

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE TIANGUISTENCO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL

OPCIÓN IX
TESIS

Celdas de combustible vegetal operadas con plantas ornamentales para la
producción de electricidad

Que para obtener el Título de
INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTA

Elizabeth Mendizabal Cuevas

DIRECTOR:
Dr. Julio César Gómora Hernández

Junio 2025

El presente trabajo se realizó en las instalaciones del Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, en el laboratorio de Instrumental de la División de Ingeniería Ambiental y en la Facultad de Química de la FES Zaragoza de la Universidad Nacional Autónoma de México, como parte del proyecto ACA-IA/PI-034 *"Celda de combustible microbiana vegetal operada con plantas ornamentales para la producción de energía"*, bajo la responsabilidad del Dr. Julio César Gómora Hernández y como parte del proyecto PAPIIT IN117125 de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM bajo la responsabilidad de la Dra. María Guadalupe Salinas Juárez.

Este trabajo de investigación fue registrado con el título “Celda de combustible microbiana vegetal operado con plantas ornamentales para la producción de electricidad”, con el número ACA-IA/PI-034 ante la Academia de Ingeniería Ambiental.

El trabajo se inscribe en la línea de investigación: *Ingeniería Ambiental y Energías Renovables* del Programa de Ingeniería Ambiental del Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
JUSTIFICACIÓN	8
OBJETIVOS	9
OBJETIVO GENERAL	9
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
HIPÓTESIS	10
Capítulo 1. Generalidades	11
1.1. Fuentes convencionales y no convencionales para la generación de energía	12
1.2. Celda de combustible microbiana	13
1.2.1 Componentes de una celda de combustible microbiana	14
1.2.1.1 Electroodos (Ánodo y Cátodo)	15
1.2.1.2 Membrana de intercambio iónico	15
1.2.1.3 Bacterias exoelectrógenas	16
1.2.1.4 Sustrato o materia orgánica	17
1.2.2 Tipos de celdas de combustible microbianas	17
1.2.3 Importancia y aplicación	18
1.3 Celda de combustible microbiana vegetal	18
1.3.1 Componentes de la celda vegetal	19
1.3.2 Plantas utilizadas	20
1.3.4 Factores que afectan la eficiencia de la CCMV	21
1.4 Rutas Fotosintéticas	21
Capítulo 2. Desarrollo experimental.	25
2. Metodología	26
2.1 Diseño y construcción de la CCMV	27
2.2 Efecto del tipo de planta	28
2.3 Efecto del tipo de electrodo	29

2.4 Efecto del contenido de humedad	30
2.5 Efecto del arreglo serie – paralelo	31
2.6 Generación de potencia y curvas de polarización	32
Capítulo 3. Resultados y discusión.....	33
3.1 Diseño y construcción de la CCMV	34
3.2 Efecto del tipo de planta	35
3.3 Efecto del tipo de electrodo.....	39
3.4 Efecto del contenido de humedad.....	43
3.5 Efecto del arreglo serie – paralelo	47
3.6 Generación de potencia y curva de polarización.....	51
CONCLUSIONES	56
RECOMENDACIONES.....	56
REFERENCIAS.....	58

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1.1: Fuentes de energía eléctrica en México durante el período 2011-2020 (SENER,2021).....	13
Figura 1.2: Estructura de una celda de combustible microbiana.....	14
Figura 1.3: Proceso bioeletrogénico en una celda de combustible microbiana.....	16
Figura 1.4: Componentes de una celda de combustible microbiana vegetal.....	19
Figura 1.5: Ruta fotosintética C3.....	23
Figura 1.6: Ruta fotosintética C4.....	23
Figura 1.7: Ruta fotosintética CAM.....	24
Figura 2.1. Diagrama general de la metodología utilizada en el proyecto.....	26

Figura 2.2: Diagrama general para el armado y construcción de las CCMV's.....	27
Figura 3.1: Etapas para la elaboración de una CCMV.....	34
Figura 3.2. Comportamiento del voltaje a circuito abierto en función del tiempo observado en las celdas operadas con <i>Dietes iridioides</i> : Sistemas 1, 2, 3, 4 y 5..	35
Figura 3.3 Comportamiento del amperaje en función del tiempo observado en las celdas operadas con <i>Dietes iridioides</i> : Sistemas 1, 2, 3, 4 y 5.....	36
Figura 3.4: Comportamiento del voltaje a circuito abierto en función del tiempo observado en las celdas operadas con <i>Agapanthus</i> : Sistemas 1, 2, 3, 4 y 5.....	37
Figura 3.5. Comportamiento del amperaje en función del tiempo observado en las celdas operadas con <i>Agapanthus</i> : Sistemas 1, 2, 3, 4 y 5.....	38
Figura 3.6. Comportamiento del voltaje a circuito abierto utilizando diferente tipo de electrodo en las celdas operadas con <i>Dietes iridioides</i> : Sistemas 1, 2, 3, 4, 5 y 6.....	40
Figura 3.7. Comportamiento del voltaje a circuito abierto utilizando diferente tipo de electrodo en las celdas operadas con <i>Dietes iridioides</i> : Sistemas 7, 8, 9, 10, 11 y 12.....	41
Figura 3.8: Comportamiento del amperaje utilizando diferente tipo de electrodo en las celdas operadas con <i>Dietes iridioides</i> : Sistemas 1, 2, 3, 4, 5 y 6	41
Figura 3.9: Comportamiento del amperaje utilizando diferente tipo de electrodo en las celdas operadas con <i>Dietes iridioides</i> : Sistemas 7, 8, 9, 10, 11 y 12.....	42
Figura 3.10. Comportamiento del voltaje a diferentes horas del día observado en las celdas operadas con <i>Dietes iridioides</i> : Sistemas 1, 2, 3, 4 y 5	43
Figura 3.11. Comportamiento del voltaje a diferentes horas del día observado en las celdas operadas con <i>Dietes iridioides</i> : Sistemas 6, 7, 8, 9 y 10.....	44

Figura 3.12: Comportamiento del amperaje a diferentes horas del día observado en las celdas operadas con <i>Dietes iridioides</i> : Sistemas 1, 2, 3, 4 y 5.....	45
Figura 3.13: Comportamiento del amperaje a diferentes horas del día observado en las celdas operadas con <i>Dietes iridioides</i> : Sistemas 6, 7, 8, 9 y 10.....	46
Figura 3.14: Generación de voltaje a circuito abierto en los sistemas en serie y paralelo operados con la planta <i>Dietes iridioides</i>	47
Figura 3.15. Generación de amperaje en los sistemas en serie y paralelo operados con la planta <i>Dietes iridioides</i>	49
Figura 3.16 : Generación de voltaje a circuito abierto en los sistemas en serie y paralelo operados con la planta <i>Agapanthus africanus</i>	49
Figura 3.17 : Generación de amperaje en los sistemas en serie y paralelo operados con la planta <i>Agapanthus africanus</i>	50
Figura 3.18: Curva de polarización de la celda operada con la planta <i>Dietes iridioides</i>	51
Figura 3.19: Curva de polarización de la celda operada con la planta <i>Agapanthus africanus</i>	52
Figura 3.20 : Apariencia de las plantas después de 30 días de experimentación..	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Especificaciones del ánodo utilizado en las celdas construidas con <i>Dietes iridioides</i> y <i>Agapanthus</i>	28
Tabla 2.2: Materiales utilizados para evaluar el efecto del electrodo sobre el voltaje en las celdas construidas con <i>Dietes iridioides</i>	29
Tabla 2.3. Ánodos utilizados para evaluar el efecto de la humedad en celdas de combustible operadas con la planta <i>Dietes iridioides</i>	30

Tabla 2.4: Especificaciones de los ánodos utilizados en el arreglo serie-paralelo.....	31
Tabla 3.1. Comparación de los valores máximos y mínimos de voltaje y amperaje observados durante la operación de los sistemas 1-5 con la planta Lirio.....	37
Tabla 3.2: Comparación de los valores máximos y mínimos de voltaje y amperaje observados durante la operación de los sistemas 1-5 con la planta <i>Agapanthus</i>	39
Tabla 3.3: Voltajes y amperajes obtenidos con diferentes materiales de ánodo ..	43
Tabla 3.4. Voltajes y amperajes máximos determinados durante un día de operación.....	47
Tabla 3.5. Voltajes y amperajes máximos y mínimos obtenidos en los sistemas en serie y paralelo con las plantas <i>Dietes iridioides</i> y <i>Agapanthus africanus</i>	51
Tabla 3.7: Comparación de la densidad de potencia obtenida en este trabajo con lo citado en literatura.....	53

RESUMEN

En las últimas décadas, México ha experimentado un cambio significativo en su enfoque energético, la implementación de fuentes renovables se considera como parte fundamental de la producción energética. Los recursos naturales del país comprenden extensas costas, regiones desérticas y un clima variado, que brinda un terreno fértil para la explotación de energías renovables como la solar, eólica, geotérmica y las celdas de combustible vegetal. Las celdas de combustible generan electricidad mediante el aprovechamiento del metabolismo natural de las plantas y bacterias. En este trabajo se utilizaron dos tipos de plantas diferentes; *Dietes iridioides* con una ruta fotosintética C3 y *Agapanthus* con ruta fotosintética C4, estas plantas se adaptaron a celdas de combustible vegetales con diferentes tipos de ánodo para evaluar la vitalidad de la planta y la eficiencia en la producción de energía. Para ello, se armaron celdas de combustible conectado un ánodo en la parte inferior del sistema donde se ubican las raíces de la planta y un cátodo conectado la parte superior de la planta, se utilizaron como variables de estudio el material del ánodo, el tipo de planta y arreglo serie-paralelo, con la finalidad de encontrar las condiciones óptimas para la generación de voltaje y así elaborar curvas de polarización para la estimación de la potencia generada por la celda.

El voltaje más alto a circuito abierto fue de 1900 mV observado con la planta *Dietes iridioides* con una potencia de 191.83 mW/m^2 , mientras que la planta *Agapanthus* alcanzó un máximo de 1450 mV con una densidad de potencia de 479.57 mW/m^2 . En todos los experimentos realizados la apariencia de la planta no cambió permitiendo concluir que el acoplamiento de los electrodos a base de acero inoxidable no afectó a la planta.

Palabras clave: Bioelectroquímica, celda de combustible microbiana vegetal, energía limpia, plantas ornamentales, potencia eléctrica.

ABSTRACT

*In recent decades, Mexico has suffered a significant change in its energy approach by implementing renewable sources as fundamental part of energy production. The country's natural resources include extensive coastlines, desert regions and a wide range of climates that provides fertile ground for the exploitation of renewable energies like solar, wind, geothermal and plant fuel cells. Fuel cells are able to generate green electricity by harnessing the natural metabolism of plants and bacteria. In this work we employed two different ornamental plants; *Dietes iridioides* and *Agapanthus africanus* with C3 and C4 photosynthetic pathway respectively, these plants were adapted to microbial fuel cells with different types of anode to evaluate the vitality of the plant and the efficiency to produce green energy. For this, fuel cells were constructed employing an anode at the bottom of the system near to the plant roots and an air-cathode was placed at the top of the plant. The anode material, the type of plant and the series-parallel arrangement were used as study variables in order to find the optimum conditions for open circuit voltage and thus to estimating the maximum power density by polarization curves study.*

*The highest open circuit voltage and power density with *Dietes iridioides* plant was 1900 mV and 191.83 mW / m² respectively. For *Agapanthus*, the maximum open circuit voltage of 1450 mV was achieved coupled to the highest power density of 479.57 mW / m². The appearance and vitality of the plants did not change through the experiment, suggesting that steel-based electrodes does not affect plant vitality.*

Keywords: Bioelectrochemistry, plant microbial fuel cell, clean energy, ornamental plants, power.

INTRODUCCIÓN

En la búsqueda de soluciones sostenibles con el medio ambiente, el uso de energías renovables ha emergido como un soporte fundamental en la producción energética de México. En las últimas décadas, el país ha experimentado una creciente conciencia sobre la necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar los impactos negativos al ambiente. En este medio, las energías renovables se presentan como una opción prometedora que no solo busca diversificar la matriz energética, sino también impulsar el desarrollo social y económico.

El uso de energías renovables no solo conlleva beneficios ambientales al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también promueve la no dependencia de los combustibles fósiles para generar energía, estos son solo algunos de los impactos positivos que podría generar un cambio hacia la producción energética sustentable.

Las celdas de combustible microbianas vegetales se han propuesto como una alternativa energética, debido a su bajo costo de operación y bajo impacto que ocasionan en el ambiente, se ha potencializado su uso e investigación para hacer más eficiente estos sistemas y en un futuro cercano sea considerado una opción factible para la producción de energía.

Sin embargo, a pesar de los avances obtenidos, aún persisten desafíos importantes en la implementación de las celdas de combustible microbianas vegetales, por ello es importante buscar alternativas que eficiente estos sistemas y permitan su uso como fuentes de energía renovable en México para energizar dispositivos de baja demanda.

El presente proyecto busca evaluar el desempeño de celdas de combustible microbianas vegetales con base al del tipo de planta, material de electrodo e intensidad lumínica. Para ello se seleccionaron dos especies vegetales con diferentes rutas fotosintéticas; *Dietes iridioides* y *Agapanthus*, para analizar su influencia en la generación de voltaje y amperaje. Además, se evaluaron diversos

materiales y tamaños de ánodo y se estudió el efecto de la intensidad lumínica con la finalidad de optimizar la transferencia de electrones.

Este proyecto se estructura en tres secciones principales. En la primera sección se presentan las generalidades del proyecto; es decir la información necesaria que sustenta el tema de investigación. En este capítulo se describen las fuentes convencionales y no convencionales para la generación de energía. Además, se realiza una descripción de las especies vegetales seleccionadas, destacando sus características para su aplicación en la investigación. La segunda sección detalla la metodología experimental empleada. Se describe el proceso de construcción de las celdas, las características de los electrodos utilizados, sus dimensiones y las condiciones a las que se operaron las celdas.

