

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A TRAVÉS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANA APLICADA EN PLANTAS: PROTOTIPO DE LABORATORIO



Diego Armando Rengifo Morales

Jesús Alexis Miranda Muñoz

Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Ingenieros
Físicos

Universidad del Cauca

Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación

Departamento de Ingeniería Física

Popayán

2022

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A TRAVÉS DE CELDAS DE
COMBUSTIBLE MICROBIANA APLICADA EN PLANTAS: PROTOTIPO DE
LABORATORIO



Diego Armando Rengifo Morales

Jesús Alexis Miranda Muñoz

Director: Rubiel Vargas Canas, Doctor (PhD) en Ingeniería Biomédica. Co-
director: Cristian David Miranda Muñoz, Doctor (PhD) en Química

Universidad del Cauca

Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación

Departamento de Ingeniería Física

Popayán

2022

Dedicatoria

Agradecimientos

Esto es dedicado a mis padres, María Cristina Muñoz y Jesús Alberto Miranda, gracias por sus bendiciones, su tiempo, su amor, que pese a las dificultades forjaron en mí, el carácter por lo que hago, por creer en mí y ser tan comprensivos a lo largo en estos años de formación académica y personal. A mis hermanos Cristian y Vanessa por ser mi apoyo incondicional, por sus consejos y por nunca dejarme solo cuando más los necesite. A mi sobrino Juan José por ser el motor de vida de toda nuestra Familia. A mi abuelo Edgar y a Claudia por ser tan especiales conmigo y ser mi gran apoyo. A Diego Rengifo, mi gran amigo, compañero leal e incondicional, que, con sus ocurrencias, vivencias, charlas, viajes, hizo de esta estancia académica la mejor experiencia que haya podido vivir hasta el momento. A los docentes, que no solo me prepararon para ser una profesional sino para ser una persona útil en la sociedad. Por último, a cada una de las personas que me apoyaron, me enseñaron y compartieron conmigo en todo este proceso, el aporte de cada una de ellas fue indispensable para poder llegar hasta aquí.

Debo mi vida y mis principios a mis padres, Pablo Leonel Rengifo, Rosa María Morales son ellos quienes me trajeron hasta aquí, su capacidad de sostener una familia unida a pesar de todas las adversidades es su mayor legado, gracias por regalarme el estudio, por apoyar todas mis decisiones y locas ideas, las cuales hoy hacen parte fundamental de mi crecimiento personal, laboral y académico, por esas palabras cálidas en momentos fríos y por todo su apoyo cuando lo necesitaba. Gracias también a las mejores personas que Dios me pudo mandar como hermanos: Maia Natalia Rengifo el ejemplo del amor incondicional, por enseñarme que en la vida lo más importante es la familia, además por enseñarme con tu ejemplo, la disciplina para encarar la vida; Alex Rengifo a vos mi gran amigo por tantos momentos vividos y compartidos, uno de mis mejores maestros de la vida laboral, hemos recorrido medio país juntos compartiendo el mismo amor por la ingeniería,

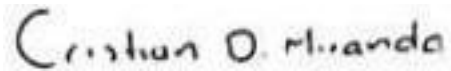
gracias a tu empresa ENELECT.SAS sus valores de trabajo, puntualidad, pulcritud y eficiencia como bandera que hoy la sostienen como una alternativa de alta calidad en el mercado eléctrico, a la cual le estoy eternamente agradecido. A mi sobrino Daniel Felipe, a tu corta edad, tus preguntas sobre el mundo hacen que nuestras charlas sean un gran proceso de aprendizaje, a mi primo Carlos Realpe y su familia, con quien la experiencia universitaria fue un templo de conocimiento y revolución. Especialmente gracias a mi compañero y gran amigo Jesús Alexis Miranda, con quien compartimos nuestro camino en el transcurso de esta carrera y el desarrollo de esta tesis, gracias por aguantar mi terquedad y por complementar nuestras aptitudes para concretar satisfactoriamente este trabajo que hoy nos enorgullece, además lo vivido en este proceso forjó unos lazos de fraternidad y amistad que espero perdure en el tiempo. Al departamento de ingeniería física y sus dependencias: profesores, administrativos, estudiantes, etc., quienes hicieron de esta carrera una experiencia inolvidable.

NOTA DE ACEPTACIÓN

APROBADO



Firma del director – Rubiel Vargas Canas



**Firma del Jurado – Cristian David
Miranda Muñoz**



**Firma del Jurado – Mario Andrés
Córdoba**



**Firma del Jurado – John Robert
Muñoz**

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	12
I. INTRODUCCIÓN	14
A. Descripción del problema	14
B. Pregunta de investigación	15
C. Objetivos	15
1) Objetivo General	15
2) Objetivos Específicos	16
D. Descripción de la metodología	16
E. Contribuciones	17
F. Descripción del documento	17
II. MARCO TEÓRICO	18
A. Conceptos sobre las celdas de combustible microbianas aplicadas en plantas	18
1) Celdas de Combustible (CC)	18
2) Celdas de Combustible Microbianas (CCM)	18
a) Concepto y Principio de Funcionamiento	19
b) Configuración	19
3) Celdas de Combustible Microbianas Aplicadas en Plantas (CCM-P)	20
a) Planta	20
b) Suelo	21
c) Electrodo	21
d) Separador o Membrana	23
4) Diseños y Configuraciones de las CCM-P	24
5) Generación y desempeño eléctrico	25
a) Circuitos eléctricos	25
b) Monitoreo y cálculo de la generación eléctrica de la celda	26

6) Dimensionamiento de una batería	27
1) Referentes Internacionales	28
2) Referentes Nacionales	31
3) Referentes Regionales	33
C. Vigilancia tecnológica	36
1) Bioo	36
2) Plant-e	37
3) UNAL	38
D. Análisis de la Literatura	39
1) Resumen	39
2) Tabla Característica “Matriz de Comparación”	40
3) Análisis de Brechas	43
III. METODOLOGÍA	45
A. Análisis de requerimientos	45
B. Construcción del sistema de medición	46
1) Módulo Microcontrolador	47
2) Módulo de Sensores Ambiente	49
3) Monitor detector de voltaje y corriente	50
4) Comunicación con el microcontrolador	51
a) Protocolo MQTT	51
b) Interfaz gráfica	53
5) Adquisición de datos (IoT)	53
C. Construcción del diseño mecánico de la celda CCM-P	56
1) Selección de variables de diseños	56
a) Electrodo	57

b) Tipo de planta	57
c) Sustrato	57
2) Diseños	57
3) Adquisición de componentes	58
D. Etapas de investigación	60
1) Pruebas para el desarrollo de la investigación	60
a) Combinaciones de diferentes materiales, sustratos y comparación del potencial en circuito abierto (OC)	61
b) Prueba de electrodos en posiciones verticales y horizontales a igual distancia	61
c) Efecto de la posición del ánodo y cátodo en su configuración horizontal en una CCM-P con la planta Lágrima	61
d) Efectos del desgaste de los electrodos	62
e) Prueba del efecto del área efectiva de los electrodos (CCM-P) con plantas Cintas y su caracterización eléctrica	63
f) Efecto de la distancia del ánodo respecto al cátodo en la producción de energía	63
2) Acondicionamiento de datos	64
a) Respecto a la generación de energía	65
b) Respecto a los bioseñales	66
E. Evaluación del rendimiento eléctrico del sistema	67
IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS	69
A. Efecto del acondicionamiento en las señales	70
B. Combinaciones de diferentes materiales, sustratos y comparación del potencial en circuito abierto (OC)	75
C. Prueba de electrodos en posiciones verticales y horizontales a igual distancia (6 cm)	76
D. Efecto de la posición del ánodo y cátodo en su configuración horizontal en una CCM-P con la planta Lágrima	77
E. Efectos del desgaste de los electrodos	83

F. Prueba del efecto del área efectiva de los electrodos (CCM-P) con plantas Cintas y su caracterización eléctrica	84
G. Efecto de la distancia del ánodo respecto al cátodo en la producción de energía	92
H. Resumen	100
V. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	101
A. Conclusiones	101
B. Trabajos futuros	102
VI. REFERENCIAS	103

LISTA DE TABLAS

Tabla II.I: Tabla de criterios	43
Tabla III.I: Conectividad, especificaciones y pinout del microcontrolador.	49
Tabla III.II: Características de operación de los sensores	50
Tabla III.III: Autenticación (publicación/subscripción)	54
Tabla IV.I: Ficha técnica de la medida	78
TABLA IV.II: Ficha técnica de la prueba (a) y (c)	81
TABLA IV.III: Ficha técnica de la prueba (b) y (d)	81
Tabla IV.IV: Ficha técnica de la prueba	85
Tabla IV.V: Datos estadísticos ambientales de la prueba	85
Tabla IV.VI: Valores del área del ánodo y resistencia de carga de las celdas	87
Tabla IV.VII: Caracterización de la generación de energía eléctrica durante la prueba	87
Tabla IV.VIII: Ficha técnica de la prueba	92
Tabla IV.IX: Estadística de los datos eléctricos y ambientales planta cinta	97
Tabla IV.X: Estadística de los datos eléctricos y ambientales planta lengua de suegra	97
Tabla IV.XI: Resumen de las pruebas	98

LISTA DE FIGURAS

Fig. I.1: Etapas de la metodología para el desarrollo del proyecto.	16
Fig. II.1: Esquema de una celda de combustible microbiana.	20
Fig. II.2: Esquema y reacciones internas de una CCM-P	21
Fig. II.3: Interacciones electroquímicas de los electrodos	23
Fig. II.4: Esquema pasos de operación de una CCM-P	24
Fig. II.5: Esquema de diferentes modelos de CCM-P	25
Fig. II.6: Dimensionamiento de modulo CCM	28
Fig. II.7: Bioo panel	36
Fig. II.8: Bioo Lux	37
Fig. II.9: Plant-power[27]	38
Fig. II.10: Food Park (2018)	38
Fig. II.11: Terrabatt	39
Fig. III.1: Módulos implementados en la investigación.	46

Fig. III.2: Esquema del sistema de medición	48
Fig. III.3: Modulo ESP32	50
Fig. III.4: Sensores ambiente	50
Fig. III.5: INA3221 y aplicación típica	52
Fig. III.6: Monitor voltaje-corriente	52
Fig. III.7 Esquema protocolo MQTT	54
Fig. III.8: Diseño del sistema de medición	56
Fig. III.9: Algoritmo del sistema de medición	57
Fig. III.10: Esquemas celdas de una cámara	59
Fig. III.11: Materiales para los electrodos	60
Fig. III.12: Planta Lágrima de bebe	61
Fig. III.13: Plantas para la investigación	61
Fig. III.14: Esquemático el efecto de la posición de los electrodos	63
Fig. III.15: Esquemático el efecto del área de los electrodos	65
Fig. III.16: Esquema el efecto de la distancia entre electrodos utilizados las plantas Lengua de suegra y Cinta	66
Fig. IV.1: Acondicionamiento de señal eléctrica de las CCM-P	72
Fig. IV.2: Análisis frecuencia - temporal de variables ambientales	73
Fig. IV.3: Escalogramas de las CCM-P	74
Fig. IV.4: Voltajes de los distintos candidatos de electrodos en distintos sustratos	76
Fig. IV.5: Desempeño del potencial que genera la posición de electrodos en las celdas	77
Fig. IV.6: Montaje de las CCM-P con la planta lágrima	78
Fig. IV.7: Señal de las celdas C1 Y C2 (prueba 1)	79
Fig. IV.8: Señal de la celda C3 (Prueba 1)	80
Fig. IV.9: Señal de las celdas C1 C2 y C3 (prueba 2)	82
Fig. IV.10: Efecto del tiempo en los electrodos	83
Fig. IV.11: Montaje de la prueba: dos CCM-P con plantas cintas	84
Fig. IV.12 Señales de la prueba en el paso del tiempo	86

Fig. IV.13: Promedios de potencia por día con las variables ambientales	89
Fig. IV.14: Comparación de la señal de temperatura ambiente y la señal acondicionada de la celda C1	90
Fig. IV.15: Promedio de potencia y las variables ambientes respecto a la hora del día	91
Fig. IV.16: Montaje de las dos CCM-P de la prueba efecto de la distancia de los electrodos	92
Fig. IV.17: Señales originales y filtradas de la CCM-P de planta cinta	93
Fig. IV.18: Señales originales y filtradas de la CCM-P de la planta lengua de suegra	94
Fig. IV.19: Comparación de la señal procesada de la Cinta y lengua de suegra respecto a la luz del sol	95
Fig. IV.20: Promedio del voltaje y las variables ambientes respecto a la hora del día	96

RESUMEN

Esta investigación consiste en una metodología de estudio sobre el comportamiento de las celdas de combustible microbianas aplicadas en plantas (CCM-P) en la ciudad de Popayán aprovechando el potencial eléctrico producto de la interacción de plantas coloquialmente conocidas como cinta y lengua de suegra o lengua de tigre, para este desarrollo se llevó a cabo una metodología Top-Down con cuatro objetivos para comprender el funcionamiento eléctrico de una CCM-P, caracterizando variables eléctricas como la potencia y energía producidas por las celdas, además como medida del desempeño se calcularon las tasas de generación de potencia y energía respecto al área de ánodo en distintas pruebas. Los datos continuos obtenidos a través de del sistema de medición diseñado basado en el paradigma IoT permitió realizar pruebas a mediano plazo (varios días), los resultados obtenidos con la planta Cinta, generaron una energía promedio de $3.27 \mu\text{Wh}$ y una tasa de potencia de $109.91 \mu\text{W}/\text{m}^2$, en presencia de una carga de $469\text{K}\Omega$, el estudio

demuestra también la correlación del potencial producido por las celdas y la especie de planta con la cual se relaciona.

Palabras clave: Celdas de combustible microbianas, rizosfera, variables ambientales, IoT, bioseñales, potencia eléctrica, energía de la celda.

