yadav, A. K., & Mishra, B. K. (2015). The effects of microbial fuel cell integration into constructed wetland on the performance of constructed wetland.

Bioresource Technology, 195, 223–230.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.072>

Tao, M., Guan, L., Jing, Z., Tao, Z., Wang, Y., Luo, H., & Wang, Y. (2020). Enhanced denitrification and power generation of municipal wastewater treatment plants (WWTPs) effluents with biomass in microbial fuel cell coupled with constructed wetland. *Science of the Total Environment*, 709, 136159.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136159>

Tapia, N. F., Rojas, C., Bonilla, C. A., & Vargas, I. T. (2017). Evaluation of Sedum as driver for plant microbial fuel cells in a semi-arid green roof ecosystem.

Ecological Engineering, 108(July), 203–210.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.017>

Teoh, T., Ong, S., Ho, L., Wong, Y., & Oon, Y. (2020). Journal of Water Process Engineering Up- flow constructed wetland-microbial fuel cell : Influence of floating plant , aeration and circuit connection on wastewater treatment performance and bioelectricity generation. *Journal of Water Process Engineering*, 36(March), 101371. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101371>

Timmers, R. A., & Rothballer, M. (2012). *Microbial community structure elucidates performance of Glyceria maxima plant microbial fuel cell*. 537–548.

<https://doi.org/10.1007/s00253-012-3894-6>

Timmers, R. A., & Strik, D. P. B. T. B. (2010). *Long-term performance of a plant microbial fuel cell with Spartina anglica*. 973–981.

<https://doi.org/10.1007/s00253-010-2440-7>

Universidad Veracruzana, Instituto de Ecología, S. A. C. (2016). Memoria del IV Congreso Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas. *Manejo de Cuencas Hidrográficas*.

Venkata Mohan, S., Mohanakrishna, G., & Chiranjeevi, P. (2011). Sustainable power generation from floating macrophytes based ecological microenvironment through embedded fuel cells along with simultaneous wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 102(14), 7036–7042. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.04.033>

Widharyanti, I. D., Hendrawan, M. A., & Christwardana, M. (2020). Membraneless plant microbial fuel cell using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for green energy generation and biomass production. *International Journal of Renewable Energy Development*, 10(1), 71–78. <https://doi.org/10.14710/ijred.2021.32403>