En la tercera sección se presentan y discuten los resultados obtenidos, analizando el efecto que tiene el tipo de planta y la configuración del ánodo sobre la generación de voltaje y amperaje. Además, se reporta la generación de potencia a través de una curva de polarización construida a diferentes resistencias externas y se comparan los resultados obtenidos con los citados en la literatura.

Planteamiento del problema, Justificación, Hipótesis y Objetivo

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

México se encuentra en un conflicto energético marcado por una creciente demanda de electricidad y una fuerte dependencia de los combustibles fósiles que a pesar de los avances tecnológicos en energías renovables, en México aún se continúa dependiendo de fuente fósiles debido a su eficiencia y practicidad. De acuerdo con la Comisión Federal de Electricidad, el promedio de consumo energético por habitante es de aproximando a $2,006 \text{ KW h}^{-1}$ y debido a esto se propicia la contaminación a la atmósfera por las emisiones de dióxido de azufre, óxido nítrico, dióxido de carbono, monóxido de carbono, entre otros, producidos durante la operación de las plantas carbo-eléctricas.

Existen algunas alternativas renovables para la generación de energía tales como la energía solar, eólica, térmica, biomasa, etc. Sin embargo, algunas de estas tecnológicas implican un alto costo de instalación, operación y mantenimiento, así como la generación de subproductos contaminantes. Por otro lado, la energía generada a partir la Celda de Combustible Microbiana Vegetal (en adelante, CCMV) promete tener un bajo costo y una menor generación de subproductos contaminantes hacia el medio ambiente.

Sin embargo, hoy en día la CCMV presenta algunos desafíos como la baja generación de potencia, bajo eficiencia, uso de electrodos a base carbono impregnados con metales pesados, entre otros, que limitan su aplicación a la alimentación de dispositivos de baja demanda. Esto muestra la necesidad de seguir estudiando esta área del conocimiento para incrementar su aplicación como una alternativa energética. A pesar de ser una alternativa universal para la generación de energía, la CCMV depende de muchos factores tanto bióticos como abióticos tales como la radicación solar, tipo de planta, ruta fotosintética, arreglo electroquímico, tipo de electrodo, entre otros, que deben optimizarse para incrementar su eficiencia de generación de energía y poder ser utilizada en aplicaciones tales como el alumbrado de áreas verdes y dispositivos que requieran mayor energía. El uso de plantas ornamentales permitiría utilizar especies comúnmente empleadas con fines estéticos para la producción simultánea de

energía que a la postre permita la iluminación de espacios abiertos como parques y jardines.

JUSTIFICACIÓN

Debido al crecimiento poblacional, la demanda de energía eléctrica ha aumentado en los últimos años ocasionado consecuencias negativas al ambiente, tales como la contaminación atmosférica y la emisión de gases de efecto invernadero. Una manera de solventar la demanda energética es a través del uso de energías alternativas como la solar, eólica, geotérmica y de la biomasa. La energía solar se presenta como una alternativa prometedora y eficiente, sin embargo, suele ser de alto costo, razón por la cual se busca una alternativa más económica que permita disminuir el uso de la energía convencional derivada de los combustibles fósiles.

Por ello surge una tecnología innovadora para la generación de energía conocida como CCMV, la cual produce energía limpia sin generar subproductos contaminantes para el medio, además de ser accesible y fácil de operar, lo que hace que esta tecnología sea prometedora para años futuros. En los últimos años el uso de CCMV's ha sido objeto de estudio debido a su capacidad para generar energía suficiente para energizar dispositivos de baja demanda como focos LED, capacitores, sensores, entre otros.

En este proyecto se pretende construir y evaluar CCMV's operadas con dos tipos de plantas ornamentales con rutas fotosintéticas diferentes y ánodos de bajo costo para evaluar el efecto que tienen sobre la generación de voltaje y amperaje. El uso de electrodos de acero inoxidable y fibra de carbono se justifica por su bajo costo y su relativa facilidad de obtención, lo que los convierte en materiales atractivos para prototipos a pequeña escala.

Un plus del trabajo es el uso de plantas ornamentales utilizadas con fines estéticos y que poseen la capacidad de sobrevivir a diferentes ambientes, lo cual las hace viables para su implementación en ambientes cerrados o en jardines abiertos. La implementación de esta tecnología permitirá reducir la huella de carbono causada por la obtención de energía a partir de combustibles fósiles. Así mismo la disminución de la concentración local de CO₂ mediante el proceso de fotosíntesis

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el desempeño de celdas de combustible microbianas vegetales con base en el tipo de planta, material de electrodo y arreglo serie - paralelo mediante el estudio del voltaje generado en circuito abierto y de la vitalidad de la planta.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- A. Adaptar las plantas ornamentales; *Dietes iridioides* y *Agapanthus africanus*, en celdas de combustible microbianas vegetales ensamblados con electrodos de bajo costo.
- B. Comparar el desempeño para la generación de voltaje de celdas de combustible vegetales operadas con los dos tipos de plantas.
- C. Comparar el desempeño de las celdas de combustible vegetales con base en el tipo y tamaño de electrodo.
- D. Determinar el efecto del arreglo serie – paralelo sobre la generación de voltaje a circuito abierto.
- E. Medir la potencia eléctrica generada en las celdas de combustible vegetales y compararla con lo reportado en la literatura.

HIPÓTESIS

La planta *Dietes iridioides* (lirio persa) al tener ruta fotosintética C3 tiene un menor potencial para generar voltaje en circuito abierto en comparación con la planta *Agapanthus africanus* con ruta fotosintética C4.

El ánodo construido a base de acero inoxidable tiene mayor generación de voltaje en circuito abierto en comparación con los electrodos a base de fibra de carbono.

Las celdas de combustible vegetales operadas con plantas ornamentales y electrodos de bajo costo son sistemas con el potencial para la generación de electricidad.

Capítulo 1.

Generalidades

1.1. Fuentes convencionales y no convencionales para la generación de electricidad

La producción de energía se realiza principalmente por medio de la quema de carbón, plantas hidroeléctricas y centrales nucleares, principalmente, que además de causar un impacto negativo en el ambiente son procedimientos costosos. Debido a la creciente demanda energética y a la preocupación dada por los impactos negativos que ocasionan los medios convencionales de producción de energía, se han realizado múltiples estudios enfocados en la obtención de energía mitigando los impactos negativos al ambiente. Algunos ejemplos son las centrales eólicas, energía solar, geotérmica y las celdas de combustible, estas últimas buscan generar energía suficiente para abastecer los dispositivos de baja demanda como lámparas LED, sin embargo, al ser nuevas tecnologías aún son requeridas más investigaciones para optimizar los sistemas (Pardo, 2020). Es bien sabido, que la generación de energía por medios convencionales produce cambios en los ecosistemas, así como la desaparición de especies y hábitat natural, por ejemplo, las centrales hidroeléctricas además de tener un alto costo de construcción emiten gases provenientes de la descomposición de materia orgánica en la zona además de deforestación (Barranco & Torres, 2019).

Durante el periodo 2011-2020 se observó que el 56.32% de la producción de energía en México es obtenida a partir del petróleo crudo, mientras que el 11.25% se produce a través de energías renovables siendo la solar, eólica, geotérmica, hidrológica los principales (SENER, 2021). La Figura 1.1 muestra las fuentes de generación de energía en el periodo antes mencionado.

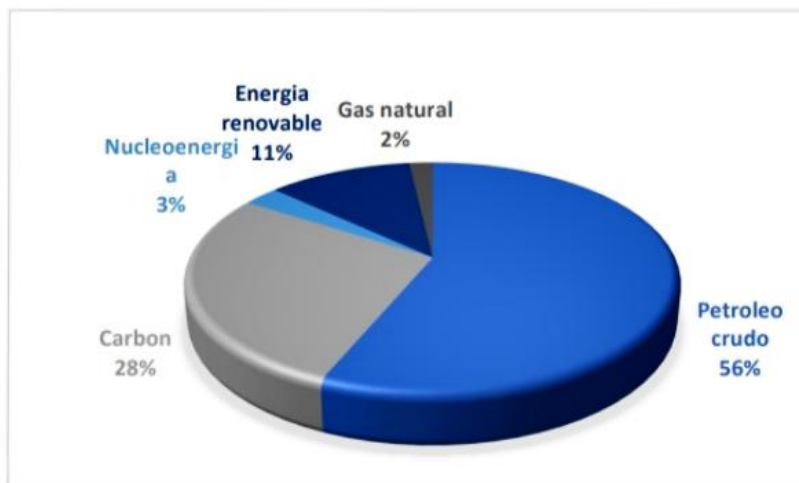


Figura 1.1. Fuentes de energía eléctrica en México durante el período 2011-2020 (SENER, 2021).

1.2. Celda de combustible microbiana

Las Celdas de Combustible Microbianas (CCM) son dispositivos bioelectroquímicos que utilizan algunos microorganismos para generar energía eléctrica mediante la oxidación de la materia orgánica durante su metabolismo, esto sucede cuando existen las condiciones adecuadas para el desarrollo bacteriano. El mecanismo de funcionamiento de estos dispositivos se basa en utilizar microorganismos presentes en el sustrato que transforman su energía química en electricidad, la cual es captada por un ánodo y enviada hacia un cátodo a través de un sistema eléctrico externo (Lumba, 2020). Estas celdas tienen un campo de aplicación creciente ya que pueden ir desde el tratamiento de agua residual hasta la generación de energía. En esta última actividad se pueden derivar actividades como almacenamiento de energía y encendido de lámparas de bajo consumo, lo cual disminuye el consumo de energía proveniente de fuentes convencionales y aminorar el impacto ambiental (Sánchez & Espinoza, 2021).

1.2.1 Componentes de una celda de combustible microbiana

Las CCM se componen principalmente de 4 partes; cámara anódica, cámara catódica, membrana de intercambio protónico y un circuito eléctrico externo. Uno de los diseños más comunes se muestra en la Figura 1.2, el cual consiste en dos cámaras separadas por una membrana, la cámara anódica contiene microorganismos que a través de su metabolismo transforman la materia orgánica presente en el sustrato en electrones que son transferidos al ánodo, el cual está conectado al cátodo mediante un circuito externo y una resistencia (Rosero *et al.*, 2019). La membrana de intercambio iónico es utilizada para separar la cámara anódica de la cámara catódica permitiendo únicamente el paso a los protones generados durante la degradación de la materia orgánica. La cámara anódica funciona como un reactor anaeróbico en el que los microorganismos oxidan la materia orgánica presente en el sustrato, produciendo dióxido de carbono, protones y electrones, El ánodo de la cámara está repleta de bacterias electrogénicas y materia orgánica mientras que en la cámara catódica el oxígeno actúa como receptor de los electrones formados en la cámara anódica, formando agua. El cátodo afecta directamente a la eficiencia de la cámara por lo que debe cumplir con las mismas características con las que cuenta el ánodo (Repuello *et al.*, 2020).

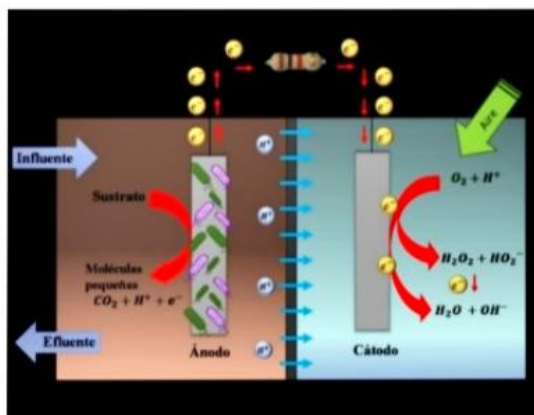


Figura 1.2. Estructura de una celda de combustible microbiana (Rosero *et al.*, 2019)

1.2.1.1 Electrodo (Ánodo y Cátodo)

Los electrodos son dispositivos conductores de energía que pueden trasladarla de un lugar a otro o pueden recibirla, también son superficies donde puede ocurrir la reacción de óxido-reducción. Un ánodo es un dispositivo conductor que traslada los electrones recibidos durante un proceso de oxidación hacia un cátodo que usualmente se encuentra en contacto con el ambiente para que sea receptor de los electrones. Existen diferentes tipos de electrodo desde malla de platino hasta el grafito (Valero, 2023).

Generalmente, los electrodos se construyen con espuma de malla de carbono, fieltro de carbono y tela, papel carbón, varilla de grafito, gránulos de carbono vítreo, entre otros materiales. Estudios han demostrado que estos materiales poseen gran volumen y área superficie lo cual beneficia la recuperación de voltaje y la generación de potencia en la celda. los cepillos de carbono a diferencia de materiales planos como la tela y el papel de carbono incrementan la densidad de potencia (Scott & Yu, 2015).

1.2.1.2 Membrana de intercambio iónico

Las membranas de intercambio iónico son estructuras semipermeables que permiten el paso a los protones generados en la cámara anódica. La estructura molecular de la membrana facilita la absorción y transporte selectivo de iones con carga positiva inmovilizando los iones con carga negativa (Condori *et al.*, 2019).

Algunos tipos de membranas utilizadas en las celdas de combustible microbianas son Nafion y Aquion, las cuales son membranas fuertes y se mantienen estables en entornos oxidativos y reductores lo que los hace un material útil para el armado de las celdas, además poseen propiedades interesantes como su alta conductividad y durabilidad.

Las membranas a base de etileno tetrafluoroetileno (ETFE) o del co-polímero Polifluoruro de Vinilideno (PVDF) tienen una alta conductividad y son resistentes, pero se degradan más rápido en comparación con las otras membranas, sin

embargo, estas membranas tienen un costo menor en comparación con la membrana comercial Nafion.

Las membranas a base de α,β,β -trifluoroestireno tienen un excelente rendimiento y una excelente durabilidad, este tipo de membranas puede remplazar a las membranas de Nafion por ser de menor costo, sin embargo, son necesarias más investigaciones para evaluar su desempeño en diferentes sistemas (Scott & Yu, 2015).