I. INTRODUCCIÓN

A. Descripción del problema

Hoy en día, en nuestra sociedad las energías utilizables se han vuelto indispensables en su desarrollo, sin embargo, el uso desmedido ha causado que los métodos tradicionales de obtención como la quema de combustibles fósiles (gas, petróleo, carbón, etc.) traen consigo efectos contraproducentes para el planeta. La emisión de gases de efecto invernadero como el CO₂, entre otros producidos por estos métodos convencionales, se ha convertido en una de las causas principales del aumento de la temperatura global. Otros métodos como los embalses generan cambios irreversibles en ecosistemas aledaños [1]. Por esta razón, se investigan y desarrollan diferentes metodologías para obtención de energía eléctrica que contribuyen a la disminución de la huella de carbono. La generación de energía eléctrica por medio de una celda de combustible microbiana asistida por fotosíntesis de las plantas (CCM-P) cobra fuerza en países con alto grado de innovación energética como Países Bajos, España y en Latinoamérica Perú, en donde el factor común es la utilización de tipos de plantas por medio de celdas a pequeña escala que generan electricidad para consumo propio; la utilización de plantas cultivables como la *Chlorophytum Comosum* (Cinta) en celdas CCM-P brindan una oportunidad como fuente de energía eléctrica verde.

Los sistemas bioelectroquímicos (BES) como las celdas de combustible microbianas (CCM) y (CCM-P) son fuentes de energía renovables que se han desarrollado para diversas aplicaciones [1]. A diferencia de los CCM convencionales, las CCM-P pueden generar electricidad de forma continua mientras la planta crece y se pueden utilizar en cualquier uso de campo para la producción de cultivos sin dañar las plantas [1]. Sin embargo, para la aplicación de estos sistemas se han presentado grandes desafíos. Esto se debe en primer lugar, a la falta de investigación sobre este nuevo tipo de obtención de energía verde y sus componentes, y en segundo lugar, las pocas investigaciones, arrojan como conclusión el bajo rendimiento energético de estos tipos de celdas [1].

Entre los desafíos más relevantes para los sistemas CCM-P, se encuentra anteriormente mencionado su bajo rendimiento en la generación de bioelectricidad. En consecuencia, se requiere más investigación: en primer lugar, mejorar el diseño de los CCM-P, su configuración y modificación en los electrodos las cuales permitan optimizar las condiciones de funcionamiento

para uso comercial. En segundo lugar, la selección de especies vegetales (plantas) adecuadas con hábitos de crecimiento, raíces, metabolismos característicos entre otros; ya que el mecanismo de operación es liberar compuestos orgánicos a través de sus raíces para ser descompuestos por los microorganismos que transfieren electrones para la generación de bioelectricidad. Otros desafíos de este sistema son mantener vivas las plantas mientras se produce energía estable y evitar el deterioro de los materiales de los electrodos con el tiempo.

En el desarrollo de CCM-P para la generación de energía es importante que se considere las condiciones ambientales de la planta ya que es uno de los factores que determina la liberación de los compuestos orgánicos mediante la fotosíntesis, así mismo los microorganismos propios del suelo o inoculados como catalizador [2], debido a que estos se encargan de degradar los compuestos orgánicos que dona electrones para la generación eléctrica.

En este trabajo de investigación se desarrolló al menos un prototipo a escala de laboratorio y el posterior estudio de variables relacionadas con obtención de energía eléctrica, mediante conocimientos de áreas como electrónica, física, química, biología. La investigación describe de manera detallada los conceptos claves de la bioelectricidad, el uso de la celda de combustible microbiana de origen vegetal como tecnología para la obtención de energía renovable, su clasificación de sistemas, los principios de operación y los parámetros fundamentales que afectan a los sistemas en el desarrollo del proceso. Para el desarrollo de este trabajo se formuló la siguiente pregunta.

B. Pregunta de investigación

¿Es viable la construcción de celdas de combustibles microbianas basadas en plantas (CCM-P), para la generación de energía eléctrica en Popayán?

C. Objetivos

1) Objetivo General

Implementar un prototipo CCM-P a escala de laboratorio y evaluar su rendimiento energético.

2) *Objetivos Específicos*

1. Investigar las CCM, CCM-P, los componentes internos, externos que la componen y los factores que afectan su rendimiento.
2. Definir el tipo de planta, parámetros órgano eléctricos y componentes físicos necesarios para la construcción de una CCM-P que se ajuste a las condiciones de la ciudad de Popayán.
3. Construcción de CCM-P, y verificación de los parámetros anteriormente mencionados.
4. Caracterización de la CCM-P, en términos de su eficiencia y producción de energía.

D. Descripción de la metodología

La metodología implementada en este trabajo describe los pasos utilizados para realizar el estudio de requerimientos, construcción e implementación, tanto del sistema de medición como del diseño mecánico de la CCM-P, así como la puesta en marcha de las pruebas para las posteriores etapas de investigación para dar cumplimiento a los objetivos planteados (Fig. I.1).

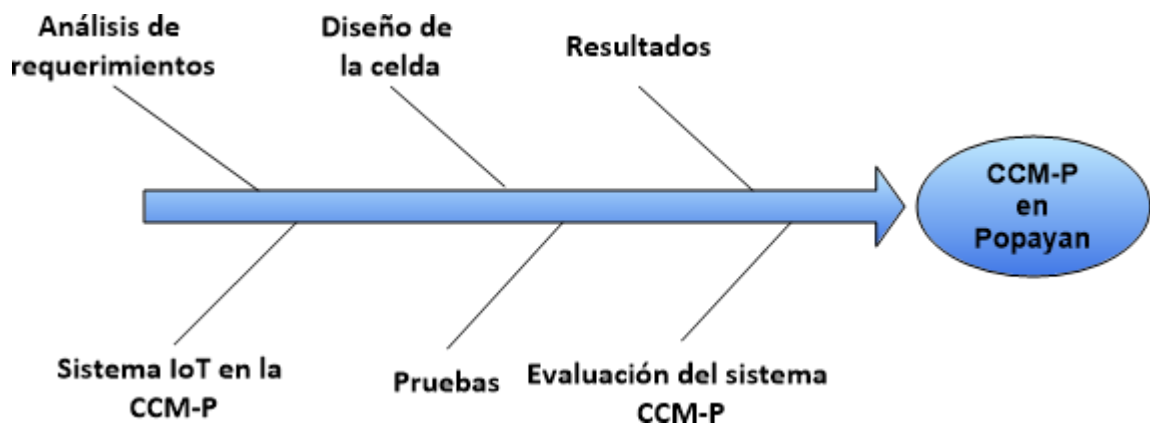


Fig. I.1: Etapas de la metodología para el desarrollo del proyecto.

Se desarrolló el sistema de monitoreo (IoT) con la capacidad de almacenar las pruebas en bases de datos suscritas generando también archivos de respaldo (tablas), archivo en formato .csv para fácil acceso y manipulación. En las etapas posteriores se acondicionaron y analizaron los datos para el cálculo de potencia, tasa de potencia por metro cuadrado, energía por hora, tasa energía por metro

cuadrado, también se describen sus etapas de filtrado para el estudio correcto estudio de las señales. Además de esto se evaluó el rendimiento energético de las celdas CCM-P y sus posibles aplicaciones.

E. Contribuciones

El estudio de este sistema de obtención de energía es una esperanza para el auto sostenimiento energético del mundo y es una de las maneras más limpias de generar energía eléctrica, esta manera de conversión de energía ayuda a disminuir la huella de carbono del mundo, además de esto en un panorama alentador en el desarrollo urbanístico ya que el uso de estas celdas obliga a repoblar las urbes de plantas que consumen CO₂ ayudando a mejorar la calidad del aire. En Colombia actualmente se está avanzando en el tema legislativo de leyes como lo es la “LEY 1715 DE 2014” [2], por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, brindando beneficios tributarios que incentiven el uso y desarrollo de nuevas tecnologías no convencionales de obtención de energía.

F. Descripción del documento

El documento consta de cinco capítulos: el primero, es la introducción sobre el problema a tratar y se plantean los alcances que el proyecto tendrá, se realizó un resumen sobre la forma en cómo ejecuto el trabajo; el segundo capítulo consta de los conceptos teóricos y el estado del arte de la construcción y funcionamiento de las CCM-P; en el tercer capítulo se presenta la metodología implementada para el diseño del sistema de medición, para la construcción de las celdas y obtención de los datos utilizado en los análisis de las distintas CCM-P; El cuarto capítulo muestra de forma organizada los resultados y la discusión obtenidos en cada prueba para su posterior análisis; el quinto capítulo contiene las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros a las que se llegó después de analizar los resultados obtenidos.

II. MARCO TEÓRICO

A. Conceptos sobre las celdas de combustible microbianas aplicadas en plantas

En este capítulo, se introducen los fundamentos, conceptos y elementos básicos para comprender el desarrollo de la investigación basada en la tecnología de celdas de combustible y celdas de combustible biológicas, la cual en los últimos años se ha convertido en una alternativa prometedora para la investigación de las nuevas fuentes de energías renovables no convencionales en el mundo.

1) Celdas de Combustible (CC)

Dispositivo electroquímico capaz de convertir energía química en eléctrica a través de un circuito eléctrico externo, similar a una pila electrolítica, unas de sus principales características son: el flujo constante de los reactivos consumidos (agente oxidante), electrodos catalíticos y relativamente estables. La estructura básica de todas las celdas de combustible es similar: la celda se compone de dos electrodos separados por un electrolito y estos a su vez están conectados en un circuito externo. Los electrodos están expuestos a flujos de gas o líquido para suministrarles combustible u oxidante (Por ejemplo: hidrógeno u oxígeno) [1].

2) Celdas de Combustible Microbianas (CCM)

Las CCM son una derivación de las CC, en donde se aprovecha la presencia de microorganismos vivos como catalizadores de procesos electroquímicos, típicamente está compuesta por dos cámaras, una anaeróbica y otra aeróbica en medio de las cuales hay un separador. La cámara anaeróbica contiene sustratos orgánicos que, al oxidarse por acción de los microorganismos, generan electrones, protones y CO_2 [3]. En cada cámara se coloca un electrodo, el ánodo en la cámara anaeróbica y el cátodo en la cámara aeróbica, una vez los electrones se liberan en la cámara anódica, éstos son captados por el ánodo y posteriormente transferidos hacia el cátodo mediante un circuito externo. Simultáneamente, en la cámara anódica se generan protones que migran hacia la cámara catódica a través del separador, donde se combinan con el oxígeno del aire para reducirse a agua con los electrones que captan directamente del cátodo, debido a que esta reacción no está

catalizada por microorganismos el cátodo se refiere como abiótico[3], aunque existen CCM de una sola cámara las cuales comprenden el mismo principio físico pero al carecer de una membrana selectiva, las pérdidas son mayores significando una reducción en la potencia.

La celda se fabrica en materiales resistentes y que retengan líquidos como en plásticos, acrílico o en vidrio, para los electrodos se pueden utilizar diferentes materiales como: cobre, zinc, aluminio, grafito u otros [3].

a) Concepto y Principio de Funcionamiento

Las CCM contienen materia orgánica que al oxidarse por acción de los microorganismos, los cuales se encargarán de la degradación del combustible (materia orgánica e inorgánica), generando pequeños potenciales en la reacción de degradación de la materia orgánica que pueden ser transferidos al ánodo por diferentes medios como: nanoestructuras conductoras, por estructuras morfológicas características de los microorganismo o por la adición de mediadores químicos[4], para luego entregar estos potenciales directamente a una carga conectada por un circuito eléctrico cerrado.

b) Configuración

En el modelo de CCM básico (Fig. II.1), la glucosa se reduce en el ánodo por medio de microorganismos bacterianos, reacción que libera finalmente protones y electrones, dichos electrones se dirigen hacia el cátodo mediante el material conductor (circuito eléctrico externo), mientras que los iones se transfieren al cátodo a través de la membrana de intercambio catiónico, la cual no permite el paso de electrones, en la etapa final para completar el ciclo los iones H^+ y los electrones entrarán en contacto con el oxígeno en el cátodo, formando agua. La energía eléctrica proviene del paso de los electrones a través del circuito externo [4].

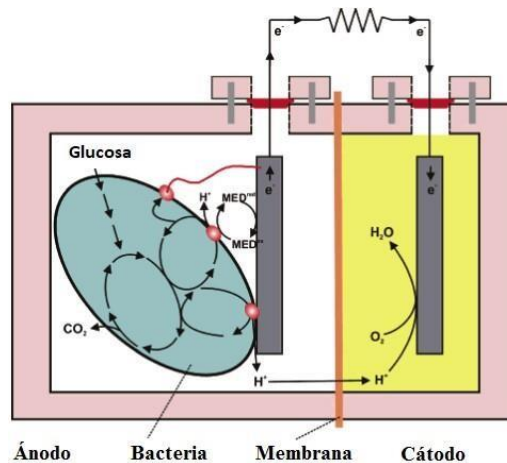


Fig. II.1: Esquema de una celda de combustible microbiana.

3) Celdas de Combustible Microbianas Aplicadas en Plantas (CCM-P)

Una CCM-P se compone en tres componentes principales las cuales se abordan en esta sección.

- Planta
- Suelo
- Electrodo

a) Planta

En una CCM-P, la planta juega un rol fundamental para su funcionamiento. Generalmente se utilizan plantas comunes que puedan desempeñarse en condiciones de alta humedad. Una planta es un productor primario, esto significa que, al ser la primera línea en la cadena alimenticia, las plantas son los organismos encargados de crear compuestos orgánicos a través de la fotosíntesis, es decir, generan carbohidratos y nutrientes a partir de la fijación de CO_2 (Plantas C3) mediante energía luminosa, algunas plantas han desarrollado rutas metabólicas auxiliares, que les permiten crecer eficazmente en zonas tropicales (plantas C4) o desérticas (plantas CAM) [5].

A nivel mundial, cada año las plantas procesan 67.5 mil millones de toneladas de carbono del total de carbono fijo [6]. De esa cantidad, cerca de 47.25 mil millones de toneladas de carbono se trasladan a las raíces para ser finalmente liberadas a la rizosfera [7], mediante procesos de rizo deposición en forma de exudados (azúcares, ácidos orgánicos, etc.) (Fig. II.2), secreciones

poliméricas ricas en carbohidratos y enzimas, gases (como etileno y CO_2), entre otros desperdicios celulares [8].