1.2.1.3 Bacterias exoelectrógenas

Las bacterias exoelectrógenas son un tipo de bacteria capaz de transportar electrones fuera de su pared celular, estas bacterias pueden seguir dos rutas metabólicas diferentes: fermentación y respiración celular, en la Figura 1.3 se muestra el proceso bioeletrogénico en una CCM. Algunos ejemplos de bacterias exoelectrógenas son *firmiutes*, *bproteobacteria*, *bacteroidetes*, entre otros, que son utilizadas comúnmente en las CCM.

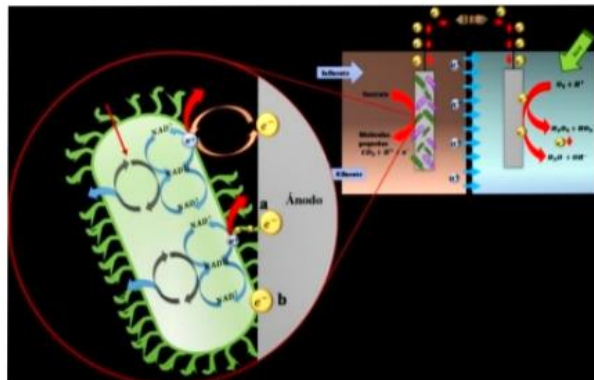


Figura 1.3. Proceso bioeletrogénico en una celda de combustible microbiana (Rosero *et al.*, 2019)

Las bacterias involucradas en la transferencia de electrones transforman los desechos orgánicos derivados de las celdas y así mismo se produce un intercambio de electrones debido a la oxidación por la interacción de las bacterias que viven en el sustrato.

Las bacterias exoelectrógenas se clasifican como electricígenos (microorganismos que oxidan completamente los compuestos orgánicos a dióxido de carbono), anodófilos (bacterias electroquímicamente activas) y exoelectrógenos (bacterias generadoras de electrones (Scott & Yu, 2015).

1.2.1.4 Sustrato o materia orgánica

En las CCM comúnmente se utiliza acetato como sustrato por la facilidad que tienen los microorganismos para metabolizarla, además de materia orgánica residual y composta. El sustrato cumple la función de dar soporte a las bacterias que se encuentran en el sistema y ser el medio donde ocurren las reacciones, algunas CCM utilizan aguas residuales por su alto contenido de materia orgánica, con la intención de producir energía y depurar aguas contaminadas. El sustrato es un factor importante en las CCM ya que es la fuente de nutrientes a utilizar por parte de los microorganismos, además de afectar a la comunidad bacteriana presente en el sistema (Bonilla, 2018).

1.2.2 Tipos de celdas de combustible microbianas

Existe una variedad de celdas de combustible galvánicas y electrolíticas que se desprenden de la CCM convencional, por ejemplo, la Celda de Combustible Microbiana Vegetal (CCMV) que utiliza la captación de la energía solar por parte de las plantas para generar energía durante su metabolismo fotosintético. Otro sistema secundario es la Celda de Combustible Microbiana adaptada a un Humedal Artificial (CW-MFC, por sus siglas en inglés), en donde se utilizan humedades artificiales para generar energía. Esta tecnología es una combinación de un sistema de tratamiento de agua residual y una celda galvánica que busca generar energía eléctrica. La idea principal de la CW-MFC es resolver dos problemáticas de manera simultánea; contaminación del agua y la producción sustentable de energía (Rosero *et al.*, 2019).

Las Celdas de Electrólisis Microbiana (CEM) son dispositivos que requieren de un suministro de energía para generar las reacciones dentro de la cámara catódica,

los electrodos producidos en el ánodo se unen con los protones en la cámara catódica para producir hidrógeno bi-molecular de alta pureza (Rosero *et al.*, 2019).

1.2.3 Importancia y aplicación

La CCM como una tecnología emergente para la generación de energía sustentable y la depuración de contaminantes orgánicos tiene un gran potencial, ya que la energía generada se puede almacenar en dispositivos electrónicos y aprovechar para dispositivos de baja demanda. Las CCM no generan subproductos durante su operación, por lo cual se considera una tecnología sustentable para generar energía en comparación con los métodos convencionales (Molina *et al.*, 2017). La investigación en este campo ha avanzado considerablemente en los últimos años, mostrando mejoras en su eficiencia y configuraciones. De acuerdo con Molina (*et al.*, 2017), algunas de las ventajas de las CCM son: Proveer energía limpia, son inagotables y competitivas, no producen gases de efecto invernadero ni emiten gases contaminantes al medio ambiente, y su desarrollo es esencial en el combate contra el cambio climático y limita los efectos que este tiene en el planeta.

1.3. Celda de combustible microbiana vegetal

Las CCMV's son sistemas que utilizan plantas para producir energía a través de su ruta fotosintética, en donde los electrones producidos durante su proceso de anabolismo son captados. El proceso de fotosíntesis utiliza energía solar, dióxido de carbono, minerales y el agua. La eficiencia del proceso fotosintético depende de la ruta fotosintética que tenga la planta, así como de los factores bióticos-abióticos en los cuales se desarrolla la planta. Las CCMV's han sido estudiadas en los últimos años teniendo como variables el tipo de planta, materiales de electrodo, bacterias, arreglo electroquímico, entre otras, mostrando un gran potencial para la generación de energía (Ramírez, 2023).

1.3.1 Componentes de la celda vegetal

Para las CCM's es fundamental tener una planta con ruta fotosintética C3 o C4 además de contar con dos electrodos fabricados con materiales conductores y biocompatibles. El ánodo debe tener propiedades conductoras para facilitar la transferencia de electrones como por ejemplo el acero o electrodos a base de carbono (Fernández, 2021). El cátodo debe tener una gran capacidad de conductividad eléctrica ya que es el que acepta los electrones que transfiere el ánodo, además contar con un circuito externo. La Figura 1.4 muestra los componentes que lleva una celda de combustible vegetal (Galarza, 2021).

La tierra que es utilizada en las celdas vegetales debe contener materia orgánica para que las bacterias existentes en el suelo la descompongan y se produzcan los electrones libres, los cuales son captados por el ánodo del sistema y posteriormente enviados al cátodo a través de un sistema eléctrico.

En el caso de las CCMV's, el rizoma de las plantas y el material de relleno funcionan como una membrana de intercambio separando el ánodo y el cátodo. Para cerrar el circuito es necesario una resistencia que conecte el ánodo y el cátodo, la cual se adapta mediante alambre o algún material conductor con terminales positiva y negativa (Maddalwar *et al.*, 2021).

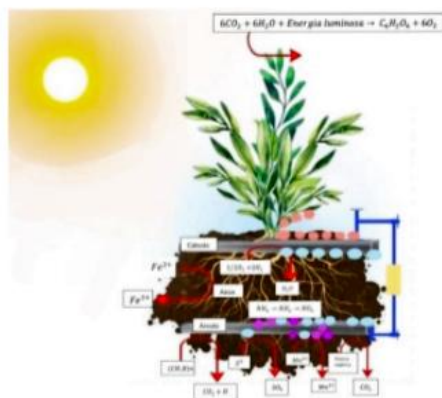


Figura 1.4. Componentes de una celda de combustible microbiana vegetal

1.3.2 Plantas utilizadas

Una de las características más importantes para la selección de la planta es su ruta fotosintética y la tolerancia a los electrodos metálicos y a los contaminantes que pueden existir en la tierra. Las plantas con ruta fotosintética C3 más utilizadas en las CCMV son el trigo, la cebada y el tomate mientras que las plantas C4 se distinguen maíz y el amaranto.

a) *Agapanthus africanus*

Los *Agapanthus* se desarrollan óptimamente a una temperatura desde 10 °C hasta los 21 °C, esta plantas también se adaptan a las heladas soportando temperaturas de hasta -15 °C. Esta especie requiere estar bajo sol directo sin embargo en la época invernal no es necesaria la luz directa lo que la hace adaptable a cualquier clima. Estas plantas tienen una ruta fotosintética C4, es una especie que pertenece a la familia de las Liliáceas y es originaria de Sudáfrica, aunque hoy se encuentra en muchas partes del mundo. Estudios previos han demostrado el uso de esta planta para la generación de voltaje a través de CCMV (Nunes *et al.*, 2023)

b) *Dietes iridioides*

Los *Dietes iridioides* son plantas que se adaptan a climas desde cálido hasta húmedo, las cuales tienen un crecimiento rápido y tienen la capacidad de tolerar el sol de manera directa. Los *Dietes iridioides* crecen hasta 70 cm con una floración en pequeñas flores blancas y una ruta fotosintética C3 (Martínez, 2022). Esta planta es originaria de Etiopía, proviene de la familia *Iridaceae*, puede tolerar desde ligeras heladas hasta temporadas de sequía además de tener la capacidad de adaptarse a cualquier tipo de suelo. Este tipo de planta ha sido escasamente utilizada en CCMV, por lo que representa un área de oportunidad interesante para la generación de conocimiento.

1.3.3 Factores que afectan la eficiencia de la CCMV

En la CCMV existen diversos factores que afectan la eficiencia de la celda, los cuales pueden ser bióticos o abióticos. La poca exposición a la radiación solar afecta significativamente la eficiencia de la celda debido a que es la fuente de energía que será transformada en energía química mediante su proceso fotosintético. Otro factor importante son los electrodos, ya que si estos no son conductores disminuyen la eficiencia electroquímica, además si el electrodo es tóxico para la planta, al estar en contacto con las raíces puede afectar su vitalidad ocasionando la caída de sus hojas y su muerte. El sustrato debe tener los nutrientes suficientes para propiciar el crecimiento de la planta y de las bacterias, además de no tener compuestos tóxicos y contaminantes que afecten la vitalidad de la planta y de la comunidad microbiana ubicada en los rizomas (Revelo *et al.*, 2020).

Las bacterias presentes en la tierra y en la rizosfera tienen un papel importante en la generación de energía ya que estas son responsables de convertir la materia orgánica en electricidad. Los micronutrientes presentes en las celdas de combustible vegetal microbiana son responsables del crecimiento de la planta tanto en su follaje como en las raíces de la planta por lo que se deben considerar como un factor para mejorar su eficiencia.

Finalmente, uno de los parámetros abióticos más importantes es la configuración de la celda, el arreglo serie y paralelo puede aumentar o disminuir la eficiencia electroquímica de la celda, sin embargo, también se puede optimizar utilizando arreglos que favorezcan la densidad de potencia.

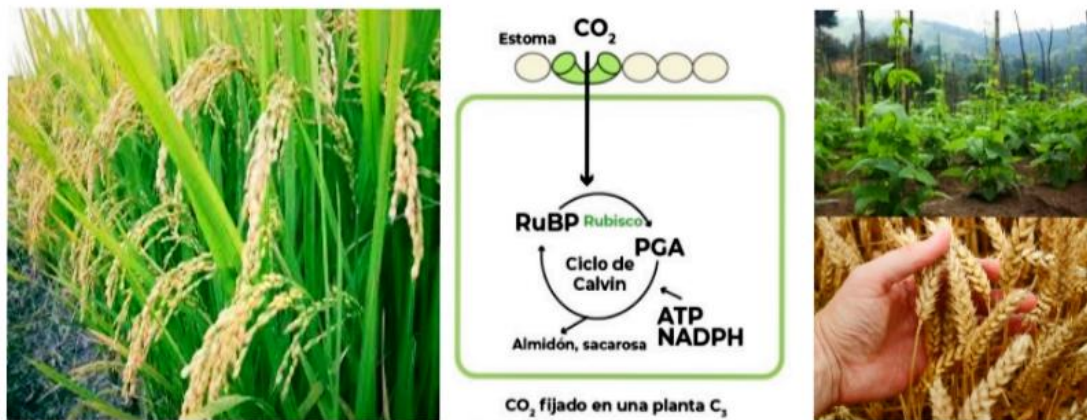
1.4 Rutas Fotosintéticas

Existen 3 rutas fotosintéticas principales; C3, C4 y CAM, cada una recibe estos nombres debido a que, en la segunda fase de la fotosíntesis, en el ciclo de Calvin el ácido fosfoglicérico se transforma en azúcares de 3 y 4 carbonos para las rutas C3 y C4, La ruta fotosintética C4 es una evolución de la ruta C3, que realiza la

captura del dióxido de carbono presente en la atmósfera en dos compartimentos diferentes de la planta (Fernández, 2021)

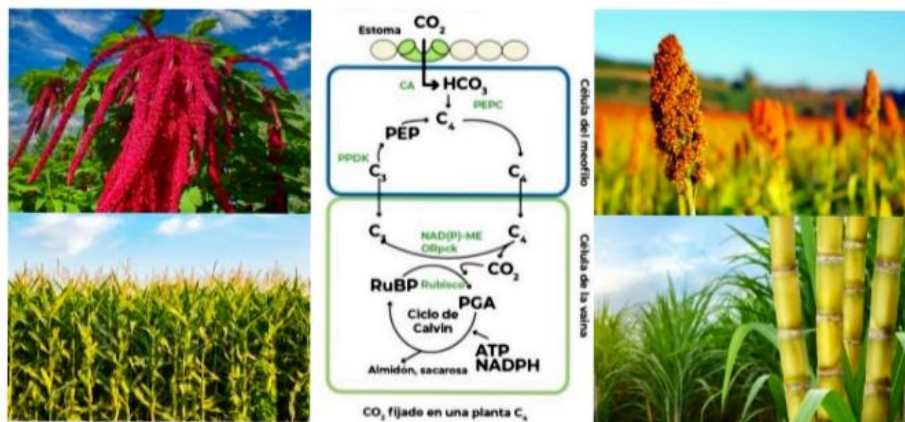
Las plantas con ruta fotosintéticas C3 representan el 80% de las plantas vasculares del mundo. Algunas de las plantas más comunes son: Arroz, trigo, cebada, soya, pimienta, tomate, *Glyceria máxima*, *Oryza sativa*, etc (Figura 1.5). Las plantas C4 (Figura 1.6) son plantas herbáceas y algunas de ellas son cultivadas como el maíz, el sorgo y la caña de azúcar, sin embargo, podemos encontrar especies como *Eichhornia crassipes*, *Bougainvillea*, *Lemna minuta*, *Cyperus alternifolius*, etc.

Las plantas CAM (Figura 1.7) tienen alta capacidad de crecer y sobrevivir a climas cálidos y en condiciones donde escasea el agua, algunas de sus especies representantes son: *Sedum hybridum*, *Sedum kamischaticum*, *Sedum reflexum*, *Sedum rupestre*, *Sedum sexangulare* entre otras. Cabe destacar que estas plantas tienen un crecimiento lento y la producción de biomasa es menor en comparación a las rutas fotosintéticas C3 y C4. Las plantas CAM tienen la facultad de inhibir la fotorrespiración, además de tolerar el estrés hídrico.



PGA (3-fosfoglicérico), RuBP (ribulosa 1,5-bifosfato), ATP (Adenosín Trifosfato), NADPH (Nicotinamida adenina dinucleótido fosfato).

Figura 1.5. Ruta fotosintética C_3 (Modificado de Gómora-Hernández et al., 2024)



HCO (hidratos de carbono), PEP (fosfoenolpiruvato).

Figura 1.6. Ruta fotosintética C_4 (Modificado de Gómora-Hernández et al., 2024)

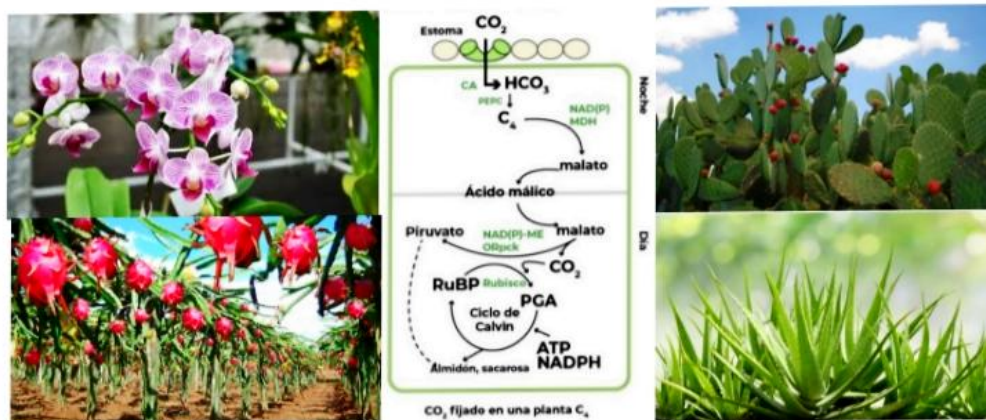


Figura 1.7. Ruta fotosintética CAM (Modificado de Gómora-Hernández et al., 2024)

Capítulo 2.

Desarrollo

Experimental

2. Metodología

Este proyecto se realizó en las siguientes etapas; construcción de las celdas vegetales, evaluación del voltaje y amperaje a circuito abierto, estudio del efecto de las variables experimentales; tipo de electrodo, planta y arreglo serie-paralelo, así como la construcción de las curvas de polarización para la generación de potencia (Figura 2.1)

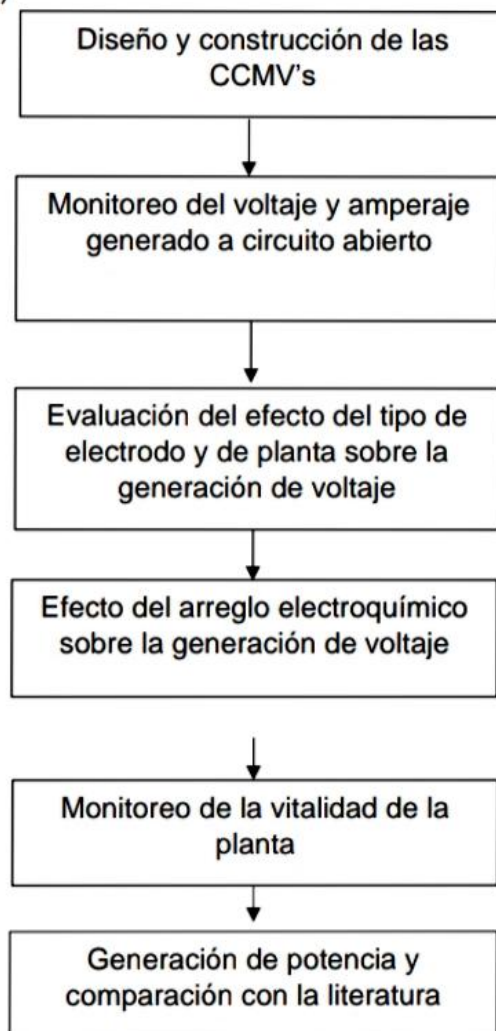


Figura 2.1. Diagrama general de la metodología utilizada en el proyecto

2.1 Diseño y construcción de la CCMV

Para el armado de celdas se realizaron las siguientes actividades: acondicionamiento de la maceta, selección de los electrodos, llenado de la maceta y adecuación de las plantas. La Figura 2.2 resume el proceso de armado de la celda.

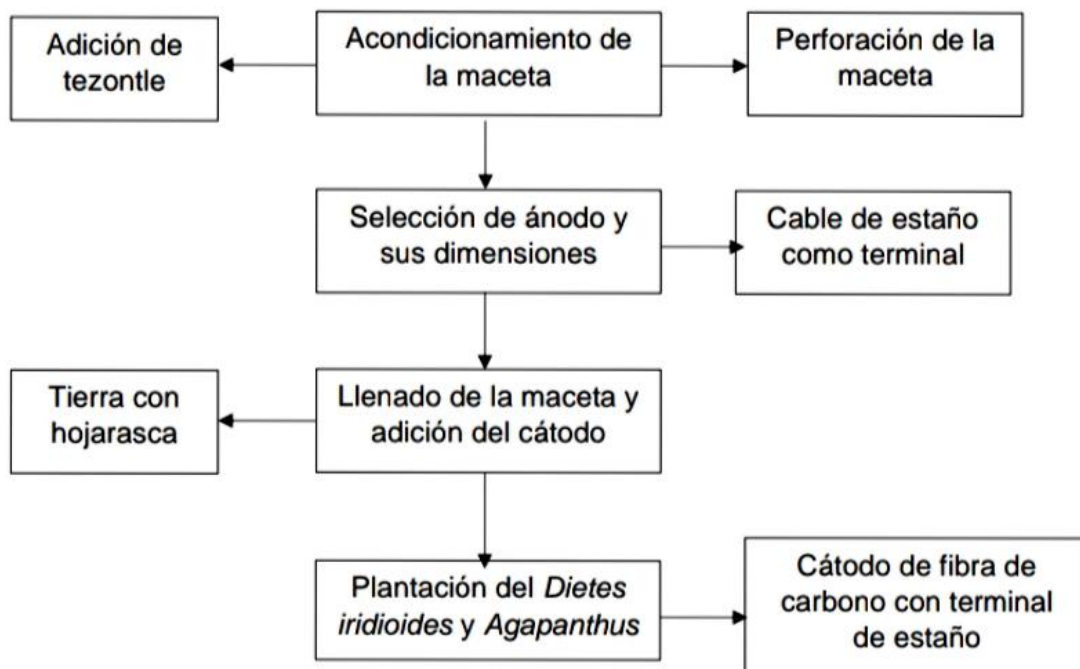


Figura 2.2. Diagrama general para el armado y construcción de las CCMV's

Las CCMV's se construyeron en macetas de 5 litros, en la parte inferior de la maceta se colocó una capa de tezontle para mantener la humedad y garantizar la filtración del agua, posteriormente se hizo una perforación a los 8 cm de altura sobre la base de la maceta con un diámetro aproximado de 0.5 cm, con la finalidad de conectar el ánodo a un cable de estaño que sale de la cubeta y que funciona como la terminal negativa de la celda.

La maceta se llenó hasta la altura del orificio con tierra y hojarasca que se recolectó en un cerro ubicado en el municipio de Santiago Tianguistenco. Seguido

de eso se colocó cable de estaño en el material a utilizar como ánodo y se colocó dentro de la maceta extrayendo el cable hacia afuera por el orificio previamente hecho.

Una vez colocado el ánodo, las raíces de la planta se entrelazaron con él para propiciar mayor área de contacto y se llenó nuevamente con tierra y hojarasca. Por último, se colocó el cátodo de fibra de carbono sobre la tierra y en contacto con el aire atmosférico, terminando así las celdas de combustible en circuito abierto.

2.2 Efecto del tipo de planta

Para evaluar el efecto del tipo de planta sobre la generación de voltaje a circuito abierto se seleccionaron dos especies de planta diferentes: *Dietes iridioides* con ruta fotosintética C3, y *Agapanthus africanus* con mecanismo C4. Las plantas se obtuvieron de jardines exteriores ubicados en los municipios de Tianguistenco y Metepec, Estado de México, respectivamente. Previo a la experimentación, ambas plantas se aclimataron a las condiciones ambientales del municipio de Tianguistenco para garantizar su adaptación al medio y verificar su crecimiento.

Los ánodos se elaboraron con mallas de acero inoxidable con apertura de 0.5 cm, variando sus dimensiones tal y como se especifica en la Tabla 2.1. Adicionalmente, se utilizaron electrodos de alambre de acero inoxidable de 40 y 70 cm de longitud.

Tabla 2.1. Especificaciones del ánodo utilizado en las celdas construidas con *Dietes iridioides* y *Agapanthus*.

Sistema	Material del ánodo	Dimensiones (cm)
Planta 1	Alambre de acero inoxidable	40
Planta 2		40
Planta 3		70
Planta 4		70
Planta 5	Malla de acero inoxidable de 0.5	10 x 10

Cada una de las celdas se ensambló con un cátodo fibra de carbono con dimensiones de 10 x 10 cm y se regó 2 veces por semana, manteniendo así la

humedad dentro de cada celda. Este diseño experimental permitió evaluar el impacto de la especie vegetal sobre la generación de voltaje a circuito abierto.

2.3 Efecto del tipo de electrodo

Para evaluar el efecto del tipo de electrodo sobre la generación de voltaje a circuito abierto se construyeron CCMV's, utilizando *Dietes iridioides* como planta modelo. Para ello se empleó malla de acero inoxidable con diferente apertura y dimensiones como ánodo (Tabla 2.2). El cátodo utilizado fue fibra de carbono de 10 X 10 cm colocado sobre la superficie de la tierra en contacto con el aire. Las celdas se operaron en circuito abierto y en condiciones de intemperismo, adicionando agua 2 veces por semana.

Tabla 2.2. Materiales utilizados para evaluar el efecto del electrodo sobre el voltaje en las celdas construidas con *Dietes iridioides*

Apertura de malla	Dimensiones (cm)
Malla de acero inoxidable con apertura de 0.5 cm	<i>Dietes iridioides</i> 1: 15 x 15
	<i>Dietes iridioides</i> 2 :12 x 12
	<i>Dietes iridioides</i> 3: 10 x 10
	<i>Dietes iridioides</i> 4: 8 x 8
	<i>Dietes iridioides</i> 5: 5 x 5
Malla de acero inoxidable con apertura de 1cm	<i>Dietes iridioides</i> 6: 15 x 15
	<i>Dietes iridioides</i> 7: 12 x 12
	<i>Dietes iridioides</i> 8: 10x 10
	<i>Dietes iridioides</i> 9: 8 x 8
	<i>Dietes iridioides</i> 10: 5 x 5
Malla de fibra de carbono	<i>Dietes iridioides</i> 11: 5 x 5
	<i>Dietes iridioides</i> 12: 10 x 10

La fibra de carbono se seleccionó como cátodo debido a su biocompatibilidad, biodegradabilidad y larga duración. Por otro lado, el acero inoxidable se eligió por su resistencia a la corrosión y bajo costo.

2.4 Efecto del contenido de humedad

Con el objetivo de evaluar la influencia del exceso de agua sobre la producción de voltaje, se construyeron celdas vegetales con la planta *Dietes iridioides*, esto debido a su capacidad para tolerar condiciones de alta humedad. La duración del experimento fue de 11 horas, monitoreando continuamente desde las 09:00 hrs hasta las 20:00 hrs.

Las CCMV's se construyeron con un ánodo a base de acero inoxidable tal y como se muestra en la Tabla 2.3. Para garantizar que el agua no saliera del sistema, el orificio de entrada del ánodo se selló con silicona, y se realizaron pruebas de hermeticidad de manera previa llenado cada una de las macetas con agua.

El sustrato consistió en una mezcla de tierra y agua en una proporción 50:50 en volumen, simulando un humedal lo que permitió mantener humedad en las raíces de la planta y una posible diversificación bacteriana. Este experimento se realizó en el mes de Abril.

Tabla 2.3. Ánodos utilizados para evaluar el efecto de la humedad en celdas de combustible operadas con la planta *Dietes iridioides*

Apertura de malla	Dimensiones (cm)
Malla de acero inoxidable con apertura de 0.5 cm	<i>Dietes iridioides</i> 1: 15 x 15
	<i>Dietes iridioides</i> 2 :12 x 12
	<i>Dietes iridioides</i> 3: 10 x 10
	<i>Dietes iridioides</i> 4: 8 x 8
	<i>Dietes iridioides</i> 5: 5 x 5
Malla de acero inoxidable con apertura de 1cm	<i>Dietes iridioides</i> 6: 15 x 15
	<i>Dietes iridioides</i> 7: 12 x 12
	<i>Dietes iridioides</i> 8: 10x 10
	<i>Dietes iridioides</i> 9: 8 x 8
	<i>Dietes iridioides</i> 10: 5 x 5

2.5 Efecto del arreglo serie – paralelo

En este experimento se evaluó el impacto del arreglo en serie y en paralelo de CCMV's operadas con ambas plantas sobre la generación de voltaje y amperaje a circuito abierto. Para ello, se empleó un total de 12 celdas con *Dietes iridioides* y 6 con *Agapanthus* agrupadas en grupos de 3 tal y como se observa en la Tabla 2.4. Todas las celdas se construyeron utilizando de fibra de carbono textil como cátodo y un ánodo de malla acero inoxidable con apertura de 0.5 cm.