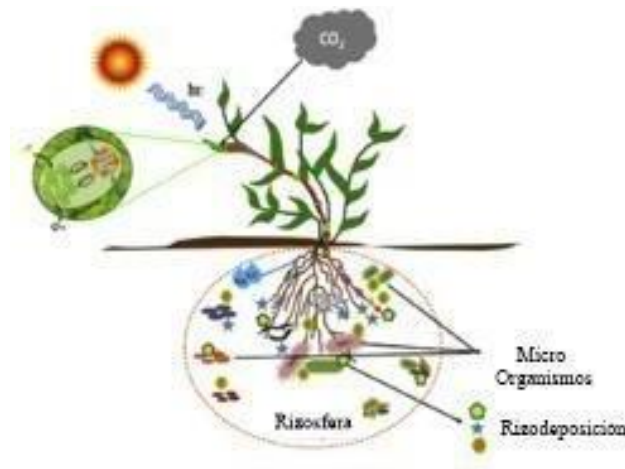


Fig. II.2: Esquema y reacciones internas de una CCM-P

b) Suelo

El suelo o sedimento juega un factor crucial en el desempeño de una CCM-P, esto se debe principalmente a que esta fuente de energía está basada en dos principios: La rizo deposición, o pérdida de compuestos orgánicos en las raíces de las plantas; y la generación de electricidad electroquímica por bacterias activas a través de la degradación de raíces muertas. Debido a que será el medio en donde la planta y los microorganismos encargados de las reacciones electroquímicas que habitan en la rizosfera proliferaron y coexistan, deberán tomarse en cuenta otros factores, como la disponibilidad de sustrato por metro cuadrado, el área de crecimiento de la planta, factores del suelo (humedad, conductividad eléctrica, temperatura, pH), entre otros [4].

c) Electrodo

Como se ha discutido, una CCM-P es una celda biológica que consta básicamente de plantas vivas, electrodos (un ánodo y un cátodo) y suelo orgánico. Posteriormente, los electrones que liberan las bacterias a través de las reacciones redox, se recolectan mediante un par de electrodos los cuales se denominan como ánodo y cátodo. El ánodo se coloca en la región de la rizosfera de la planta,

donde ocurre la oxidación de la materia orgánica por los microbios, lo que resulta en la liberación de electrones, protones y CO_2 . Los protones viajan a través del medio hasta el cátodo, mientras que los electrones del ánodo son transportados por un cable como transportador de corriente [9].

La reacción electroquímica en el ánodo por actividad microbiana [9]:



En el cátodo (colocado en el sedimento), el oxígeno, los electrones y los protones se reducen para formar agua y generar bioelectricidad [9].

Así mismo, dicha reacción:



Recapitulando, los mecanismos encargados de generar energía en una CCM-P consisten en lo siguiente:

- En los pigmentos de las hojas de la planta capta la luz solar y convierte el CO_2 en carbohidratos, a este proceso se conoce como fotosíntesis.
- El carbón fijado es llevado hasta las raíces y depositado en la región de la rizosfera en forma de azúcares, ácidos orgánicos, compuestos aminados, etc. (exudados), polímeros ricos en carbohidratos y enzimas, gases (C_2H_4 y CO_2) y materiales de células muertas mediante el proceso de rizo deposición [9]
- En el proceso de rizo deposición se favorece la proliferación de bacterias de la rizosfera, dichas bacterias metabolizan la materia orgánica ya que cuentan con un sistema electroquímico con el cual se genera energía [9].

Así, la potencia eléctrica de salida en la CCM-P se relaciona con: la cantidad de exudados, la morfología de raíz, la eficiencia fotosintética de la planta, las características del suelo y la relación de planta-bacteria, entre otras. Dentro del proceso de captura de los potenciales, en los electrodos existen varios procesos que en determinadas condiciones pueden ocurrir algunos en simultáneo.

Los procesos que pueden ocurrir en la interfaz del electrodo son:

- Migración

- Difusión
- Adsorción
- Transferencia de carga; Reacciones de competencia ● Desorción:
 - Difusión hacia el seno del electrolito
 - Fuga de gas

Los potenciales obtenidos son menores a los teóricos, debido a las múltiples reacciones ocurriendo simultáneamente en las inmediaciones de los electrodos (Fig. II.3), muchas de las cuales impactan negativamente en la recolección del potencial debido a que esta región es un micro sistema que aloja cientos de seres vivos y elementos que interactúan con los electrodos.

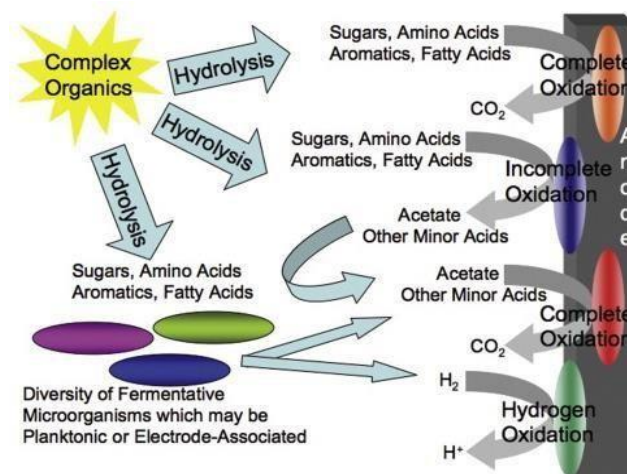


Fig. II.3: Interacciones electroquímicas de los electrodos

d) Separador o Membrana

Es un componente importante del sistema ya que impide el paso de electrones de la cámara anódica a la catódica y favorece pasar los iones hidrógeno, puede ser de varios tipos: membrana de intercambio de cationes (MIC), membrana de intercambio de aniones (MIA), membrana bipolar, membrana de microfiltración, membrana de ultrafiltración, puente salino, fibra de vidrio, membranas porosas y otros materiales para filtrado [3]. El separador más ampliamente utilizado es la MIC que también se conoce como membrana de intercambio de protones (MIP) y entre ellas es muy común la Nafión®, un producto de DuPont Inc., USA, que muestra una alta permeabilidad a

los protones; sin embargo una variante de la CCM de doble cámara se obtiene eliminando la cámara catódica y exponiendo el cátodo directamente al aire o cerca de la superficie, transformándose así en una CCM de una sola cámara; este hecho hace que sea un sistema mucho más sencillo y de menor costo. Entonces, las CCM de una sola cámara pueden tener un separador o también pueden prescindir de éste, utilizadas para estudiar su desempeño eléctrico [3].

La descripción realizada con anterioridad se puede resumir en forma simplificada en 5 pasos (Fig. II.4): fotosíntesis de la planta, generación exudados en la raíz, la acción de la población de microorganismos en la rizosfera para producir los electrones a partir de los exudados, captación de estos electrones libres y generación de electricidad mediante un circuito con carga por donde fluye corriente [10].

Resumen simple de 5 pasos de la operación de una P-MFC

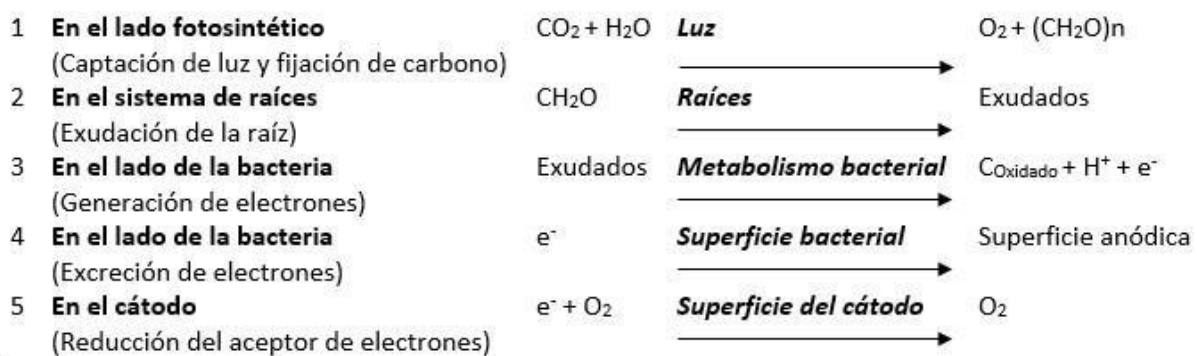
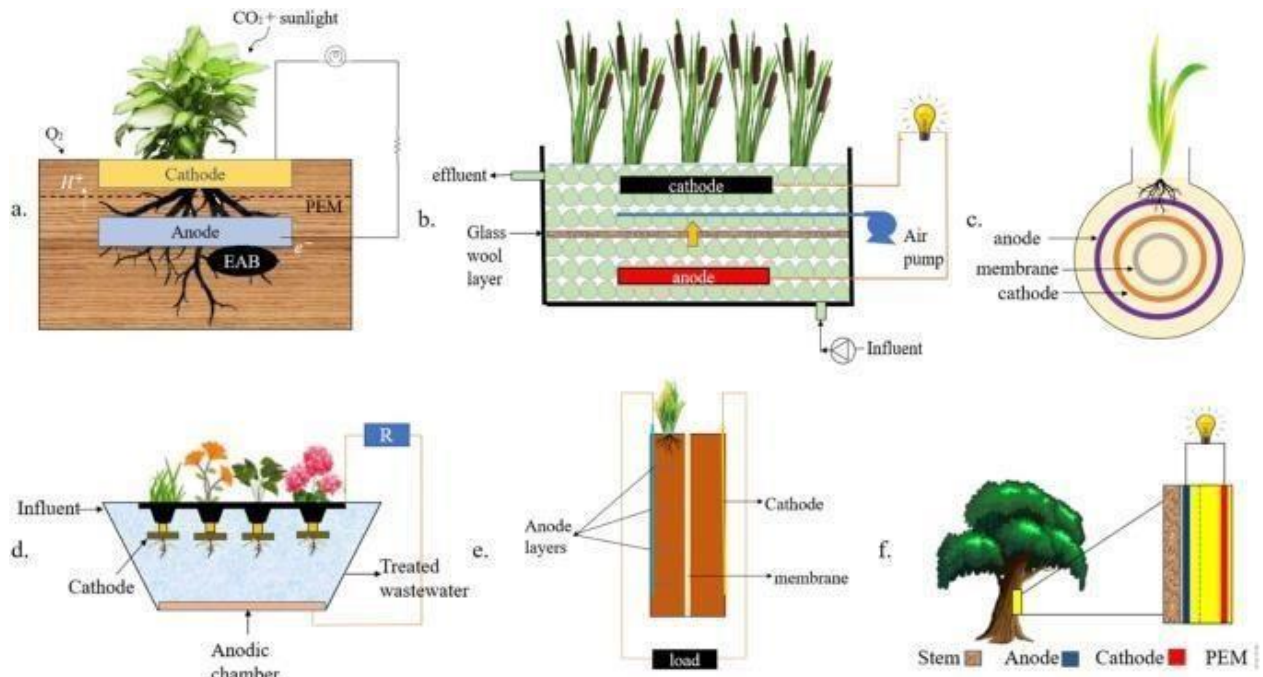


Fig. II.4: Esquema pasos de operación de una CCM-P

4) Diseños y Configuraciones de las CCM-P

Varios investigadores han desarrollado diferentes modelos para CCM-P, que encuentran una variedad de aplicaciones. Las CCM-P de cámara única no tienen cámara catódica, mientras que las CCM-P de cámara doble consisten en un ánodo y un cátodo separados por una membrana de intercambio de protones o un separador para permitir que el ion se difunda hacia el lado del cátodo sin transferir el sustrato a través del mismo y también evita el movimiento de catolito hacia el lado del ánodo. Otros modelos (Fig. II.5) como tubular y tipo placa plana de CCM-P también se han investigado y desarrollado. Puede ser importante tener en cuenta que el mecanismo de trabajo de todos los modelos sigue siendo el mismo [11].



Fuente: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359511321002877>

Fig. II.5: Esquema de diferentes modelos de CCM-P

5) Generación y desempeño eléctrico

El desempeño eléctrico de una CCM-P se estudia a partir de las mediciones de voltaje en circuito cerrado que se realizan en la carga conectada entre el ánodo y el cátodo. haciendo uso de las leyes de Kirchhoff y los conceptos de potencia y energía, además del uso de ecuaciones de los circuitos eléctricos y los respectivos cálculos que se derivan de ellas. Los parámetros que se analizan para evaluar el comportamiento eléctrico de este tipo de dispositivos principalmente son: la potencia y energía [12] y para el dimensionamiento de un módulo productor de energía basado en CCM-P, se utiliza la teoría de circuitos.

a) Circuitos eléctricos

- **Circuito eléctrico abierto**

El circuito eléctrico abierto consiste en que ambos polos de la fuente (ánodo y cátodo) permanecen separados. A este tipo de circuito corresponde el voltaje en circuito abierto (V_{CA}) que es el máximo voltaje teórico que puede alcanzar una celda [13].

- **Cortocircuito**

El cortocircuito ocurre cuando ambos polos de la celda se conectan directamente. A este tipo de circuito corresponde el máximo valor teórico de intensidad eléctrica de la celda [13].

- **Circuito eléctrico cerrado**

El circuito eléctrico cerrado consiste en que ambos polos de la fuente (ánodo y cátodo) se unen mediante la incorporación de un dispositivo. A este tipo de circuito corresponde el comúnmente llamado voltaje y es el manejado para cualquier trabajo eléctrico [13].

b) Monitoreo y cálculo de la generación eléctrica de la celda

- **Medición de las Variables**

Para el monitoreo de una celda se utilizan equipos de medición de variables eléctricas como lo son los voltímetros, amperímetros, etc., los cuales garantizan una medición calibrada, algunas veces se hace necesario incluir sistemas automáticos de medición, estos cumplen las mismas funciones descritas anteriormente, pero esta vez se ejecutan de manera remota y sistemática, obteniendo muchas ventajas.

- **Desempeño**

Para estudiar y comparar el desempeño o eficiencia de las CCM-P se suele utilizar la magnitud de potencia por unidad de superficie de electrodo ($\mu\text{W}/\text{m}^2$), la eficiencia coulombica y la resistencia interna, ya que estas características determinan pérdidas considerables de energía, y son susceptibles a cambios en la configuración del sistema, como, por ejemplo: ubicar el cátodo y el ánodo cerca puede llevar a disminuir la resistencia interna, lo cual resulta en un mayor desempeño eléctrico[14].

6) Dimensionamiento de una batería

En el mercado los dispositivos funcionan a condiciones estándar (*Voltaje, Potencia*), con el fin de brindar al lector la experiencia más cercana al campo laboral se puede diseñar una celda que cumpla parámetros estándares.

Las celdas CCM-P, se comporta similar a batería con características eléctricas individuales, debido a esto se debe acondicionar el diseño de la celda para obtener una salida eléctrica con parámetros estandarizados, estos permiten trabajar con módulos acondicionados a requerimientos específicos teniendo en cuenta que:

- **Baterías conectadas en serie**

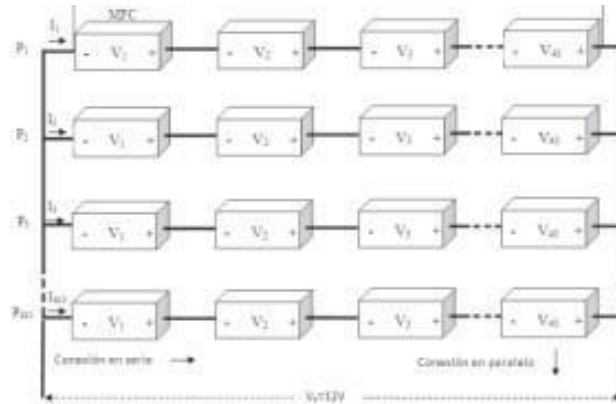
Una manera para manipular el voltaje de alimentación de una fuente o batería es la conexión en serie hay que unir que el polo positivo (+) de una batería y el negativo (-) de la otra. el voltaje de salida resultante será la suma de los voltajes conectados en serie.

- **Baterías conectadas en paralelo**

Cuando se quiere aumentar la corriente de las baterías se debe conectar en paralelo, es decir conectar el positivo (+) con el positivo de la otra batería, y el negativo (-) con el negativo (Fig. II.6). Esto duplica la corriente en el caso de dos baterías y triplicará si son tres, y así sucesivamente de acuerdo al número de baterías conectadas, pero el voltaje siempre será el de una sola batería

- **Sistema híbrido**

Debido a que los voltajes y potencias obtenidos en las celdas son relativamente bajos, debemos realizar módulos los cuales constan de celdas ubicadas en serie y paralelo como lo muestra la figura.



Fuente: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-921X2012000200011&script=sci_abstract&tlng=es

Fig. II.6: Dimensionamiento de modulo CCM

B. Referentes de investigación

1) Referentes Internacionales

- **“Progress and recent trends in photosynthetic assisted microbial fuel cells: A review”**[15]

Describe los sistemas bio-electroquímicos (BES), como las celdas de combustible microbianas (CCM), las celdas de combustible microbianas en plantas (CCM-P) y otros sistemas derivados de las CCM, además se destaca a detalle el funcionamiento y principios básicos de una celda de combustible microbiano, sus parámetros fisicoquímicos que afectan el funcionamiento de la celda las diferentes aplicaciones y tipos de configuraciones. El objetivo principal del P-MFC es que la planta almacena la energía en forma química a través del proceso fotosintético y, en última instancia, a través de este sistema, se transforme en energía eléctrica. Las CCM-P son una opción prometedora para generar bioelectricidad en comparación con los CCM convencionales. La generación inicial de bioelectricidad ha aumentado de manera prometedora en un 90,13% (de 67 mW.m⁻² a 679 mW.m⁻² de área de crecimiento vegetal). La mejora de la generación de densidad de potencia a largo plazo en CCM-P (rendimiento de CCM-P) para sus posibles aplicaciones a gran escala ahora depende de varios factores, tales como: tipos de materiales de electrodos, tipos de membranas y especies de plantas adecuadas (con alta rizo

deposición). *S. ánglica* parece ser una buena alternativa para la mejora de CCM-P en condiciones de saturación.

➤ **“Concurrent bio-electricity and biomass production in three Plant-Microbial Fuel Cells using *Spartina ánglica*, *Arundinella anomala* and *Arundo donax*”[16]**

El artículo citado describe una comparación de producción concurrente de bioelectricidad y biomasa en tres CCM-P, utilizando en cada una especie de plantas diferentes respectivamente. Para su configuración experimental se utiliza tres CCM-P de modelo cilíndrica, las cuales se ubicaron en una cámara climática con las siguientes características: 25°C con 75% de humedad, intensidad de luz promedio de $596 \pm 161 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ medida en la parte superior de los reactores por un medidor de intensidad de luz y un período de iluminación de 14 hora por día. Concluyendo así: la biomasa y la bioelectricidad se pueden producir simultáneamente en CCM-P. Por tanto, es posible producir bioenergía no destructiva con un CCM-P. Las especies herbáceas parecen tener la capacidad de crecer y facilitar la producción de electricidad en un CCM-P.

➤ **“Sustentabilidad energética de redes de sensores inalámbricos mediante celdas de combustible basada en plantas - Universidad de Quintana Roo”[17]**

En el siguiente citado se abordó la sustentabilidad energética en nodos sensores de red para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés) para el sensado de variables físicas como temperatura, presión atmosférica, humedad relativa, y medición de la calidad del aire, además de hacer uso de sistemas de cosecha de energía para lograr una suficiencia energética de los nodos de red diseñados mediante el uso de Celdas de Combustible Microbianas basadas en Plantas (CCM-P) y ofrecer soluciones de monitoreo a largo plazo. Para su metodología e implementación se propusieron arreglos de CCM-P en configuraciones eléctricas serie y paralelo con la finalidad de analizar su comportamiento. Así también, el trabajo propuso una serie de algoritmos para lograr la administración de la energía almacenada en los dispositivos como supercapacitores, y con ello, estudiar la sustentabilidad energética de los nodos de sensores inalámbricos. Finalmente, los nodos de red diseñados fueron probados en ambientes de operación bajo los estándares propuestos para IoT como es NB-IoT(narrowband-Iot), LoRa(long Range) y BLE (Bluetooth low energy) con la finalidad de realizar el estudio energético en el cual el

desempeño de los nodos propuestos y estudiados, los cuales presentaron un contraste significativo, mientras que el nodos sensor LoRa fue capaz de alcanzar transmisiones exitosas a muy largas distancias y presentando un consumo energético mediano (más o menos 275 mW), el nodo sensor BLE fue capaz de transmitir mayor cantidad de paquetes de datos a costa de una cobertura y consumo energético menores (Menor o igual 10 mW) y el nodos sensor NB-IoT fue capaz de realizar transmisiones exitosas a grandes distancias, con una tasa de transferencia mediana, pero con un consumo energético de hasta 2000mW.

➤ **“Bioelectricidad Generadas por Pilas de Combustible Microbiana de Hierbabuena (*Mentha spicata*) y Cinta (*Chlorophytum comosum*) - Yanacancha - Chupaca.”**[18] El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar la bioelectricidad generada en las pilas de combustible microbiana de hierbabuena (*Mentha spicata*) y Cinta (*Chlorophytum comosum*) en el distrito de Yanacancha – Chupaca – 2021, es de tipo aplicada, cuantitativo y experimental, para el cual se construyó un montaje de pila de combustible microbiano utilizando varillas de grafito como electrodo, se midió la radiación solar global, pH y temperatura de la tierra utilizada en las pilas; los resultados demostraron que la pila de combustible microbiana de cinta generó una mayor bioelectricidad (505,45 mV), a comparación de la pila de combustible microbiana de hierbabuena (245,37 mV) siendo una diferencia de 260,08 mV; además, en la caracterización inicial de la tierra utilizada en la pila de combustible microbiano para cinta presenta mejores características en pH de 7,30; materia orgánica de 1,94 % P de 22,20 ppm K de 209,73 ppm y N de 0,10 %, se logró una mayor bioelectricidad cuando el pH y la temperatura de la tierra fueron 6,43 y 12,83 °C en la pila de combustible microbiana para hierbabuena y 7,04 y 10,80 °C para cinta respectivamente. Concluyendo que la pila de combustible microbiano de cinta fue más eficiente para la generación de bioelectricidad.

➤ **“Estudio de viabilidad de la generación de energía eléctrica mediante una célula de combustible vegetal microbiana plant-microbial fuel cell) por fotosíntesis de la planta *phaseolus vulgaris* (frijol)”**[12]

La investigación realizada tuvo por objetivo evaluar la viabilidad de la generación de electricidad que presentó una célula de combustible vegetal microbiana por la fotosíntesis de la planta

Phaseolus vulgaris (frijol) en un metro cuadrado de superficie de cultivo, mediante la determinación de la potencia y energía eléctrica producidas, así como el análisis financiero de una proyección de esta producción para un cultivo de una hectárea de superficie. Se efectuó una prueba a escala de laboratorio de un metro cuadrado de superficie diseñando en forma modular por medio de contenedores plásticos con electrodos de malla galvanizada construyendo una célula por contenedor, conectándose entre sí con una configuración establecida. Se recolectaron los datos de voltaje y corriente en periodos de 30 minutos, estos fueron procesados mediante un análisis estadístico que generó valores mínimos, máximos, promedios y tasas de producción para variables de potencia y energía eléctrica. Los resultados de la investigación realizada determinaron que la potencia y energía eléctrica promedio obtenida de la prueba son de 2.3786 [μ W] y 16.4044 [μ Wh], respectivamente.

2) Referentes Nacionales

➤ “Mejoras en el potencial de generación de energía eléctrica de plantas vivas a partir de celdas de combustible microbiano” [19]

Es una investigación relacionada con las mejoras en el potencial de generación de energía eléctrica de plantas vivas a partir de celdas de combustibles microbianos (CCM-P). El objetivo principal de este proceso investigativo es construir un prototipo funcional que permita mostrar la técnica o mecanismo usado para lograr mantener y aumentar el potencial de generación que esta técnica puede ofrecer, presentar indicaciones respecto al uso dado actualmente y las restricciones que esta contiene al momento de encontrarse en funcionamiento. En su metodología, en la primera etapa se centró en un análisis de conductividad de sustratos, con el fin de generar la mayor cantidad de tensión, que se le pueda extraer a la planta, la cual consto en la realización de diferentes pruebas para identificar el sustrato y la planta adecuada y de esta manera poder identificar si la generación de energía depende la planta, la raíz, la exposición al sol, tamaño del terreno cubierto por el circuito o de los materiales que se utilizan como ánodos y cátodos en el mismo. Para la segunda etapa se tomaron dos macetas de mayor tamaño, en una maceta se incrementó el número de plantas de *Chlorophytum comosum* y en otra maceta se combinaron diferentes tipos de plantas, *Chlorophytum comosum*, *Tradescantia pallida*, *Caladium*. Finalmente, esta investigación condujo a diferentes pruebas para determinar qué materiales naturales tienen influencia en el aumento de la potencia de

salida. Así mismo, se comprobó la influencia del número de raíces por metro cuadrado en el incremento de estos valores. Como resultado se obtuvo que el proceso de generación de electricidad mediante CCM-P se relaciona directamente a la cantidad de raíces que una planta posee, debido que es el lugar donde hay mayor concentración de la actividad microbiana.

➤ **“Diseño y experimentación de un prototipo para la generación de energía eléctrica no convencional mediante el proceso fotosintético de plantíos.” [20]**

Trabajo realizado por estudiantes de la Facultad de ingeniería, Programa de Ingeniería Eléctrica de Universidad de La Salle (Bogotá, Colombia), Este proyecto tuvo como principal objetivo obtener energía del proceso fotosintético de plantíos, específicamente con la tecnología Plant Microbial Fuel Cell. Para ello se planteó el diseño y la implementación de un prototipo con dos grupos de cultivos de las plantas más afectadas por las heladas en Colombia; para evaluar el potencial de generación eléctrica de esta tecnología y su posible empleo en sistemas de automatización, respecto a su construcción se utilizaron láminas de cobre y zinc como electrodos, ubicados alrededor de la planta, para realizar mediciones continuas, se procedió a automatizar el sistema, utilizando: Módulo Wifi [wifi ESP32], sensor de humedad de suelo Higrómetro [Y169], Sensor de temperatura [Ds18b20], Sensor de voltaje [Sens Volt]. Este tipo de introducción de la tecnología en CCM-P en cultivos agrícolas, no se ha probado debido a la corta duración o vida útil de la planta, Sin embargo, este no fue el caso puesto que el sistema logró funcionar en un periodo de 3 a 4 meses hasta que el producto final fue cosechado y apto para consumo sin complicación alguna.

➤ **“Producción de bioelectricidad por medio de una celda de combustible microbiana fotosintética (P-MFC)” [11]**

Desarrolla un análisis de la tecnología CCM-P con sus componentes, el enfoque de esta en el desarrollo de un prototipo de celda utilizando la planta Jacinto de agua o Li-rio acuático (*E. crassipes*), para evaluar el rendimiento energético, la metodología utilizada se sustenta en parámetros fundamentales como la existencia de EBA (*Geobacter spp.*, *Clostridium spp.* y *Pseudomonas spp.*), para esto se hace un crecimiento bacteriano en agar, aparte de este parámetro se estudiaron varios materiales para candidatos de electrodos, definiendo así los de mejores características para dichos objetivos y un estudio de tres diseños de celdas con características

específicas, sus lados fuertes y débiles, para al final elegir la que a criterio del equipo de trabajo se comportaría con mayor estabilidad, se realiza una primera prueba con los parámetros anteriormente mencionados y se procede a la evaluación de las variables de desempeño, luego se generan unas mejoras en general en el sistema CCM-P y se realizan las mismas pruebas de la celda inmediatamente anterior y así se obtienen comparaciones que verifican la optimización de la recolección de la energía.