Tabla 2.4. Especificaciones de los ánodos utilizados en el arreglo serie-paralelo

Planta	Sistema en Serie		Sistema en Paralelo	
	Ánodo	Nomenclatura	Ánodo	Nomenclatura
<i>Dietes iridioides</i>	5 x 5 cm	Lserie5	5 x 5 cm	Lparalelo5
<i>Dietes iridioides</i>	10 x 10 cm	Lserie10	10 x 10 cm	Lparalelo10
<i>Agapanthus</i>	10 x 10 cm	Aserie10	5 x 5 cm	Aparalelo5

La configuración en serie se realizó conectando el ánodo de una celda al cátodo de la siguiente, y así sucesivamente hasta conectar 3 celdas. Por otro lado, la configuración en paralelo consistió en conectar entre sí los ánodos y cátodos de las diferentes celdas. El experimento se realizó durante 30 días, monitoreando continuamente la generación de voltaje y amperaje a circuito abierto.

2.6 Generación de potencia y curvas de polarización

Para evaluar la generación de potencia, se monitoreó el amperaje y el voltaje de las celdas con *Dietes iridioides* y *Agapanthus* ensambladas con un ánodo de malla de acero 10 x 10 cm con apertura de 0.5 cm y un cátodo de fibra de carbono de 10 x 10 cm.

La curva de polarización se construyó midiendo los voltajes y amperajes a diferentes resistencias eléctricas en un rango de 1 kΩ hasta 1 MΩ utilizando una caja de resistencias variables EXTECH 380400. La medición comenzó con una resistencia de 1 MΩ, la cual se modificó hasta 100 kΩ con tamaños de paso de 100 kΩ. Posteriormente, se usó un tamaño de paso de 10 kΩ para encontrar los valores de voltaje y amperaje en un rango de 100 a 10 kΩ. La potencia (P) y la Densidad de Potencia (DP) de las celdas se calcularon utilizando las ecuaciones 1 y 2, respectivamente.

$$P = V \cdot I \quad \text{Ec. 1}$$

$$DP = \frac{P}{A} \quad \text{Ec. 2}$$

En donde P es la potencia de la celda en mW, V el voltaje en mV, I el amperaje en mA y DP la densidad de potencia por unidad de área A dada en mW/m². El área del electrodo se calculó con base a su geometría considerando los espacios vacíos de las mallas (0.0036 m²).

Capítulo 3.

Resultados y discusión

Todos los experimentos se realizaron a la intemperie sin alterar el medio en el que se mantenían los sistemas, esto con la finalidad de obtener resultados en condiciones naturales sin ambientes controlados. La duración de los experimentos fue aproximadamente de 30 días y los resultados de amperaje y voltaje se determinaron en μA y mV respectivamente, con un multímetro digital *Uei DL599*.

3.1 Diseño y construcción de la CCMV

La construcción de las CCMV's se realizó utilizando la metodología mostrada en el Figura 3.1. Las plantas *Dietes iridioides* y *Agapanthus africanus* fueron seleccionadas al ser plantas ornamentales con una extensa distribución geográfica y una gran capacidad de adaptación a climas cálidos y húmedos. Las características de estas plantas nos permitieron mantenerlas en condiciones de intemperie y en climas cambiantes ya que la zona en donde se realizaron los experimentos tiene una diversidad de climas que va desde cálido hasta húmedo.



Figura 3.1. Etapas para la construcción de una CCMV

3.2 Efecto del tipo de planta

La Figura 3.2 muestra la generación de voltaje a circuito abierto en las celdas operadas con la planta *Dietes iridioides*. El sistema 1 y 2 con ánodo de alambre de acero de 40 cm, el sistema 3 y 4 con alambre de acero de 70 cm, y el sistema 5 con malla de acero inoxidable de 10 x 10 cm. De los sistemas antes mencionados, el sistema 3 tuvo la mayor producción de voltaje alcanzando los 1800 mV después de 6 días, sin embargo, al día 20, tuvo una caída de voltaje hasta un mínimo de 200 mV.

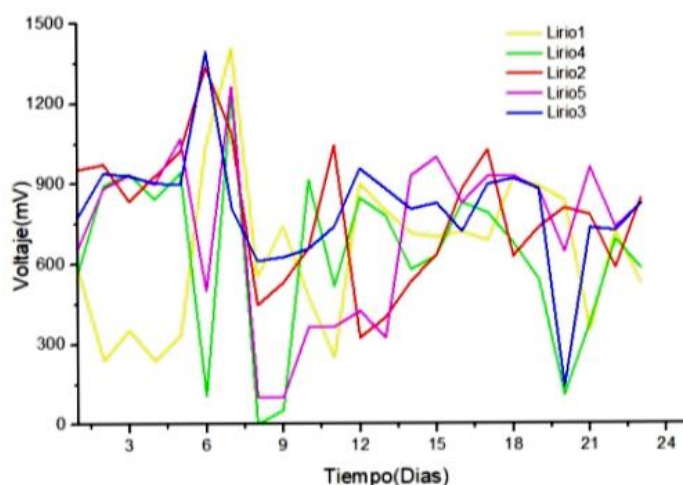


Figura 3.2. Comportamiento del voltaje a circuito abierto en función del tiempo observado en las celdas operadas con *Dietes iridioides*: Sistemas 1, 2, 3, 4 y 5

En la Figura 3.2 se puede apreciar una variación en el voltaje de cada uno de los sistemas. Se observa que las celdas 2 y 3 tuvieron una generación mínima de 200 mV cada uno, pero picos mayores a 1000 mV durante el desarrollo del experimento. El sistema 4 fue el único que no mostró generación de voltaje a los 8 días de operación, sin embargo alcanzó su valor máximo de 1200 mV a los 7 días.

El amperaje generado en los sistemas 1, 2, 3, 4 y 5 se muestran en la Figura 3.3. El sistema 1 comenzó el experimento con 600 μ A, para el segundo día este valor

cayó hasta los 10 μA y así continuó hasta el día 6, en el día 7 alcanzó los 2000 μA . A tiempos posteriores, la generación de amperaje en este sistema osciló entre 0 μA y 300 μA hasta el final del experimento. El resto de las celdas mostró amperajes menores a los 1200 μA , con excepción de la celda 2 que alcanzó 1600 μA después de 6 días.

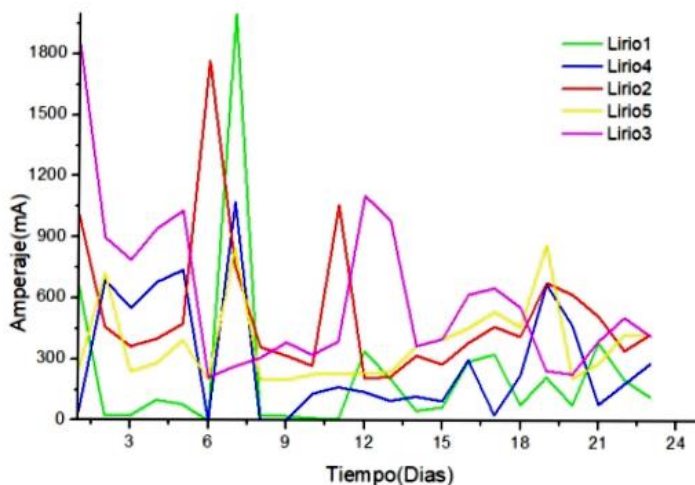


Figura 3.3. Comportamiento del amperaje en función del tiempo observado en las celdas operadas con *Dietes iridioides*: Sistemas 1, 2, 3, 4 y 5

Por otro lado, en la misma Figura se observa que el sistema 5 obtuvo un máximo de 1100 μA en el día 7, manteniendo un rango de 300 μA a 1100 μA durante todo el experimento, por lo cual, se puede concluir que a pesar de no tener valores tan altos fue el sistema que mostró el comportamiento más uniforme. Algunos sistemas alcanzaron valores mayores a los 1500 μA , sin embargo, en días posteriores su amperaje disminuyó considerablemente. La Tabla 3.1 muestra los valores máximos y mínimos de voltaje y amperaje en los sistemas operados con la planta *Dietes iridioides*. Tal y como se observa en dicha Tabla, los voltajes más altos se alcanzaron con los electrodos a base de alambre de acero, sin embargo, parece no haber una diferencia significativa entre el largo de dicho electrodo. Por otro lado, el electrodo de alambre de acero de 70 cm de longitud (sistemas 4) fue el único que mostró valores de 0 V durante la experimentación. El sistema 1 fue el

que alcanzó la máxima generación de voltaje 1400 mV, ligeramente superior al observado en los sistemas operados con electrodos de 70 cm de largo.

Tabla 3.1. Comparación de los valores máximos y mínimos de voltaje y amperaje observados durante la operación de los sistemas 1-5 con la planta *Lirio*

Sistema	Ánodo (cm)	mV Max.	mV min.	μA Max	μA min.
Lirio 1	40 cm	1400	200	1950	0
Lirio 2	40 cm	1320	300	1000	0
Lirio 3	70 cm	1380	150	1800	200
Lirio 4	70 cm	1200	0	1100	200
Lirio 5	10 x 10	1250	100	2000	0

Con respecto a la planta *Agapanthus*, el sistema 1 con ánodo de alambre de acero inoxidable de 40 cm mostró una generación de voltaje de 1400 mV, teniendo un valor mínimo de 0 mV en el día 24 de operación. El sistema 2 operado con las mismas dimensiones de ánodo y cátodo, mostró un máximo de voltaje de 1450 mV y un mínimo 150 mV.

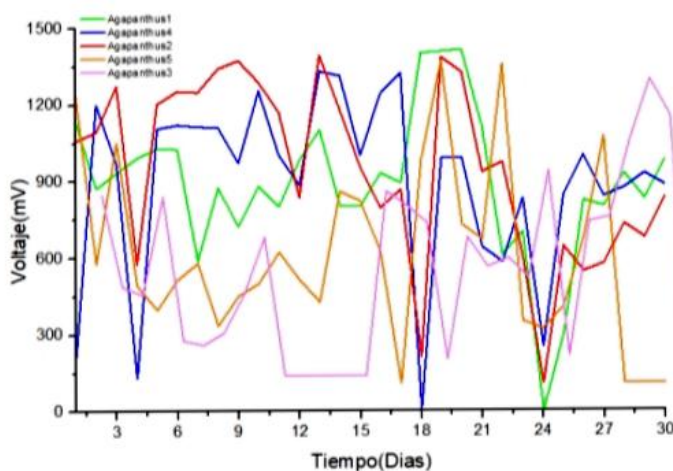


Figura 3.4. Comportamiento del voltaje a circuito abierto en función del tiempo observado en las celdas operadas con *Agapanthus*: Sistemas 1, 2, 3, 4 y 5

El *Agapanthus* 3 con ánodo de 70 cm, mostro una generación máxima de voltaje de 1350 mV con un mínimo de 150 mV a lo largo de los 30 días de experimentación, mientras que el *Agapanthus* 4 que tiene las mismas dimensiones de ánodo que el *Agapanthus* 3 obtuvo un máximo de 1300 mV y un mínimo de 0 mV.

El sistema *Agapanthus* 5 operado con un ánodo de malla de acero inoxidable con dimensiones de 10 x 10 cm y apertura de 0.5 cm, mostró una generación de voltaje máxima de 1450 mV y una mínima de 150 mV, siendo los mismos registros que el *Agapanthus* 2, los ánodos de estos sistemas cambiaron únicamente en las dimensiones. La Figura 3.4 muestra la generación de voltaje en los sistemas operados con la planta *Agapanthus*. Con respecto al amperaje, el sistema 1 generó un máximo de 2000 μ A y un mínimo de 0 μ A. El sistema 2 mostró una máxima generación de corriente de 1800 μ A y una mínima de 200 μ A, el sistema 3 un máximo 1800 μ A y un mínimo de 150 μ A, mientras que el sistema 4 tuvo una máxima generación de 1650 μ A y una mínima de 0 μ A durante los 30 días en que se realizó el experimento. El sistema *Agapanthus* 5 obtuvo una máxima de 1200 μ A y una mínima de 200 μ A. En la Tabla 3.2 se resume la generación máxima y mínima de voltaje y amperaje observada en los sistemas operados con *Agapanthus*.

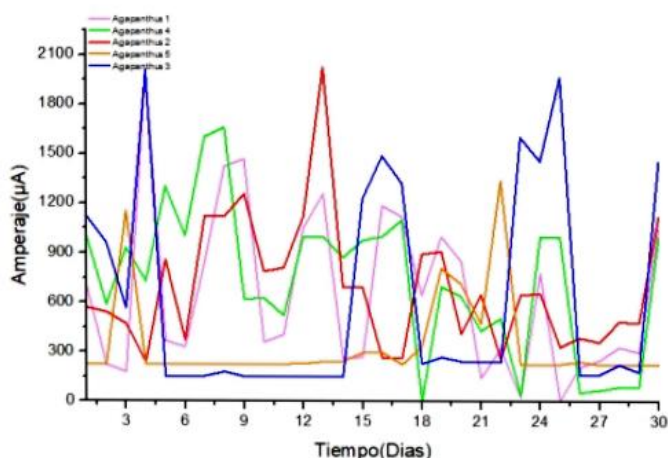


Figura 3.5. Comportamiento del amperaje en función del tiempo observado en las celdas operadas con *Agapanthus*: Sistemas 1, 2, 3, 4 y 5

Tabla 3.2. Comparación de los valores máximos y mínimos de voltaje y amperaje observados durante la operación de los sistemas 1-5 con la planta *Agapanthus*

Sistema	Ánodo (CM)	mV Max.	mV min.	μA Max	μA min.
<i>Agapanthus</i> 1	40	1400	0	2000	0
<i>Agapanthus</i> 2	40	1450	150	1800	200
<i>Agapanthus</i> 3	70	1350	150	1800	150
<i>Agapanthus</i> 4	70	1300	0	1650	0
<i>Agapanthus</i> 5	10 x10	1450	150	1200	200

La mayor generación de voltaje (1450 mV) se observó en los sistemas 2 y 5 operados con un ánodo de alambre de acero inoxidable de 40 cm y malla de acero, respectivamente. Los sistemas con ánodo de alambre de acero de 70 cm mostraron las menores generaciones de voltaje (1350 mV), sin embargo, no hay una diferencia significativa en los valores obtenidos con todos los sistemas. La diferencia más grande se observó en el amperaje, en donde el sistema 1 alcanzó la mayor generación y el sistema 5 la más baja. A pesar de que los voltajes máximos determinados con ambas plantas fueron similares, los sistemas operados con *Agapanthus* tuvieron mayor estabilidad oscilando en su mayoría entre los 900 y los 1200 mV, a diferencia de la planta *Dietes iridioides* en donde se observó predominancia entre los 600 y 900 mV. Este comportamiento sugiere que la planta *Agapanthus* con ruta fotosintética C4 tiene mayor eficiencia para la generación de voltaje a circuito abierto.

3.3 Efecto del tipo de electrodo

Para evaluar el tipo de electrodo sobre la generación de voltaje a circuito abierto se construyeron 12 sistemas utilizando la planta *Dietes iridioides* con diferente ánodo tal y como se resume en la Tabla 2.2.

De los sistemas mostrados en la Figura 3.6 el que generó el mayor voltaje fue *Dietes iridioides* 3 operado con un ánodo de 10 x 10 cm en malla de acero inoxidable con apertura de 0.5 cm, alcanzando un máximo de 2000 mV durante la experimentación. Este sistema mostró un mayor voltaje comparado con los sistemas 1, 2, 4 y 5, con excepción del día 18 en donde alcanzó su menor voltaje

(400 mV). El sistema *Dietes iridioides* 2 (ánodo de 12 x 12 cm con apertura de 0.5 cm) tuvo una generación de voltaje baja durante los 30 días del experimento, mostrando un máximo de 1100 mV a los 29 días de operación.

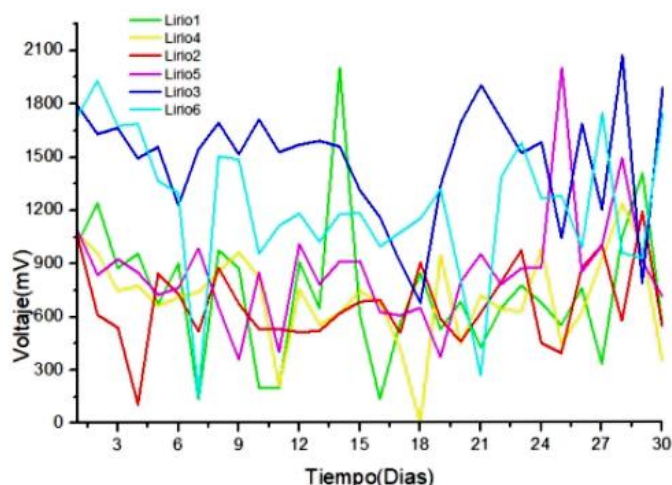


Figura 3.6. Comportamiento del voltaje a circuito abierto utilizando diferente tipo de electrodo en las celdas operadas con *Dietes iridioides*: Sistemas 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

En la Figura 3.7 se observan los sistemas 11 y 12 contruidos con ánodo de fibra de carbono. El sistema 11 (5 x 5 cm) alcanzó un máximo de 800 mV, teniendo caídas en el voltaje hasta los 0 mV, mientras que el sistema 12 con ánodo de 10 x 10 alcanzó un máximo de 1300 mV y un mínimo de 120mV.

El sistema *Dietes iridioides* 10; ánodo de 5 x 5 cm en malla de acero inoxidable con apertura de 1 cm, alcanzó el voltaje más alto con 1300 mV, el cual se mantuvo en un rango similar durante los 30 días de experimentación. Lo anterior muestra que los electrodos a base de acero tienen mayor potencial para captar electrones en comparación con los contruidos a base de fibra de carbono.

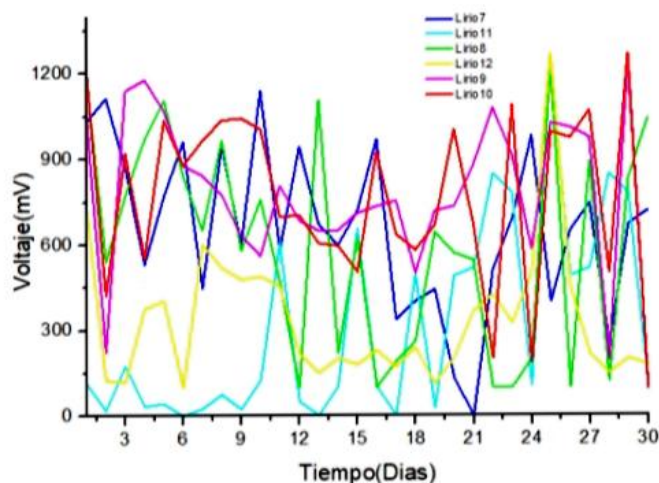


Figura 3.7. Comportamiento del voltaje a circuito abierto utilizando diferente tipo de electrodo en las celdas operadas con *Diates iridioides*: Sistemas 7, 8, 9, 10, 11 y 12.

Con respecto al amperaje, el sistema con mayor generación fue el 10 quién alcanzó 2100 μA después de 25 días de operación, sin embargo, a diferentes tiempos su valor disminuyó hasta los 300 μA . El sistema con menor generación fue el 12 operado con un ánodo de fibra de carbono de 12 x 12 cm, el cual registró 750 μA con una mínima de 150 μA (Figuras 3.8 y 3.9).

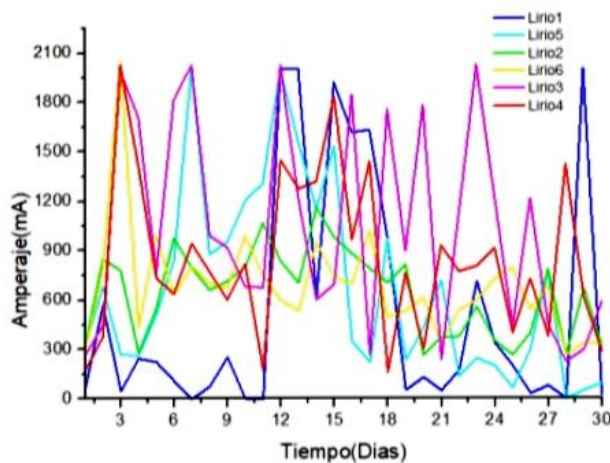


Figura 3.8. Comportamiento del amperaje utilizando diferente tipo de electrodo en las celdas operadas con *Diates iridioides*: Sistemas 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

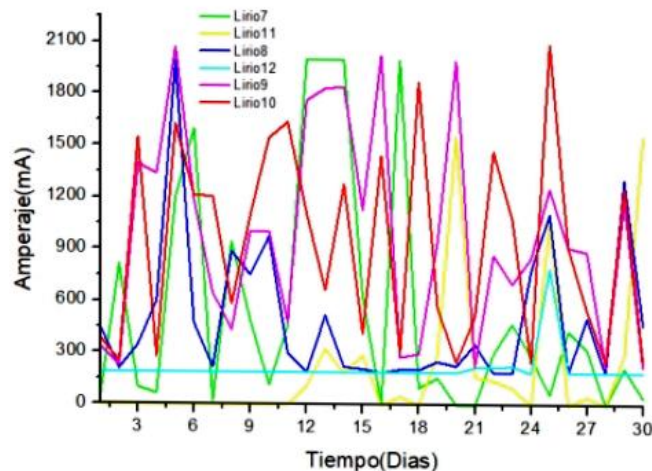


Figura 3.9. Comportamiento del amperaje utilizando diferente tipo de electrodo en las celdas operadas con *Dietes iridioides*: Sistemas 7, 8, 9, 10, 11 y 12.

En la Tabla 3.3 se muestran los valores máximos y mínimos tanto del voltaje como del amperaje obtenido durante la experimentación. Tal y como se observa, los sistemas operados con un ánodo de malla de acero con apertura de 0.5 cm fueron los más eficientes para generar voltaje, mostrando un máximo de 2050 mV con el electrodo de 10 x 10 cm. Los electrodos a base de acero con apertura de 1 cm alcanzaron voltajes similares al observado con fibra de carbono de 10 x 10 cm, sin embargo, estos valores fueron considerablemente menores a los observados con malla de acero de 0.5 cm. Los electrodos a base de acero inoxidable con abertura pequeña son más aptos para la captación electrones en comparación con aquellos de mayor apertura y los de fibra de carbono. Respecto al amperaje no se observó una diferencia importante en los valores máximos de generación, excepto para las celdas construidas con fibra de carbono textil, en donde los valores máximos fueron de 1500 y 750 μ A para los sistemas Lirio 11 y Lirio 12, respectivamente. Esto sugiere que el material del electrodo tiene un impacto importante sobre el amperaje de la celda.

Tabla 3.3. Voltajes y amperajes obtenidos con diferentes materiales de ánodo

sistema	Ánodo (cm)	mV Max.	mV min.	μ A Max	μ A min.
Lirio 1	15 x 15	1950	150	2000	0
Lirio 2	12 x 12	1150	100	2000	300
Lirio 3	10 x 10	2050	650	1950	250
Lirio 4	8 x 8	1200	0	2000	150
Lirio 5	5 x 5	1950	320	1900	0
Lirio 6	15 x 15	1930	150	2000	300
Lirio 7	12 x 12	1100	0	1950	0
Lirio 8	10 x 10	1200	150	1970	150
Lirio 9	8 x 8	1150	150	2050	200
Lirio10	5 x 5	1250	100	2100	200
Lirio11	5 x 5	800	0	1500	0
Lirio 12	10 x 10	1300	120	750	150

3.4 Efecto del contenido de humedad

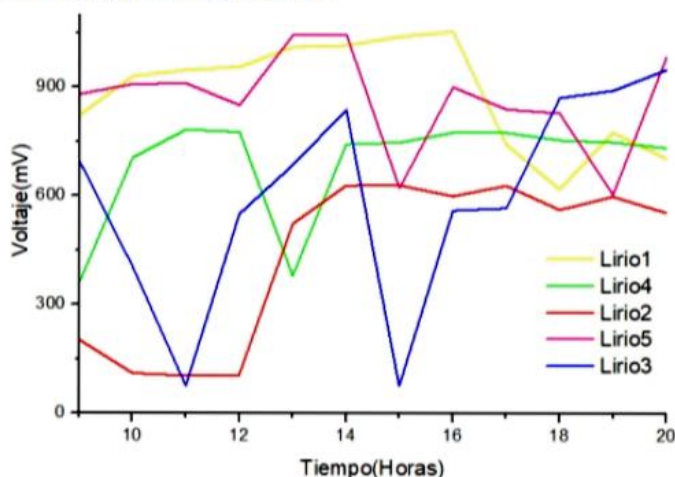


Figura 3.10. Comportamiento del voltaje a diferentes horas del día observado en las celdas operadas con *Dietes iridioides*: Sistemas 1, 2, 3, 4 y 5

En este experimento tuvo una duración de 10 horas donde se monitoreo continuamente los lirios del 1-5 cada hora, cómo se observa en la Figura 3.10. El sistema que mejor generación de voltaje mostro fue el sistema con lirio 5, que alcanzo 1400mV como máximo entre la 1:00pm y 2:00pm, para la siguiente hora bajo a solo 900mV, siendo este el rango mínimo de este sistema.

Por otro lado, el sistema lirio 3, registro dos caídas de voltaje durante la experimentación, teniendo suceso en la hora 11:00 y 15:00, donde el voltaje fue solo de 100mV. Sin embargo, el sistema lirio 4, el voltaje mínimo que se registró fue de 350 mV y del mismo sistema el registro máximo 800mV por lo que no tiene picos altos /bajos excesivos.

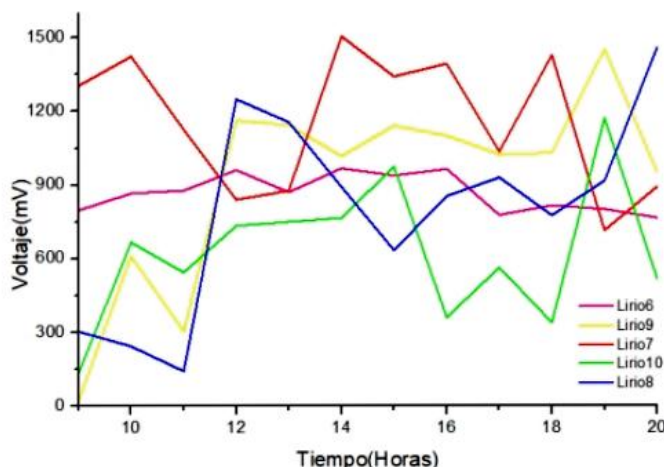


Figura 3.11. Comportamiento del voltaje a diferentes horas del día observado en las celdas operadas con *Dietes iridioides*: Sistemas 6, 7, 8, 9 y 10

En el sistema lirio 7 podemos observar un máximo de 1400 mV como se muestra en la Figura 3.11, así mismo un mínimo de 700 mV manteniendo ese rango de voltaje durante todo el experimento, por otro lado, el sistema lirio 9 comenzó con un voltaje de 37.5 y continuó ascendiendo hasta las 17:00 alcanzo su máximo con 1400mV

Observamos que el sistema lirio 10 fue el que menor generación de voltaje en comparación a los otros sistemas mostrados en la misma figura teniendo un rango de 150 mV a 1000 mV, aunque el sistema 9 obtuvo la menor generación de voltaje al inicio del experimento, este mismo sistema elevo su voltaje con forme avanzaba

el experimento mientras el que sistema lirio 10 se mantuvo su rango por que se determinó como el sistema que más bajo rendimiento tuvo.