➤ **“Desarrollo de un prototipo de sistema para la generación de energía eléctrica a partir del proceso de fotosíntesis de las plantas” [21]**

El objetivo del proyecto de investigación como parte de un proyecto macro de investigación es dar a conocer una fuente de energía amigable con el medio ambiente y proveniente de un proceso natural de las plantas como lo es la fotosíntesis. Se desarrolló un prototipo y un estudio de obtención de energía eléctrica y los factores internos y externos que pueden influenciar en el proceso. La metodología de este proyecto, se basó en la investigación de qué plantas resultan apropiadas para el prototipo, en la determinación de requerimientos y restricciones del sistema, en la elaboración del sistema, en la implementación de diseño y por último en la evaluación del rendimiento energético. Finalmente, como resultado se logran tener altos niveles de voltaje, pero pocos valores de corriente por lo cual existe la compensación de corriente-voltaje evitando tener valores de potencia altos. Sin embargo, se ha tenido avances en la investigación acerca de cómo se puede tener un aumento de corriente.

3) Referentes Regionales

➤ **“Evaluación de una celda de combustible microbiana para el tratamiento del agua residual del campus universitario Meléndez” [22]**

El objetivo de este trabajo de investigación fue evaluar el desempeño en términos de la eliminación de materia orgánica y generación de energía eléctrica de una CCM de 50 L que opera en flujo continuo tratando agua residual de la Universidad del Valle – Campus Meléndez. La CCM evaluada fue parte del proyecto “Evaluación de un acople tecnológico para el tratamiento del agua residual doméstica y el potencial uso de los subproductos generados. Caso de Estudio: “Campus

Universidad del Valle Sede Meléndez”, financiado por la Vicerrectoría de Investigación. El sistema piloto consistió en una celda de combustible microbiana, como primera unidad de tratamiento, seguida de un proceso de fotocátalisis heterogénea y una laguna algal de alta tasa. El dispositivo consistió en un sistema de dos bandejas conectadas con flujo hidráulico en serie, conocido como CCM de tipo apilado. Cada bandeja fue dividida en tres compartimentos dispuestos paralelamente entre sí, es decir, que estaban separados hidráulicamente. Cada cámara tenía 0.4 m de largo, 0.18 m de ancho y 0.13 m de profundidad, para un volumen de 25 L. La evaluación de la eficiencia eléctrica de la CCM se fundamentó en la aplicación del método de resistencia variable para la elaboración de curvas de polarización y potencia. De esta manera, se tiene que los terminales anódico y catódico de la CCM se conectaron a un circuito externo. Se emplearon dos multímetros en función del potencial y la corriente eléctrica respectivamente, y una resistencia variable. La CCM evaluada como una de las unidades del acople tecnológico para el tratamiento del agua residual del campus Meléndez, presentó eficiencias en reducción de materia orgánica e inorgánica expresadas, en promedio, del 55% en DBO5, 50% en DQO, 19% en ST y 39% en SST, que dependieron de las condiciones del afluente. Esto debido a la actividad metabólica de los microorganismos que se desarrollaron en el medio, encontrando que a medida que la carga del afluente fue mayor, la eficiencia de transformación aumentó. La producción de energía se vio afectada por la carga aplicada al sistema: encontrando que, a cambios considerables en esta, la densidad de potencia decayó y se desestabilizó el sistema, debido a la limitación en la transferencia de electrones por parte de los microorganismos.

➤ **“Diseño, construcción y análisis del desempeño eléctrico de una celda de combustible microbiana (CCM) con electrodos de acero inoxidable y grafito” [23]**

Este proyecto se basó en construir una celda de combustible microbiana con electrodos de acero inoxidable y grafito, y evaluar el desempeño eléctrico utilizando aguas residuales sintéticas. Para la realización del prototipo se tuvo en cuenta que las celdas de combustible microbiana (CCM) son un dispositivo electroquímico capaz de convertir la biomasa o materia orgánica en electricidad, basándose simplemente en el metabolismo de los microorganismos. La CCM se diseñó y construyó con doble cámara separada por una membrana de intercambio protónico, que se coloca en un recuadro que va en el centro de la celda. Cada cámara tuvo un volumen útil de 255.6 cm³, comunicadas por una Membrana de Intercambio Protónico Nafión® 117-DUPONT 117 con área

de 44 cm² y se utilizó electrodos de acero inoxidable. Para la cuantificación de la corriente se utilizó una resistencia externa de 920Ω. Posteriormente se diseñó en AUTODESK INVENTOR PRO® y se imprimió en una impresora MakerBot Replicator, utilizando el polímero ácido poliláctico (PLA) y el fondo se recubrió con plástico líquido, para lograr una mayor intensidad de corriente, diferencia de potencial y potencia, es necesario usar una mayor cantidad de lodo en la cámara anódica. La eficiencia coulombica obtenida a pesar de ser baja se ajusta y se compara con algunos artículos y referencias obtenidas en el laboratorio. Los valores bajos de eficiencia coulombica pueden estar asociados a la desviación de electrones hacia el desarrollo anabólico de comunidades microbiológicas mixtas, el consumo de materia orgánica a través de procesos metabólicos competitivos como la fermentación, la metanogénesis o relaciones sintróficas entre las especies electroquímicamente activas o que el área de transferencia anódica no es suficiente para la transferencia de electrones.

➤ **“Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un Reto para la Remoción de Materia Orgánica y la Generación de Energía Eléctrica” [3]**

En el siguiente artículo se presentan y discuten los aspectos más importantes que inciden en el desempeño de una celda de combustible microbiana, tales como su arquitectura, la función microbiana y el tipo de sustratos. En la última década estos sistemas bioelectroquímicos han atraído el interés de diversos investigadores, no sólo por la tendencia mundial en la producción de energía sostenible, sino también por su operación simultánea para degradar materia orgánica y biorremediación. Estas aplicaciones dependen esencialmente del metabolismo microbiano sobre el cual el conocimiento aún es limitado, requiriéndose una mejor comprensión de la compleja ecología microbiana. En países en desarrollo es importante estudiar otras fuentes de microorganismos y sustratos con variada composición química que puedan ser potenciales combustibles en celdas de diferente configuración. Investigar más sobre estos aspectos será esencial para optimizar y potenciar estos procesos. Finalmente concluyen, que la CCM es una tecnología promisoría para propósitos de generación alternativa de energía, remoción de materia orgánica y biorremediación; sin embargo, para aplicaciones prácticas es necesario mejorar la eficiencia en los procesos bioelectroquímicos y en el desempeño eléctrico, por lo que se requiere investigar más en aspectos como diseño, comunidades microbianas, tipo y concentración de sustratos.

C. Vigilancia tecnológica

Para nombrar algunas de las empresas y universidades con aplicaciones recientes mediante la implementación de la tecnología CCM-P se tienen:

1) Bioo

Es una empresa creada en 2016 por los españoles Pablo Vidarte y Javier Rodríguez. Su objetivo es producir electricidad a través de la fotosíntesis de las plantas. En 2017, el Parlamento Europeo la nombró Empresa más Innovadora. En 2018, ganó el Primer Premio de la Cámara de Comercio Americana en Europa.



Fig. II.7: Bioo panel

Bioo panel (Fig. II.7), compuesto por césped natural y puede colocarse tanto en viviendas particulares como en parques urbanos o jardines. El panel puede generar de 28 a 280 kilovatios al año. Bioo calcula que con 10 de estos paneles se cubrirán las necesidades de una vivienda familiar [24].



Fig. II.8: Bioo Lux

“Bioo Lux se activa cuando conectas con la naturaleza (Fig. II.8). Su luz se disuelve a través del cuerpo de porcelana translúcida que contiene las plantas e inunda las estancias de una luz suave y cálida. Este es un dispositivo que le permite a las personas interactuar con la naturaleza. Bioo Lux se compone de tres elementos. El cuerpo, compuesto por una pantalla de cerámica traslucida y una base de corcho natural aglomerado; la electrónica, programada sobre una placa base que incorpora la característica antena de la tecnología Bioo; y un enchufe que permite alimentar la luz del LED a través de la toma de corriente convencional.”[25]

2) Plant-e

La empresa Plant-e, ubicada en Wageningen (Este de Holanda), desarrolla productos en los que las plantas vivas generan electricidad mediante la tecnología Plant Microbial Fuel Cell (PMFC). Plante es ahora el titular de la patente y trabaja continuamente en nuevas investigaciones y desarrollo de productos como sensores, aplicaciones en áreas remotas, reducción de las emisiones de metano, y tratamiento de aguas residuales de fácil instalación y sin perturbación al ecosistema.

Plant-power: una celda impulsada por plantas (Fig. II.9). Se puede conectar a cualquier dispositivo IoT de baja potencia, como un sensor o un dispositivo de transmisión de datos. Tiene una pequeña batería interna como búfer, que se carga continuamente mediante la celda alimentada por la planta. No requerirá mantenimiento y no es necesario cambiar la batería[26].



Fig. II.9: Plant-power [27]

Food Park es una nueva forma de aplicar la electricidad más ecológica y hacerla visible (Fig. II.10). Su presencia en el parque es notada por las plantas y las luces que parpadean a su alrededor con la electricidad de esas plantas. Plant-e y Ermi van Oers quieren estimular el uso del verde en el entorno construido y hacer que las personas estén más en contacto con su entorno [26].



Fig. II.10: Food Park (2018)

3) UNAL

En cuanto a Colombia, estudiantes de la Universidad Nacional sede Manizales, han venido trabajando sobre un prototipo de lámpara que genera electricidad a través de la fotosíntesis (Fig. II.11), creada principalmente para las zonas no interconectadas del país que adolecen de la ausencia del servicio eléctrico o de una simple bombilla en las noches. Se trata de tres módulos de madera que se pueden separar. Cada uno funciona como una lámpara individual, es decir, como una batería orgánica, generando fuentes de tensión con un promedio de 0.8 voltios [28].



Fig. II.11:Terrabatt

D. Análisis de la Literatura

1) Resumen

El objetivo de este análisis bibliográfico es, en primer lugar, presentar los aspectos fundamentales, claves y actualizados propios de las CCM-P en términos de enriquecimiento de los distintos diseños, del sustrato, las plantas vivas y su papel, los microorganismos en la rizosfera, el mecanismo de conversión del sustrato y utilización, además de la transferencia de electrones para generación de bioelectricidad. En segundo lugar, se dilucidaron sistemáticamente diferentes configuraciones de CCM-P incrustadas con plantas vasculares, macrófitos y briófitas, así como su combinación con humedales artificiales. En tercer lugar, las aplicaciones de los CCM-P en los campos del tratamiento de aguas residuales, sedimentos contaminados, remediación de aguas superficiales, mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) y biosensores. Por último, también se analizaron las perspectivas y desafíos de las CCM-P para aplicaciones a gran escala. A través de esta revisión, se podrían inspirar nuevas ideas y ayudar a identificar los aspectos relevantes de las CCM-P que necesitan ser investigados para desarrollar un proceso a gran escala sostenible y económicamente factible. Vale la pena señalar que cualquier sistema, independientemente del

nombre en la investigación original que utilice plantas vivas para la generación de bioelectricidad según los principios de CCM, se considera un CCM-P en esta revisión.

2) Tabla Característica “Matriz de Comparación”

En esta sección nos basamos en parámetros importantes para el proceso de electro génesis utilizando una CCM-P, se clasificaron los artículos más parecidos a nuestra idea principal, la cual lleva con siglo las directrices de generación de energía verde, sostenible y de bajo impacto ambiental, se indagaron artículos de algunas de las bases de datos más prestigiosas de ciencia, arrojando estudios de diferentes partes del mundo, todos estos consignados a continuación y al final resumidos en una tabla la cual nos permite visualizar de manera rápida, la densidad de literatura útil respecto a nuestras directrices (Tabla II.I).

R1: “Progress and recent trends in photosynthetic assisted microbial fuel cells: A review,” **R2:** “Diseño y experimentación de un prototipo para la generación de energía eléctrica no convencional mediante el proceso fotosintético de plantíos”

R3: “Bacterias, fuente de energía para el futuro”

R4: “Desarrollo de un prototipo de sistema para la generación de energía eléctrica a partir del proceso de fotosíntesis de las plantas”

R5: “Bioelectricity production using plant-microbial fuel cell: Present state of art”

En este trabajo se toman los siguientes criterios como base del análisis de brecha:

Compatibilidad de los materiales con los procesos de los sistemas vivos de la celda: Este criterio se toma como factor a tener en cuenta debido a que la fuente principal de biomasa en nuestra celda de combustible es una planta viva, la cual no puede interactuar con los materiales que hagan parte de la celda y así no afectar el correcto desarrollo.

Eficiencia energética: Dado que hay muchos tipos de celdas de combustible microbiano respecto a su configuración, sustrato, materiales, etc. Nosotros tomaremos en cuenta los diseños de mayor eficiencia energética debido a que este es el propósito principal de este trabajo.

Tipo de Plantas: El tipo de respiración es un factor importante que define cuánta materia orgánica exuda una determinada planta además que indica en qué momento del día se activa su metabolismo, es por ello que es un factor importante para el estudio de esta tecnología, caracterizando estas plantas podemos obtener mayores densidades de potencia a las horas que realmente necesitamos utilizarla.

Ambientes controlados: El estudio de la señal que genera la planta no solo es función de los exudados, dado que el nivel de producción de estos depende de la salud de la planta que a su vez depende de factores externos como lo son la temperatura ambiente, la humedad ambiente y del terreno, la luminosidad, el nivel de radiación etc.

Diseños de las CCM-P: La eficiencia de la celda depende de varios factores entre estos está el diseño dado que es este el que define cómo se capturan los electrones, cuál es la interacción de los electrodos con los rizodepositos, etc. Existen diseños variados que van desde simples placas planas, o tubulares, hasta diseños complejos con sistemas de transferencia iónica y sistemas de aireación asistidas todo con el fin de maximizar los procesos de los cuales depende la generación de la celda.

Complejidad de instalación: Este criterio se basa en la idea de replicar el modelo de celda que se construyó, para ello nos basaremos en la facilidad del monte y desmonte de toda la celda, también en la tasa de mantenimiento, y la accesibilidad de los materiales.