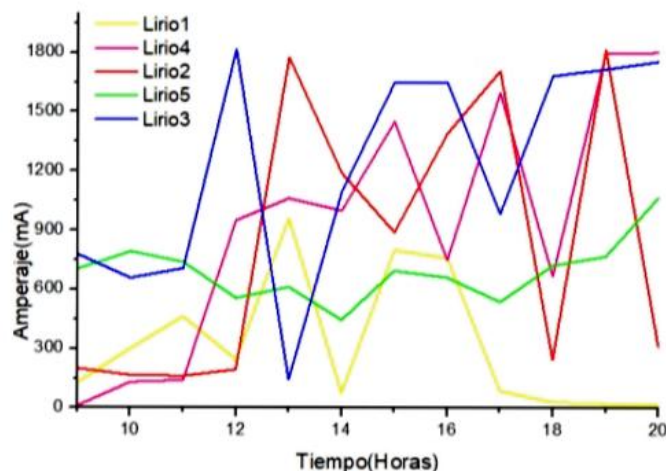


Figura 3.12. Comportamiento del amperaje a diferentes horas del día observado en las celdas operadas con *Dietes iridioides*: Sistemas 1, 2, 3, 4 y 5

En el sistema lirio 3 comenzó con 650 μ A a las 9:00hrs como se muestra en la Figura 3.12, así mismo a las 12:00hrs se elevó su voltaje a 1500 μ A sin embargo entre la 12:00hrs y 13:00hrs el sistema experimento una inestabilidad que provoco una caída de 1500 μ A a solo 200 μ A, esta caída puede estar relaciona al alto voltaje que se presentó en los sistemas en este tiempo.

Así mismo en la Figura 3.12 nos muestra el sistema lirio 5 visiblemente más contante a comparación de los demás sistemas, con un rango de 400 μ A a 700 μ A y teniendo a las 20:00 horas su voltaje máximo alcanzado durante el experimento, llegando a los 800 μ A

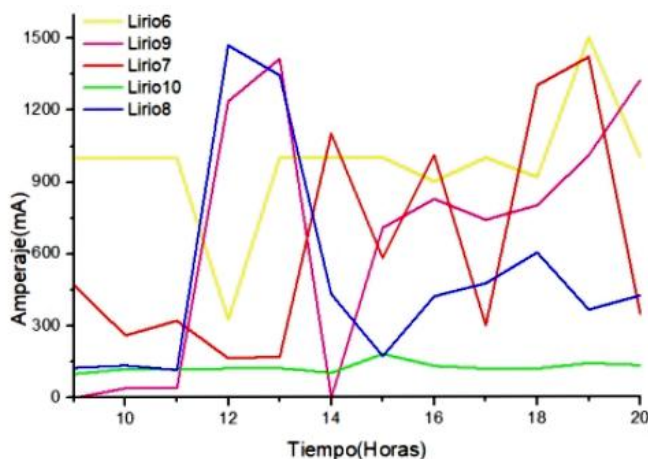


Figura 3.13. Comportamiento del amperaje a circuito abierto en función del tiempo observado en las celdas operadas con *Dietes iridioides*: Sistemas 6. 7. 8. 9 y 10

De los sistemas 6, 7, 8, 9 y 10 que podemos observar en la Figura 3.13. El sistema lirio 8 alcanzó 1500 μA como máximo a las 12:00 horas para continuar a las 15:00 hrs tener una disminución en la generación de amperaje generando solamente 200 μA . Sin embargo, el sistema lirio 6 comenzó en el día 1 con 1000 μA , manteniéndose constante hasta las 11 horas, para después sufrir una caída de amperaje a las 12:00 horas. Teniendo este mismo sistema una máxima de 1500 μA a las 19:00 horas.

Por otro lado, el sistema con menor generación de amperaje a comparación de los demás sistemas mostrados en la Figura 3.13, es el sistema lirio 10 manteniendo un amperaje que oscilaba entre los 100 y 200 durante las 10:00 horas de operación en las que se llevó a cabo el experimento.

Tabla 3.4. Voltajes y amperajes máximos determinados durante un día de operación

# de planta	Ánodo (cm)	mV Max.	mV min.	μ A Max	μ A min.
Lirio 1	15 x 15	1100	700	900	0
Lirio 2	12 x 12	900	150	1400	100
Lirio 3	10 x 10	1300	100	1300	100
Lirio 4	8 x 8	800	400	1600	0
Lirio 5	5 x 5	1400	900	800	400
Lirio 6	15 x 15	1000	750	1300	400
Lirio 7	12 x 12	1400	700	1400	200
Lirio 8	10 x 10	1400	150	1500	100
Lirio 9	8 x 8	1400	0	1400	0
Lirio 10	5 x 5	1100	150	190	100

3.5 Efecto del arreglo serie – paralelo

El sistema Lparalelo5 operado con ánodo de 5 x 5 cm mostró un voltaje inicial de 950 mV, posteriormente se mantuvo en un rango de 650 a 1600 mV hasta el día 15, donde sufrió una caída hasta los 150 mV. En cambio, el sistema Lserie5 mostró mayor inestabilidad en la generación de voltaje durante los primeros 15 días de operación, este sistema mostró voltajes en un rango de 500 mV a 1300 mV durante la mayor parte del experimento, sin embargo, alcanzó valores máximos cercanos a 2000 mV a los 7 y 11 días (Figura 3.14).

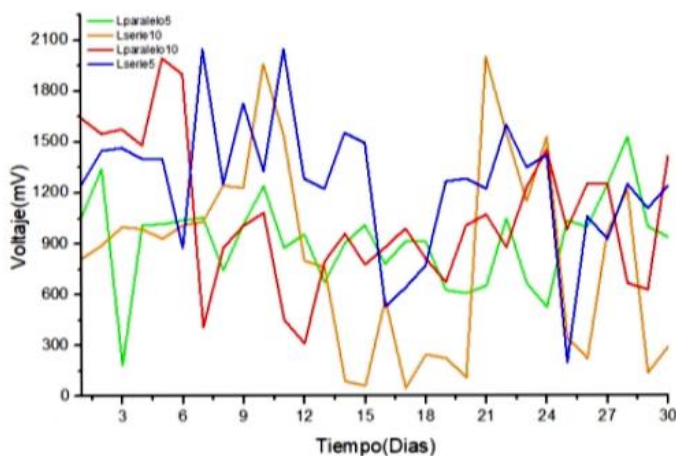


Figura 3.14. Generación de voltaje a circuito abierto en los sistemas en serie y paralelo operados con la planta *Dietes iridioides*

El sistema Lserie10 (ánodo de 10 x 10 cm) comenzó el día 1 con 1650 mV, valor que aumentó hasta el día 12 en donde mostró una caída hasta los 400 mV. Del día 14 al día 20 el rango de voltaje osciló entre los 300 y 1000 mV. Finalmente, el sistema Lparalelo10 mostró la menor producción de voltaje ya que durante la mayoría del experimento su voltaje osciló entre 300 y 1500 mV.

Tal y como se observa en la Figura 3.14, los sistemas operados en serie alcanzaron valores más altos en el voltaje en comparación con los sistemas en paralelo, siendo el sistema operado con un electrodo de 5 x 5 el más prometedor (Lserie5).

Con respecto al amperaje, el sistema Lparalelo5 generó el menor amperaje teniendo como máximo 450 y un mínimo de 100 μ A, mientras que la celda Lserie5 mostró una mejor generación con un máximo de 850 μ A y un mínimo de 100 μ A. En la Figura 3.15 se observa la generación de amperaje en los sistemas conectados en paralelo y en serie y operados con la planta *Dietes iridioides*.

Por otro lado, la celda Lserie10 tuvo un amperaje máximo de 850 μ A y un amperaje mínimo de 100 μ A en el día 26, mientras que el sistema Lparalelo10 inició el experimento con 100 μ A, en el día 2 comenzó a subir su amperaje hasta alcanzar un máximo de 900 μ A. En los días siguientes se mantuvo en un rango de 500 a 200 μ A hasta el día 9, para después disminuir la corriente en un rango de 150 μ A a 500 μ A. Finalmente, el sistema Lparalelo10 mostró la mayor generación de amperaje alcanzando los 900 μ A (Figura 3.15).

La generación de voltaje en las celdas conectadas en serio y paralelo con la planta *Agapanthus africanus* se muestra en la Figura 3.16. El sistema en serie alcanzó un máximo de 2000 mV y una generación mínima de 800 mV, manteniendo ese rango durante los 30 días de experimentación.

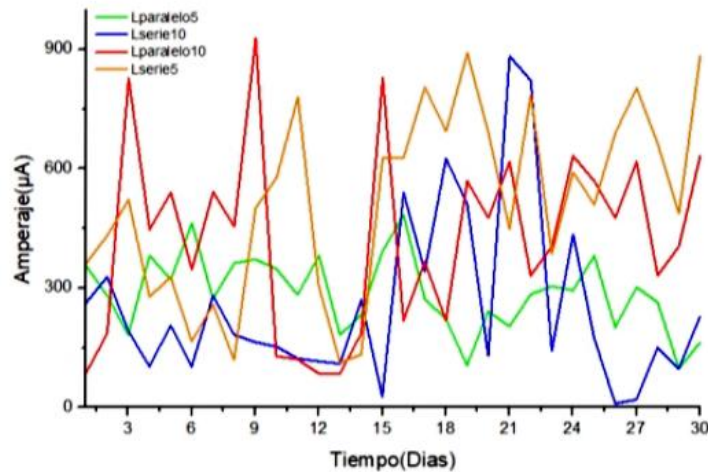


Figura 3.15. Generación de amperaje en los sistemas en serie y paralelo operados con la planta *Dietes iridioides*

Por otro lado, las celdas conectadas en paralelo mostraron un voltaje inicial de 1800 mV y un máximo de aproximadamente 1950 mV. Este mismo sistema sufrió una caída de voltaje en el día 9 llegando hasta los 200 m, el cual fue su valor mínimo. A días posteriores el voltaje osciló entre 1600 y los 400 mV hasta el término del experimento. El sistema en serie demostró mejores resultados en la generación de voltaje en comparación con el sistema en paralelo.

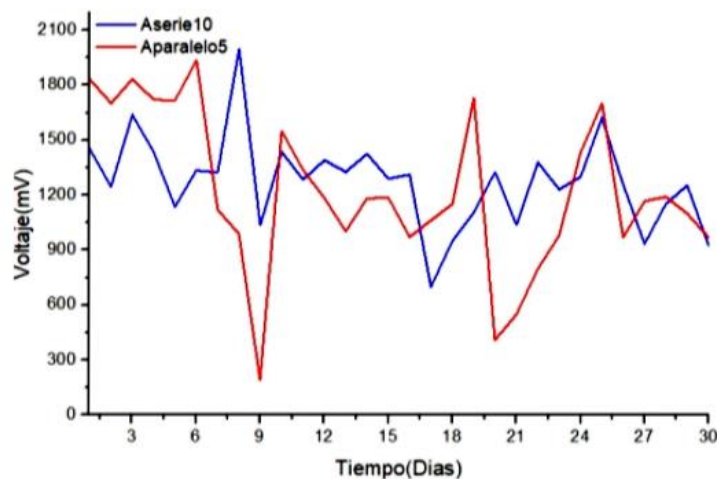


Figura 3.16. Generación de voltaje a circuito abierto en los sistemas en serie y paralelo operados con la planta *Agapanthus africanus*

El amperaje determinado en el sistema en serie se mantuvo casi constante durante los 30 días de operación, dentro de un rango de 150 a 350 μA . Mientras que la conexión en paralelo mostró más variaciones desde el día 1 (350 μA), disminuyendo hasta el día 7 (200 μA) y manteniendo un comportamiento inestable durante los siguientes días. El valor máximo se observó en el día 15 con 900 μA (Figura 3.17).

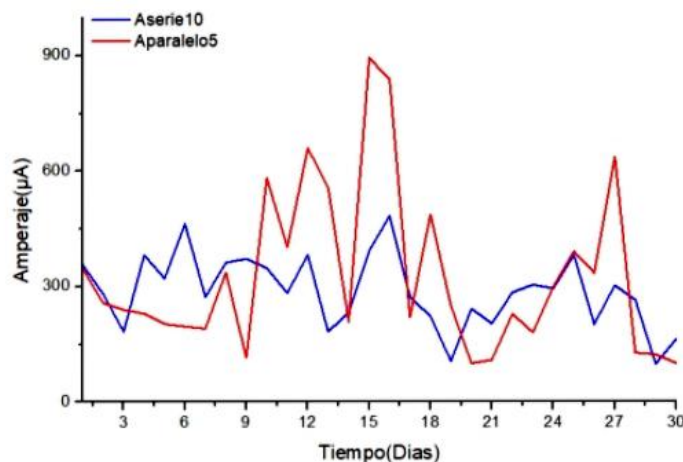


Figura 3.17. Generación de amperaje en los sistemas en serie y paralelo operados con la planta *Agapanthus africanus*

Aunque la conexión en paralelo nos facilitar la obtención de amperaje y obteniendo niveles altos, no se mantuvo en un rango constante durante los 30 días de operación. En la Tabla 3.5 resume las gráficas mostradas con anterioridad.

Tabla 3.5. Voltajes y amperajes máximos y mínimos obtenidos en los sistemas en serie y paralelo con las plantas *Dietes iridioides* y *Agapanthus africanus*

Sistema	Ánodo (cm)	mV Max.	mV min.	μA Max	μA min.
Lirio (Serie)	5X5 (0.5)	2000	150	850	100
Lirio (Serie)	10x10 (0.5)	1950	100	850	0
Lirio (Paralelo)	5X5 (0.5)	1500	200	450	100
Lirio (paralelo)	10x10 (0.5)	1950	300	900	100
Agapanthus (paralelo)	5X5 (0.5)	1950	700	450	100
Agapanthus (serie)	10 x 10(0.5)	1900	150	880	100

3.6 Generación de potencia y curva de polarización

Para la generación de las curvas de polarización se construyeron celdas vegetales con ánodos de malla de acero de 10 x 10 cm y un cátodo de fibra de carbono textil, colocadas en ambiente de intemperismo.