Toma de datos: Específicamente este trabajo está basado en la obtención de energía de la biomasa producida por las plantas, con el objetivo de estudiar dicha señal e influir en parámetros que se pueden modificar para un óptimo funcionamiento, es por esto que la toma de datos de una manera continua y precisa es un método que optimizará los resultados pudiendo así tomar mejores decisiones en el análisis.

Tipo de suelo: Muchos estudios han demostrado la influencia del tipo de suelo en el que crecen las plantas que es el mismo medio anaeróbico en el que se encuentra sumergido el ánodo, dado a su

capacidad de filtración, relación carbono-nitrógeno, comunidades electrogénicas presentes, entre otros.

Coste de producción: Uno de los factores a analizar es la relación costo beneficio la cual nos da información de la viabilidad del proyecto a una escala macro, para ello debemos estudiar diseños que minimicen al máximo el costo por materiales y ensamble.

Tipo de membrana: Este factor en muchos artículos es uno de las principales limitantes de la densidad de corriente, para ello hay empresas las cuales producen membranas muy eficientes, pero con costos muy elevados, llevando a que el proyecto en general tenga un aumento significativo en el costo final, es por ello que hay una serie de investigaciones de materiales cerámicos para reemplazar estas membranas con resultados muy similares.

Densidad de potencia y caracterización energética: La viabilidad del proyecto en el campo eléctrico depende en gran medida a la densidad de corriente y potencia que logremos obtener de la CCM-P.

Aplicaciones: Las CCM tienen muchas aplicaciones, algunas de ellas son: la biorremediación, la fitorremediación, la generación de energía eléctrica, entre otras, para este estudio nos enfocaremos en los artículos cuya aplicación sea en mayor medida la generación y optimización de energía eléctrica.

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

Tabla II.I: Tabla de criterios

CRITERIOS	R1	R2	R3	R4	R5
Revisión de estado del arte (Si, No, NA)	S	S	S	S	S
	S	S	NA	S	S

Compatibilidad de los materiales con los procesos de los sistemas vivos de la celda. (Si, No, NA)					
Tipo de Plantas (C3, C4, CAM)	S	S	NA	N	N
Ambientes controlados (Si, No, NA)	N	S	N	N	N
Bacterias eléctricamente activas			S		
	N	S	NA	N	S
Diseños de CCM-P					
Complejidad de instalación (Alta, Media, Baja, Todos, NA)	T	B	NA	B	B
Toma de datos (Manual, Asistida, NA)	M	A	M	A	NA
Tipo de suelo (Agrícolas, Forestales, Otros, NA.)	NA	A	NA	A	N
	T	B	N	M	B
Coste de producción (Alta, Media, Baja, Todos, NA)					
Densidad de potencia y caracterización energética (μW, mW, W, NA)	mW		NA	μW	μW
				.	
Desarrollo de prototipo (Si, No)	N	S	N	S	N

3) Análisis de Brechas

Aún hay grandes desafíos en términos de generación de energía eléctrica para los sistemas CCMP, uno de los principales es la búsqueda de mayores potenciales. Es aquí en donde se requiere más investigación, en primer lugar, mejorar el diseño de los CCM-P; la configuración y modificación de los electrodos para optimizar de las condiciones de funcionamiento para uso comercial. En

segundo lugar, la selección de especies vegetales (plantas) adecuadas; que son capaces de liberar compuestos orgánicos a través de sus raíces y que son descompuestos por los microorganismos que transfieren electrones para la generación de bioelectricidad. Otros dos desafíos de este sistema son mantener vivas las plantas mientras se produce energía estable y evitar el deterioro de los materiales de los electrodos con el tiempo.

En el desarrollo de CCM-P para la generación de energía es importante que se considere las condiciones ambientales de la planta ya que estas condicionan la salud de la misma y se convierte en un factor influyente para la liberación de los compuestos orgánicos mediante la fotosíntesis, así mismo los microorganismos propios del suelo o inoculados como catalizador, se encargan de degradar los compuestos orgánicos que dona electrones para la generación eléctrica.

III. METODOLOGÍA

En este capítulo se describe de manera detallada la metodología desarrollada para realizar: el estudio de requerimientos para la construcción e implementación del sistema de medición, el diseño y construcción de las CCM-P, también se describen las ecuaciones utilizadas para el análisis eléctrico con el fin de dar solución a los objetivos planteados para resolver la pregunta de investigación en el presente trabajo (Fig. III.1).

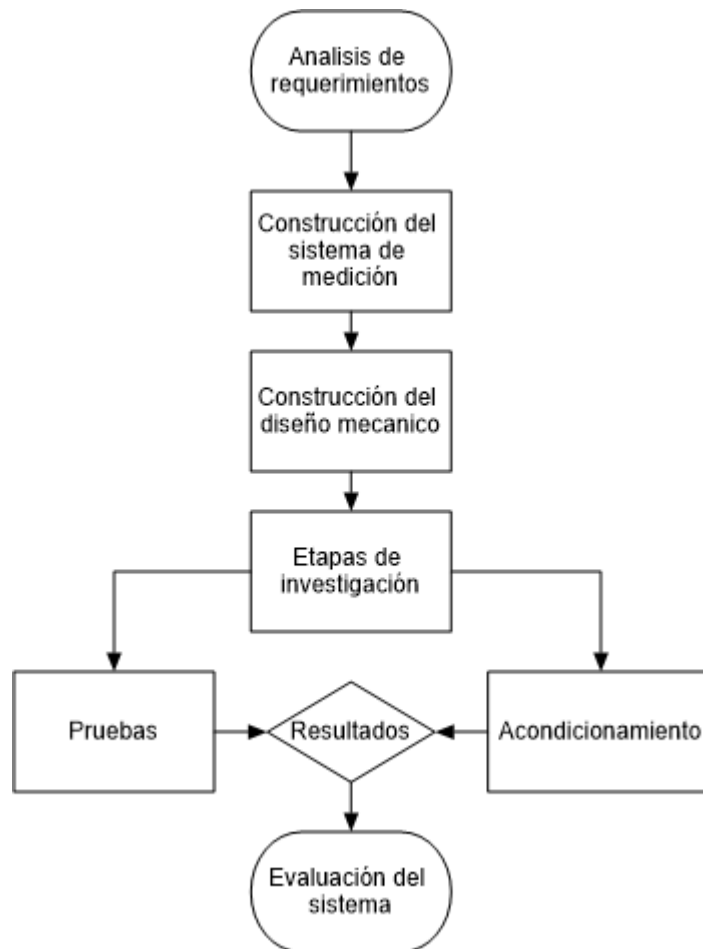


Fig. III.1: Módulos implementados en la investigación.

A. Análisis de requerimientos

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se realizó la búsqueda bibliográfica de los requerimientos para la celda a través de la revisión, se evaluaron distintos materiales de tipo

reciclado como las barras de grafito y láminas de zinc, láminas de cobre, y aluminio, para utilizar como electrodos, tomando en cuenta parámetros como conductividad eléctrica, potencial, resistividad, biocompatibilidad y disponibilidad. La planta y por consiguiente la tierra juegan un papel fundamental ya que es la fuente de biomasa y sus raíces son objeto de este estudio, se toman distintas especies de plantas, de las cuales se comparan las señales obtenidas, el método de medición también es un parámetro el cual se abordó en este trabajo, ya que para medir las propiedades eléctricas en la celda de combustible microbiana fotosintética a mediano plazo y además realizar análisis elaborados se requiere de un sistema automatizado de monitoreo continuo que permita la captación de la señal de voltaje y corriente en determinadas horas del día. Para esto se debe desarrollar un algoritmo que procesa estas señales para obtener las propiedades eléctricas.

B. Construcción del sistema de medición

Para la construcción del sistema se siguió un diseño “*Top-Down*”, el cual consiste en un diseño de lo general a lo particular, en la práctica, se diseñan módulos (Fig. III.2) y cada módulo se especifica en los componentes. Este tipo de diseño brinda una de las soluciones para resolver el problema planteado, y lograr un sistema acorde a los requerimientos del sistema. El sistema debe ser capaz de captar pequeñas señales y medir tanto el voltaje como la corriente en las CCM-P y posteriormente relacionarlos con la potencia eléctrica, además de sensar diferentes variables de ambiente. En segundo lugar y debido a que gran parte del trabajo requirió de un desarrollo de software, se implementó una metodología de trabajo “*Git Flow*”, para poder realizar un control adecuado dividiendo el proyecto general en ramas específicas y llevar registro de los avances.

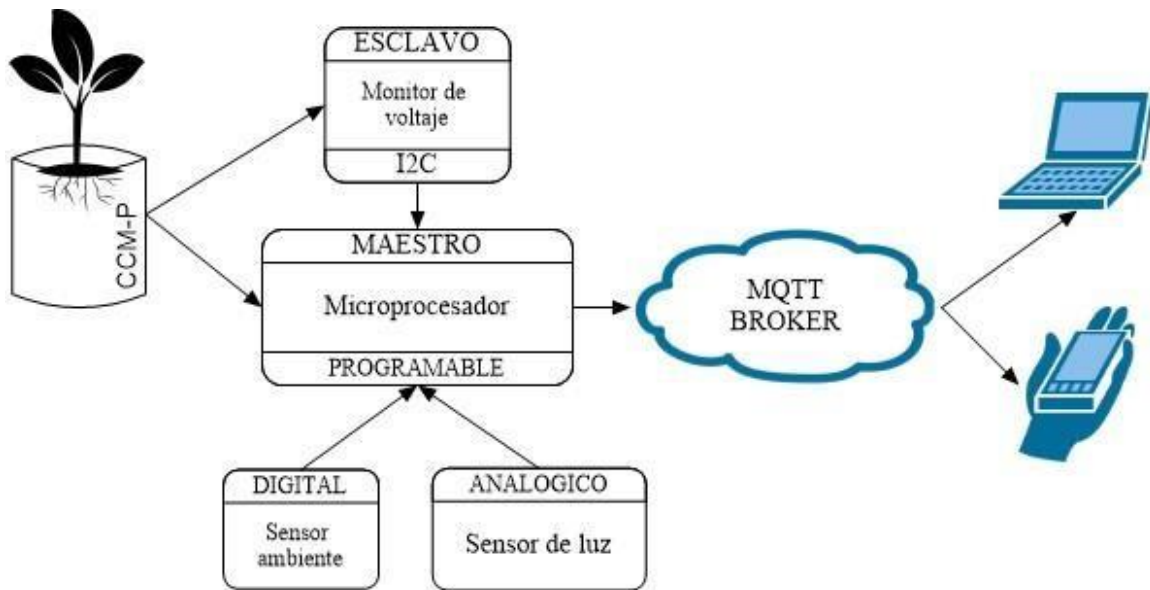


Fig. III.2: Esquema del sistema de medición

Una manera eficiente y confiable de adquirir los datos en tiempo real es la utilización de las tecnologías IoT (Internet of Things), paradigma para la interconexión digital de objetos cotidianos con internet[29], las cuales permiten interactuar en tiempo real con múltiples dispositivos, dicha tecnología permite adquirir los datos en intervalos continuos de tiempo, discretizando la señal para un posterior análisis y procesamiento. Por estas ventajas, se creó un sistema de medición por medio del cual se monitorean múltiples parámetros de algunas de las CCM-P implementadas en las pruebas, además de variables del ambiente, como temperatura, luminosidad y humedad, utilizando distintos sensores acoplados al dispositivo maestro.

1) Módulo Microcontrolador

El ESP32 es un SoC (System on Chip) que integra el procesador de 32 bits LX6, de doble núcleo que trabaja en modo normal a 160 MHz (pudiendo alcanzar los 240 MHz), es decir el doble de velocidad que el ESP8266. Este nuevo SoC se caracteriza por integrar, no solo la pila (Stack) de comunicación Wi-Fi con una mejora en el aspecto de seguridad (encriptación criptográfica), sino que añade una pila (Stack) Bluetooth Low Energy que abre el abanico de posibilidades ya que permite implementar sobre ella diversos perfiles que van más allá de la típica comunicación serie por bluetooth (perfil SPP), permitiendo utilizar perfiles de transmisión de audio, de puerta

(Gateway) Bluetooth-WiFi, o de implementación de dispositivos HID (interfaces hombre-máquina), ya sean periféricos existentes como ratones, teclados o gamepads, o cualquier tipo de dispositivo de control que se nos ocurra, entre otros (Tabla III.I).

Tabla III.I: Conectividad, especificaciones y pinout del microcontrolador.

Conectividad	Especificaciones	Dispone de 48 Pines
El módulo ESP32 dispone de todas las variantes del WiFi: 802.11 b/g/n/e/i/n	Doble núcleo de 32 bits con velocidad de 160 MHz	18 ADC de 12 bits
Wi-Fi Direct (P2P), P2P Discovery, P2P Group Owner mode and P2P Power Management	Memoria ROM de 448 kBytes	2 DAC de 8 bits
Bluetooth v4.2 BR/EDR and BLE 47	Memoria SRAM de 520 Kbyte	10 pines sensores de contacto
LE Beacon		16 PWM
Además, puede comunicarse mediante los protocolos SPI, I2C, UART, MAC Ethernet, Host SD		20 entradas/salidas digitales

Esta etapa se implementó utilizando un ESP-WROOM-32 (Fig. III.3), que posee las conexiones y herramientas necesarias para controlar y conectar con los diferentes módulos. Este se programó utilizando el entorno de desarrollo integrado o IDE por sus siglas en inglés (Integrated Development Environment) de Arduino.



Fig. III.3: Modulo ESP32

2) Módulo de Sensores Ambiente

Se utilizaron sensores para el monitoreo de la variable ambiente como: humedad, temperatura, con el sensor DHT22 (Fig. III.4), luminosidad (Fig. III.4), que se acoplan al microcontrolador ESP32 y permiten monitorear las variables de interés, la adquisición y calibración de los datos de los sensores, se programó en el entorno IDE de Arduino. En la (Tabla III.II) se muestran los diferentes sensores utilizados con sus principales características.