La Figura 3.18 muestra la curva amperaje-voltaje y la curva de polarización de una celda de combustible vegetal operada con la planta *Dietes iridioides*. La densidad de potencia máxima fue de $133.73 \text{ mW} / \text{m}^2$ obtenido con una resistencia eléctrica de $300 \text{ k}\Omega$ y con una densidad de corriente de 0.0014 mA .

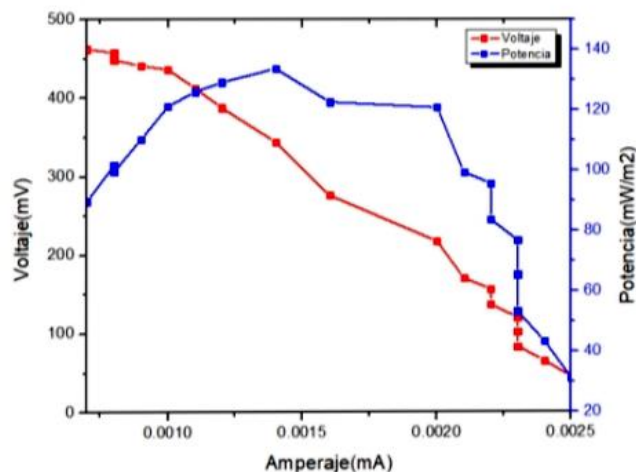


Figura 3.18. Curva de polarización de la celda operada con la planta *Dietes iridioides*

La Figura 3.19 muestra la curva amperaje-voltaje y la curva de polarización de una celda de combustible vegetal operada con la planta *Agapanthus*. En este caso, la densidad de potencia máxima fue de $479.56 \text{ mW} / \text{m}^2$, utilizando resistencia de $60 \text{ k}\Omega$ y una densidad de corriente de 0.0055 mA .

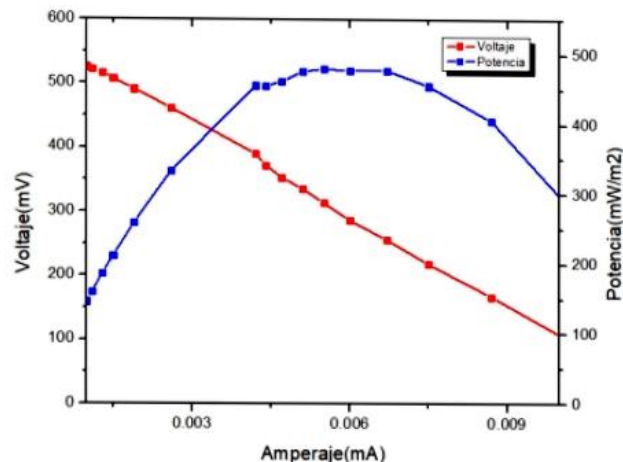


Figura 3.19. Curva de polarización de la celda operada con la planta *Agapanthus africanus*

Con base a los datos obtenidos en las curvas de polarización existe una diferencia significativa en la generación de potencia determinada con ambas plantas, teniendo mejor desempeño la celda construida con *Agapanthus africanus*.

Es importante mencionar que al término de los experimentos ninguna de las plantas mostró efectos adversos sobre su vitalidad, es decir, todas se mantuvieron verdes, con buena densidad foliar y crecieron adecuadamente, incluso tal y como se observa en la Figura 3.20 algunas de ellos mostraron floración.



Figura 3.20. Apariencia de las plantas después de 30 días de experimentación

La Tabla 3.7 muestra un comparativo entre las densidades de potencia obtenidas en este trabajo y algunas citadas en literatura. Las diferencias observadas se pueden atribuir a las condiciones ambientales, tipo de electrodo, dimensiones de la celda vegetal y ruta fotosintética de planta.

Tabla 3.7. Comparación de la densidad de potencia obtenida en este trabajo con lo citado en literatura

Fotografía	Tipo de planta	Ruta fotosintética	Potencia	Días operación	Referencia
	<i>Agapanthus</i>	C4	479.56 mW/m ²	30 días	Este trabajo
	<i>Dietes iridioides</i>	C3	191.83 mW/m ²	30 días	Este trabajo
	<i>Triticum aestivum</i>	C4	291.23 ± 7.50 mA/m ²	180 días	(Arulmani et al., 2021)

Tabla 3.7. Comparación de la densidad de potencia obtenida en este trabajo con lo citado en literatura (Continuación)

Fotografía	Tipo de planta	Ruta fotosintética	Potencia	Días operación	Referencia
	<i>Amaranthus viridis</i>	C4	185.23 ± 15.10 mA/m ²	180 días	(Arulmani et al., 2021)
	<i>Typha angustifolia</i>	C3	451.12 ± 94.37 mV	120 días	(Guan y Yu, 2021)
	<i>Pennisetum alopecuroides</i>	C4	667.94 ± 128.65 mV	120 días	(Guan y Yu, 2021)
	<i>Cyperus papiro nanus</i>	C4	± 92 mW/m ³	54 días	Gulamhussain y Randall, 2020)
	<i>Wachendorfia thyrsiflora</i>	C4	1036 ± 59 mW/m ³ 510	54 días	Gulamhussain y Randall, 2020)
	<i>Iris pseudacorus</i>	C3	19.5 mW/m ²	180 días	(Di et al., 2020)
	<i>Typha orientalis</i>	C3	19.5 mW/m ²	180 días	(Di et al., 2020)
	<i>Scirpus validus</i>	C4	19.5 mW/m ²	180 días	(Di et al., 2020)

Conclusiones

CONCLUSIONES

Durante la experimentación se observó variación en los voltajes y amperajes. La planta *Agapanthus* con ruta fotosintética C4 genera una mayor cantidad de voltaje en circuito abierto en comparación con la planta *Dietes iridioides* con ruta fotosintética C3.

Los electrodos a base de acero inoxidable mostraron potencial para generar voltaje a circuito abierto sin dañar la vitalidad de las plantas.

El exceso de agua tuvo un efecto negativo sobre la generación de voltaje en las CCMV'S, mostrando valores más bajos en los sistemas operados con 50 % agua y 50 % tierra.

La celda operada con la planta *Agapanthus* mostró la densidad de potencia más alta ($479 \text{ mW} / \text{m}^2$) llegando incluso a triplicar la determinada con la planta *Dietes iridioides* ($191.83 \text{ mW}/\text{m}^2$). Los resultados experimentales muestran que las plantas ornamentales pueden adaptarse en celdas de combustible para producir energía alternativa que puede ser útil para la alimentación de dispositivos de baja demanda.

RECOMENDACIONES

Mejorar el diseño de los electrodos y evaluar nuevos materiales conductores biocompatibles buscando eficientar el sistema bioelectroquímico.

Optimizar las condiciones de operación tales como adición de sustrato, materia orgánica, minerales y composta.

Estudiar algunas variables como el pH, la conductividad y la temperatura del suelo, así como la diversidad microbiana encargada del proceso de generación de electrones.

Referencias

REFERENCIAS

- Alzate-Gaviria, L., Fuentes-Albarrán, C., Álvarez-Gallegos, A., & Sebastián, J. (2008). Generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo PEM. *Interciencia*, 33(7), 510-517.
- Arulmani, S.R.B., Gnanamuthu, H.L., Kandasamy, S., Govindarajan, G., Alsehli, M., Elfakhany, A., Pugazhendhi, A., Zhang, H., (2021). Sustainable bioelectricity production from *Amaranthus viridis* and *Triticum aestivum* mediated plant microbial fuel cells with efficient electrogenic bacteria selections. *Process Biochem.* 107, 27–37.
- Barranco, M. B., Freile, G. M., & Torres, D. (2019). Análisis exergoambiental en fuentes no convencionales de energía (fnce): caso cascarilla de café. *Renovat: Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales, Tecnología e Innovación*, 2(1), 8-23.
- Bonilla Del Pozo, J. H. (2018). Valoración de sustratos vegetales, nitratos y plomo para maximizar la producción de bioelectricidad en celdas de combustible microbiana (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).
- COCHACHI BUSTAMANTE, Javier David; JIMENEZ HUALLPA, Ericka Lucia. Determinación de proteobacterias exoelectrogenas en los suelos de la universidad peruana unión para futura generación de energía renovable. 2019.
- CONDORI PACHECO, Aracel Erica; TORRES ZAMATA, Gustavo. Biodegradación de la materia orgánica y producción de Bioelectricidad en Celdas de Combustible Microbiano (CCM) a partir del agua residual doméstica–Lima. 2019
- Di, L., Li, Y., Nie, L., Wang, S., & Kong, F. (2020). Influence of plant radial oxygen loss in constructed wetland combined with microbial fuel cell on nitrobenzene removal from aqueous solution. *Journal of hazardous materials*, 394, 122542

FERNÁNDEZ MENDOZA, Abraham Nicolás, *et al.* Evaluación del Potencial de Generación Eléctrica a partir de Biomasa Vegetal mediante Celdas de Combustible Microbiana. 2021.

Fernández, M. B. (2022). Evaluación de la maduración y germinación de semillas de mijo perenne.

Galarza, A. G. (2021). Evaluación de grafeno y magnetita como membranas de intercambio de electrones en celdas de combustible microbianas con sustratos orgánicos para producir bioelectricidad. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 13(1), 24-24.

Gómora-Hernández, J. C., Flores-Alamo, N., Díaz-Colón, L. A., Ventura-Cruz, S., Jiménez-Cedillo, M. J. (2024). The critical impact of photosynthetic pathway of plants on the performance of PMFC. En libro: *Photosynthesis-Assisted Energy Generation: From fundamentals to lab scale and in-field applications*. Wiley.

Guan, C. Y., & Yu, C. P. (2021). Evaluation of plant microbial fuel cells for urban green roofs in a subtropical metropolis. *Science of The Total Environment*, 765, 142786.

Guan, C. Y., Tseng, Y. H., Tsang, D. C., Hu, A., & Yu, C. P. (2019). Wetland plant microbial fuel cells for remediation of hexavalent chromium contaminated soils and electricity production. *Journal of hazardous materials*, 365, 137-145.

Gulamhussein, M., & Randall, D. G. (2020). Design and operation of plant microbial fuel cells using municipal sludge. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101653.

Lumba Idrogo, N. S., & Porras Pizarro, L. D. (2020). Generación de bioelectricidad a partir de agua residual doméstica por el método celdas de combustible microbiano (CCM): Una Revisión

Luviano Viguera, J. Caracterización electroquímica de celdas de combustible microbianas vegetales para la producción de energía renovable.

- Maddalwar, S., Nayak, K. K., Kumar, M., & Singh, L. (2021). Plant microbial fuel cell: opportunities, challenges, and prospects. *Bioresource Technology*, 341, 125772.
- Martínez-Jaramillo, M., Alvarado-Cepeda, Y. A., & Vega-Chávez, J. L. (2022). Escarificación física, química y manual para la germinación de lirio persa (*Dietes sp.*). *Revista Agraria*, 19(3), 78-78.
- Molina, A. G., Mancilla, J. O., Assi, M. S., & Borges, E. V. (2017). Energía: celdas de combustible microbianas. *Ingeniería*, 21(1), 54-62.
- Nunes, P., Nunes, S. C., Pereira, R. F. P., Cruz, R., Rocha, J., Ravishankar, A. P., ... & de Zea Bermudez, V. (2023). The leaf of *Agapanthus africanus* (L.) Hoffm.: A physical-chemical perspective of terrestrialization in the cuticle. *Environmental and Experimental Botany*, 208, 105240.
- Pardo, R. A., & López-Lezama, J. M. (2020). Revisión de metodologías de arranque óptimo de generación para el restablecimiento de sistemas de potencia considerando fuentes de energía convencionales y renovables no convencionales. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 19(36), 187-204.
- Ramírez Ballestas, E. (2023). Potencial de generación eléctrica en celdas de combustible microbianas con plantas como fuente de energía renovable (Doctoral dissertation, Corporación Universidad de la Costa).
- Repuello, B. C., Ticlausaca, A. A., & Román, F. T. (2020). Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales municipales utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica. *South Sustainability*, 1(2), e018-e018.
- Revelo, D. M., Hurtado, N. H., & Ruiz, J. O. (2013). Celdas de combustible microbianas (CCMs): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica. *Información tecnológica*, 24(6), 17-28

Rosero, K. M., Fernández, L., Ayala, C. V., & Montero, P. J. E. (2019). Humedales artificiales y celdas de combustibles microbianas como sistemas individuales y combinados para el tratamiento de aguas residuales: una revisión. *infoANALÍTICA*, 7(2), 15-37.

Sánchez, M., Fernández, L., & Espinoza-Montero, P. (2021). Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales mediante celdas de combustible microbianas. *Revista Digital Novasinergia*, 4(1), 164-180.

Scott, K., & Yu, E. H. (Eds.). (2015). *Microbial electrochemical and fuel cells: fundamentals and applications*. Woodhead Publishing.

Subsecretaría de Planeación y Transición Energética Dirección General de Planeación e Información Energéticas México, (2021) Balance nacional de energía. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/805509/BNE-2021.pdf>

Valero Cardenas, S. M. (2023). Revisión de literatura del sistema de tratamiento biológico de celdas de combustible microbianas para la remoción de contaminantes y producción de energía.

Walter, X. A., Greenman, J., Ieropoulos, I. A. 2020. Microbial fuel cells directly powering a microcomputer. *Journal of Power Sources*. 446, 227328.

Yang, Y., Zhao, Y., Tang, C., Xu, L., Morgan, D., & Liu, R. (2020). Role of macrophyte species in constructed wetland-microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and bioenergy generation. *Chemical Engineering Journal*, 392, 123708