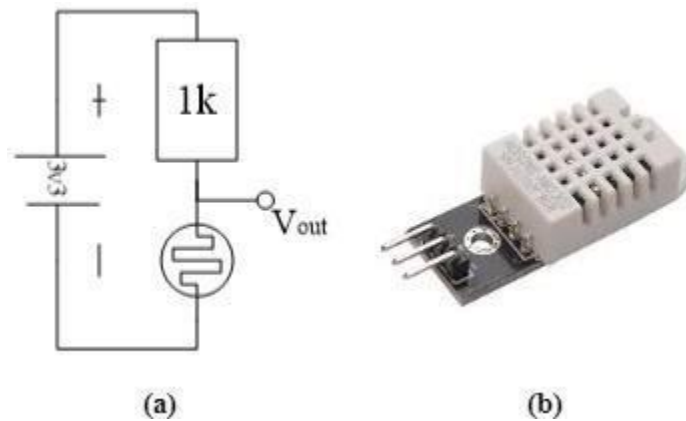


Fig. III.4: Sensores ambiente

Tabla III.II: Características de operación de los sensores

Sensores	Rango de Medición	V_{in} [V]	V_{out} (Analógico)	Característica
Fotorresistencia	0 - 100 %	3.3 - 5	0 a VCC	N/A
DHT22	0-100%RH -40~80C°	3.3 - 6	N/A	digital signal vía single-bus

3) Monitor detector de voltaje y corriente

El monitor de voltaje-corriente (Fig. III.6), monitor de voltaje de bus y de corriente de tres canales con una interfaz I²C el cual incorpora el chip INA 3221(Fig. III.5) el cual monitorea tanto las caídas de tensión de derivación como los voltajes de alimentación del bus además de tener tiempos de conversión programables y modos de promedio para estas señales. Este monitor ofrece alertas críticas y de advertencia para detectar múltiples condiciones fuera de rango programables para cada canal. [30], detecta la corriente en los buses que pueden variar de 0 V a +26 V. El dispositivo está alimentado por un solo suministro de + 2.7 V a + 5.5 V y consume 350 µA (típico) de corriente de suministro. Se especifica en el rango de temperatura de funcionamiento de -40 ° C a + 125 ° C. La interfaz I²C presenta cuatro direcciones programables [30].

Principales características:

- Sensores Voltajes de bus de 0 V a +26 V
- Informes de derivación y voltaje de bus
- Alta precisión: Voltaje de compensación: ± 80 µV (máx.)
- Error de ganancia: 0.25% (máx.)
- Opciones de promedios configurables
- Cuatro direcciones programables
- Operación de la fuente de alimentación: 2.7 V a 5.5 V
- Alarmas programables y salidas de advertencia
- Comunicación de los sensores I²C [30]

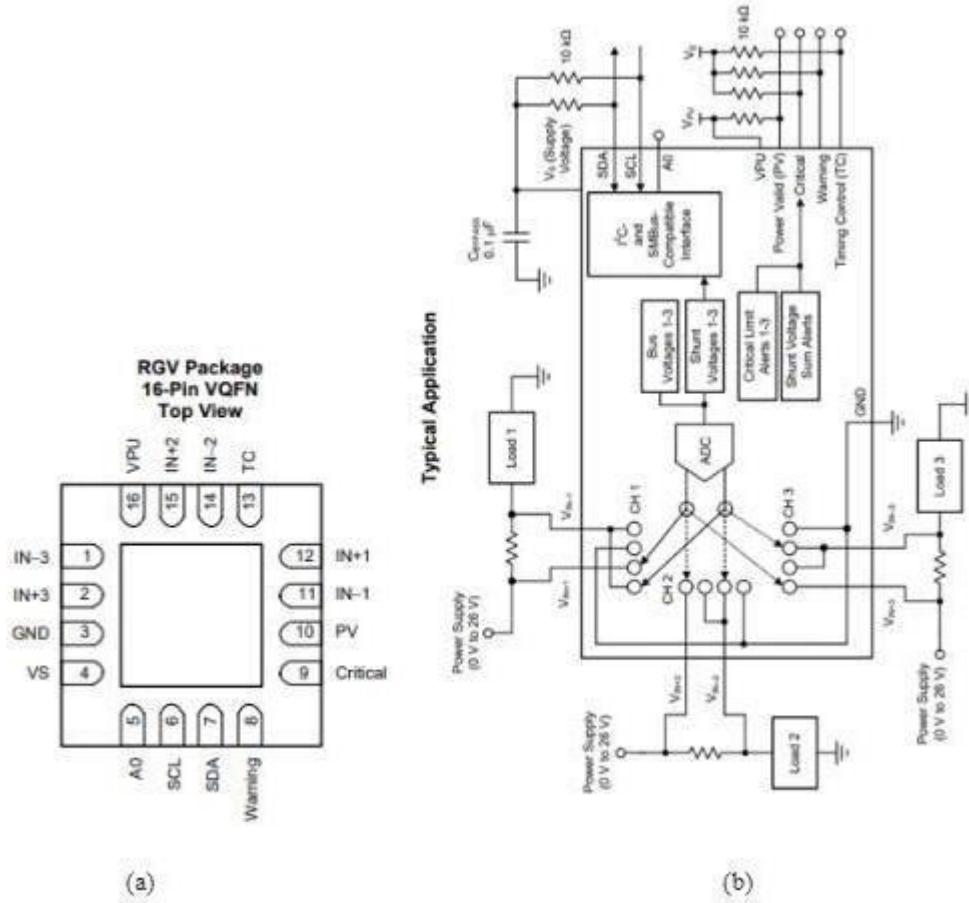


Fig. III.5: INA3221 y aplicación típica.

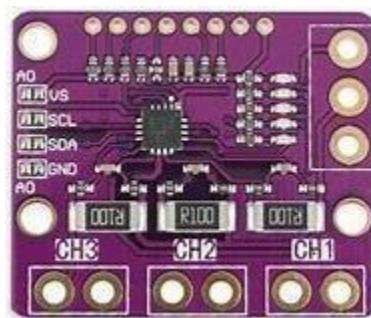


Fig. III.6: Monitor voltaje-corriente.

4) Comunicación con el microcontrolador

a) Protocolo MQTT

“ESP-MQTT es una implementación del cliente de protocolo MQTT (MQTT es un protocolo ligero de mensajería de publicación/suscripción)”[31]. MQTT utiliza TCP/IP para conectarse al bróker. Para el desarrollo de parte de esta investigación, se lleva a cabo el diseño e implementación de un sistema IoT utilizando el protocolo MQTT. Los dispositivos que obtienen información y la transmiten son muy diversos, por lo que los sistemas IoT tiene que presentar una gran adaptabilidad para poder comunicar elementos distintos, con tecnologías diferentes, canales de comunicación diferentes, plataformas y lenguajes de programación diferentes. El dispositivo puede "leer" en la nube (base de datos) y recibe notificaciones cuando hay un cambio en la variable, resalta el hecho que el sistema interactúa con distintos dispositivos con diferentes tecnologías, canales de comunicación y lenguajes de programación, mostrando que el protocolo MQTT puede cumplir esta característica necesaria para los sistemas Iota

El sistema realizado consta de tres clientes y un bróker (Fig. III.7). Los cuales responden a funcionalidades que generalmente presentan los sistemas IoT: elementos que captan información y la transmiten, elementos de gestión y elementos que muestran la información requerida. Un primer cliente se implementa sobre un dispositivo ESP32 que permite la adhesión de sensores externos. Este dispositivo se encargará de medir las diferentes variables de interés del trabajo y transmitirla al sistema. El segundo cliente se implementa sobre un ordenador portátil, que hará la función de gestión del sistema, guardado de los datos obtenidos en base de datos y envío de los mensajes de control o advertencia. En nuestro sistema la plataforma Ubidots actúa como suscriptor. Por último, el sistema contará con un dispositivo móvil o smartphone que obtendrá datos del dispositivo ESP32 y los mostrará al usuario final. También recibirá los mensajes de la plataforma de gestión para mostrarlos al usuario.

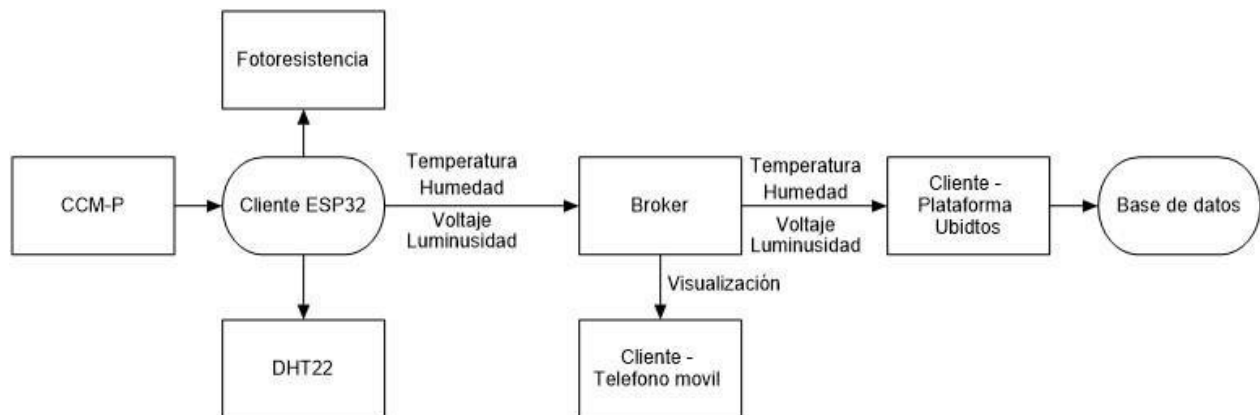


Fig. III.7 Esquema protocolo MQTT

b) Interfaz gráfica

Para el desarrollo de este trabajo se usó Ubidots [32], la cual es una plataforma de IoT (Internet de las cosas) que habilita la toma de decisiones de integración de sistemas a nivel global. Esta interfaz permite enviar datos de sensores a la nube, configurar tableros y alertas, conectarse con otras plataformas, usar herramientas de analítica y arrojar mapas de datos en tiempo real.

Autenticación del protocolo MQTT con la base de datos (Ubidots)

Haciendo uso de la librería "UbidotsEsp32Mqtt.h" [33] descargada de GitHub para IDE Arduino se puede enlazar la placa ESP32 con la base de datos Ubidots. Para interactuar con el bróker MQTT se necesita la dirección de dispositivo con la que se enlaza al bróker y un token (Tabla III.III). el cual es una clave única que autoriza a su dispositivo a interactuar con la API de Ubidots. Para establecer la conexión con el bróker MQTT es necesario asignar el nombre de usuario y la contraseña siguiendo la siguiente tabla:

Tabla III.III: Autenticación (publicación/subscripción)

Credenciales MQTT	Parámetro
Nombre del usuario	Cualquier carácter
Contraseña	Token de Ubidots

5) Adquisición de datos (IoT)

Para esta investigación se implementó un sistema IoT de adquisición de datos en tiempo real, capaz de organizar, almacenar, procesar y visualizar los datos, haciendo uso del microcontrolador ESP32 y de la interfaz gráfica Ubidots, facilitando la monitorización de señales analógicas/digitales (A/D) provenientes de las celdas y los sensores mencionados, además se adquirieron los datos de respaldo en archivos en formato csv, para luego realizar: análisis estadístico de las variables eléctricas y procesamiento digital de las señales.

6) Fuente de alimentación

Por facilidad se utilizó un cargador de celular, para alimentar al sistema de medición. El cargador se une a un cable de poder que posee un sistema de protección ante posible sobrecarga de la red eléctrica. La correcta alimentación se verificó midiendo con un multímetro antes y después de encender el sistema. Y verificando que el voltaje permanece constante y la corriente consumida es menor que la corriente máxima que pueden suministrar el cargador.

7) Modulo shield principal de conexiones

El diseño del sistema de medición se modeló utilizando el software libre Proteus [34] donde se realizaron la comunicación entre los módulos, fuente de alimentación, comunicación con el microcontrolador, detector de voltaje/corriente, detector de humedad y temperatura ambiente, detector de luminosidad, detector de temperatura y humedad del suelo (Fig. III.8). Fue necesario realizar un correcto estudio de las características de cada sensor para el diseño y la distribución espacial de los diferentes módulos, para unas conexiones apropiadas y se reducir el cableado. Para una mejora en el diseño y en su desempeño se decidió comprar una placa de cobre para circuitos y realizar sobre ella las conexiones necesarias. Se realizaron pruebas de continuidad de resistividad con un multímetro para verificar que las conexiones funcionan correctamente.

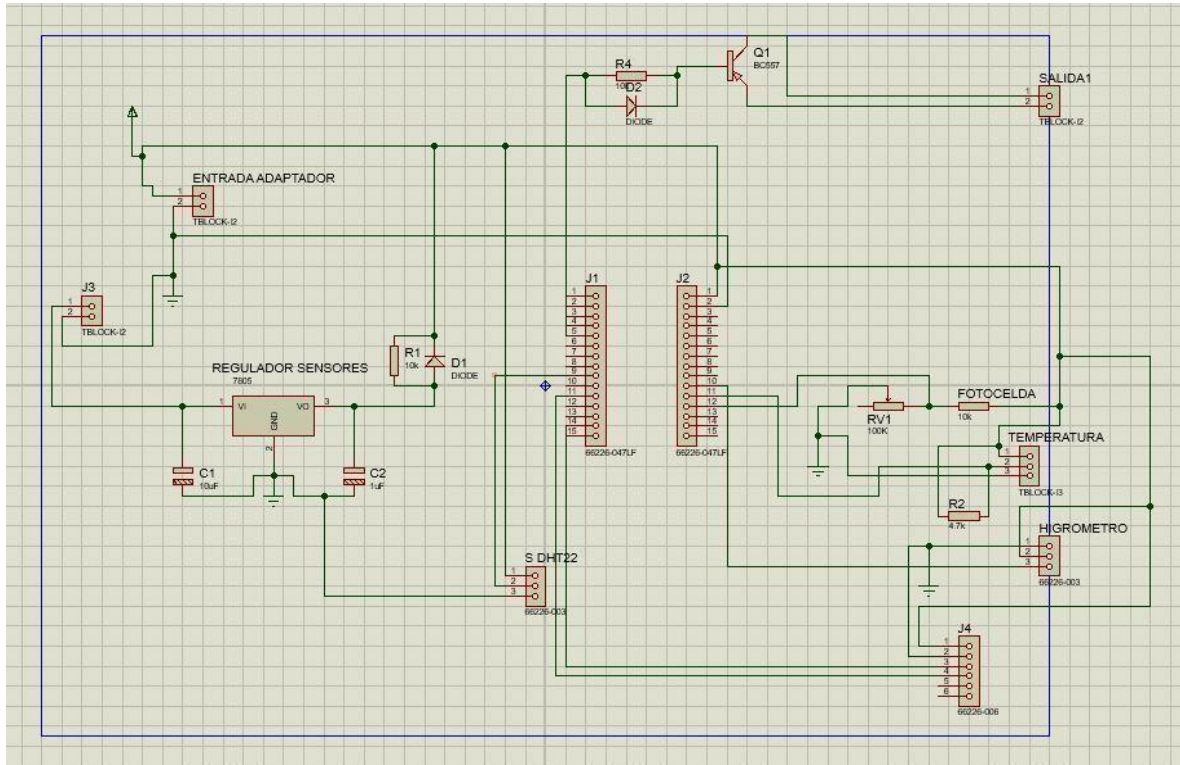


Fig. III.8: Diseño del sistema de medición

8) Algoritmo lógico de programación

Para llevar a cabo el sistema IoT utilizado para el sensado, monitoreo y análisis de las variables que influyen en la producción de energía de las CCM-P, se implementaron varios algoritmos lógicos de programación, implementando mejoras en su funcionamiento, a continuación, describe el proceso completo de procesamiento electrónico-digital de la señal (Fig. III.9).

Algoritmo lógico de programación - Sistema de monitoreo P-MFC - Universidad del Cauca, Ingeniería Física.

VARIABLES PRUEBA 1: Voltaje C1, Voltaje C2.
 VARIABLES PRUEBA 2: Voltaje C1, Voltaje C2, Voltaje C3, Voltaje C4.
 VARIABLES PRUEBA 3: Voltaje C1, Voltaje C2, Voltaje C3, Voltaje C4, Voltaje C5, Voltaje C6.
 VARIABLES PRUEBA 4: Voltaje C1, Voltaje C2, Voltaje C3.
 VARIABLES PRUEBA 5: Voltaje C1, Voltaje C2.

Entradas: Mediciones de Variables de Arduino.
 Salidas: Visualización de las Variables en Ubidots.

```

1. Inicio:
2. Arduino:
    Incluir librerías;
    Declaración de variables de salida;
    Declaración de pines de entrada;
    Creación de los objetos sensores;
    Inicialización de los sensores;
    Inicialización de conexión Wifi;
    Inicialización de conexión MQTT a Ubidots;
    Adquisición de datos;
    Espera activa;
    Publicación;
    Return (variables);
3. Ubidots (variables):
    Creación del dispositivo;
    Creación de las variables;
    Analítica de datos;
    Visualización de datos den Ubidots;
    Espera activa;
    Return (tablas, visualización para datos en Ubidots);
4. Tratamiento de Datos(tablas):
    Adquisición;
    Filtrado en Matlab;
    Visualización de los datos en Matlab;
    Análisis;
    Decisión;
    Return variables y visualización en Matlab;
5. Fin
  
```

Fig. III.9: Algoritmo del sistema de medición

C. Construcción del diseño mecánico de la celda CCM-P

1) Selección de variables de diseños

La potencia de una CCM-P está determinada por varios aspectos: radiación solar, eficiencia fotosintética de la planta, asignación de materia orgánica de la planta al suelo y eficiencia de la celda de combustible microbiana (CCM), entre otros [1]. Es importante saber cuáles son las variables de diseño que influyen en una CCM-P para tener control sobre el diseño de la misma. Las variables consideradas para este trabajo de investigación son: tipo de electrodos, especie vegetal y sustrato de crecimiento [1].

a) Electroodos

Uno de los parámetros más relevantes para la realización del proyecto, si no el más importante, es determinar los electroodos, estas son las dos piezas por las cuales capturamos los pequeños potenciales, debido a esto son uno de los parámetros a tener en cuenta, esta investigación toma como parámetros para la selección de estos componentes, la accesibilidad al material, debido las limitaciones sociales (pandemia) y económicas que se presentaron en el desarrollo de esta investigación, así como los datos de la experimentación que retroalimentaron las posteriores pruebas.

b) Tipo de planta

La especie vegetal a utilizar, pues de ella depende la producción de materia orgánica disponible para el consumo bacteriano, se debe tener presente una idea de cuál va a ser el uso de la celda y su ubicación (ambiente), y qué condiciones necesita para su supervivencia. Para seleccionar la especie vegetal a implementar, dentro de las seleccionadas, se usaron los siguientes criterios: largo de las raíces, lugar de hábitat, condiciones ambientales de crecimiento, área de distribución (si son especies invasoras) y mantenimiento.

c) Sustrato

Además de asegurar la existencia de las plantas y bacterias dentro de la CCM-P, el medio en el cual se lleva a cabo la interacción, planta-bacterias es un actor fundamental para el funcionamiento de la celda como fuente de energía, es decir, se debe tener cuenta el sustrato puesto que la supervivencia de los organismos vivos depende de ello[1] Por tanto, los nutrientes que se agreguen al suelo o al agua (en caso de ser necesario) deben permitir un aumento en el rendimiento general de la planta[1].

2) Diseños

Se realizaron diferentes diseños conforme las necesidades particulares del sistema en un momento dado, es decir que se fueron diseñando diferentes celdas a medida que se requerían cambios para mejorar la eficiencia de las mismas. De esta manera, retroalimentando las nuevas versiones, determinando las ventajas y desventajas de cada uno de ellos y así lograr el diseño más eficiente posible, parámetros que se utilizaron para el prototipo mejorado en software SOLIDWORKS [35].

Para el montaje de la CCM (Fig. III.10), se utilizaron macetas como recipientes de alojamiento, donde se construyeron celdas de cámara simple de electrodos verticales y horizontales con características específicas descritas en las pruebas posteriores, las celdas se crearon dentro del recipiente, añadiendo capas de tierra en medio de los electrodos.

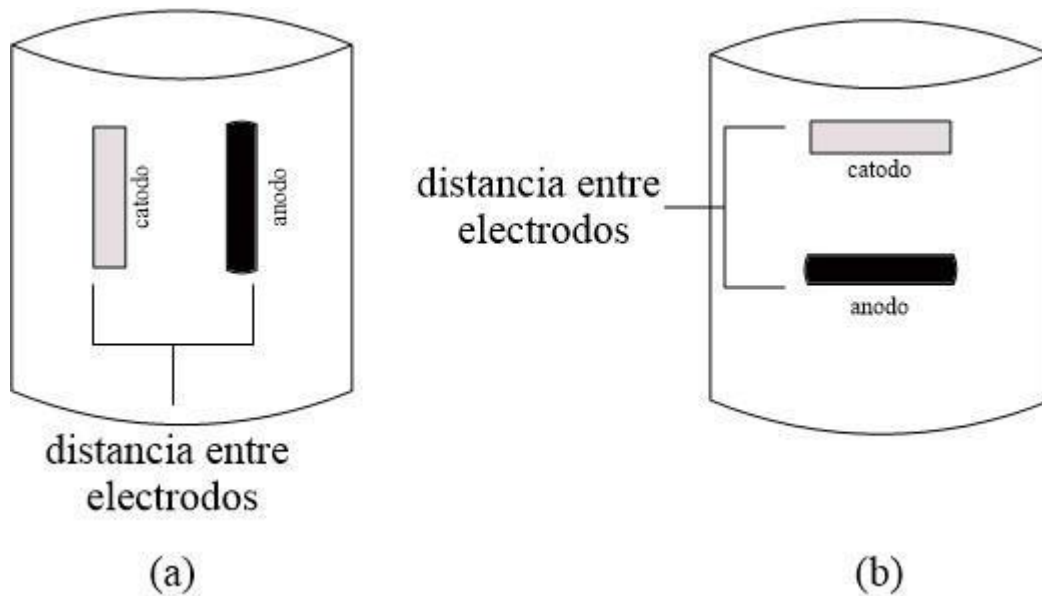


Fig. III.10: Esquemas celdas de una cámara

3) Adquisición de componentes

Primero se adquirieron componentes tales como: electrodos de grafito debido a su alta compatibilidad con organismos vivos, al ser compuesto por carbono, además de esto el grafito brinda una alta conductividad eléctrica, característica principal en la elección del electrodo, posee una superficie porosa maximizando el área de contacto con los microorganismos del proceso, los cuales se obtienen del núcleo conductor de pilas electrolíticas recicladas (Fig. III.11.a), electrodos

de láminas de zinc recicladas utilizadas para techos de viviendas (Fig. III.11.b), láminas de cobre y aluminio.

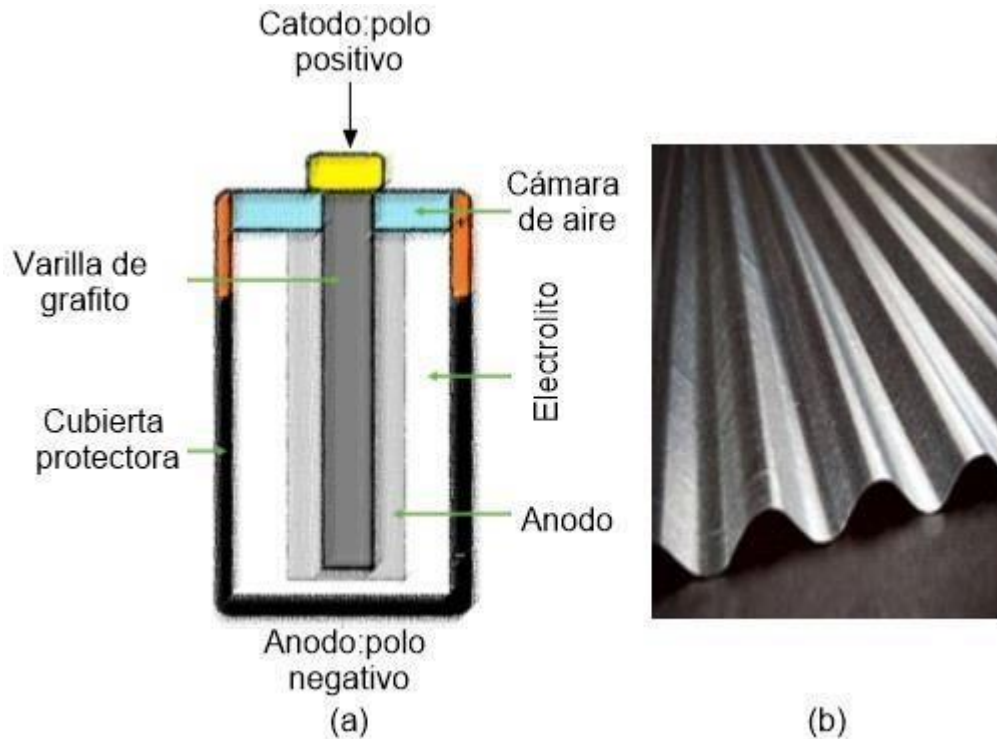


Fig. III.11: Materiales para los electrodos

Por otra parte, algunos de los elementos como los sensores, resistencias, cables y conectores, macetas se obtuvieron comercialmente, el sustrato fue tierra agrícola con una mezcla de cascarilla de arroz y cables conductores UTP CAT5 para conectar a los electrodos.

Trasplante de las plantas utilizadas para su posterior estudio (CCM-P)

Las plantas usadas para esta investigación se obtuvieron de diversos sitios: La planta Lágrima (*Sedum oro japonicum*) (Fig. III.12) proviene de la región norte del Departamento de Nariño exactamente del municipio de La Cruz (1°36'5" N, 76°58'14" W), planta utilizada para decoración en el jardín del domicilio de un autor.



Fig. III.12: Planta Lágrima de bebe

La planta Cinta (*Chlorophytum comosum*) (Fig. III.13) se obtuvo de un brote del jardín del campus universitario de la Universidad del Cauca, ubicada en la ciudad de Popayán, departamento del Cauca ($2^{\circ}26'27.96''$ N, $76^{\circ}36'21.96''$ W), la planta Lengua de suegra (*Sansevieria trifasciata*) (Fig. III.13) se obtuvo comercialmente en la ciudad de Popayán.

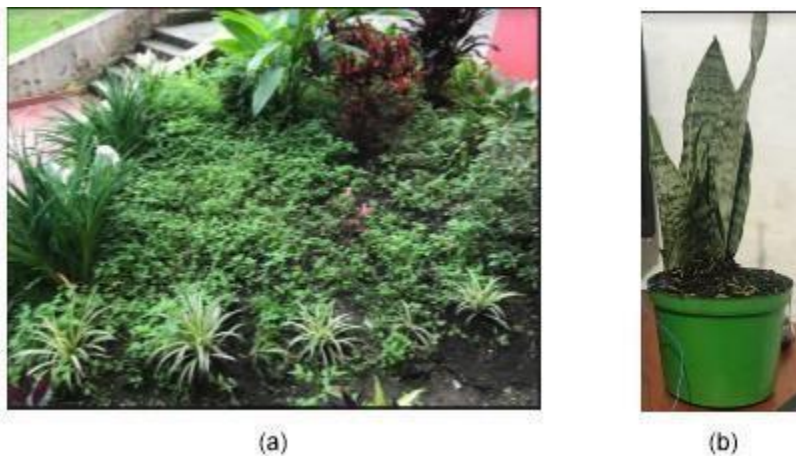


Fig. III.13: Plantas para la investigación

D. Etapas de investigación

1) Pruebas para el desarrollo de la investigación

La investigación realizada es de tipo cuantitativa descriptiva, especificando las variables que permitieron analizar la viabilidad que presentó la obtención de energía eléctrica por medio de una

celda de combustible microbiana por medio de la fotosíntesis de la cinta y lengua de suegra. A continuación, se describen las pruebas que las cuales responden los objetivos y pregunta de investigación.

a) Combinaciones de diferentes materiales, sustratos y comparación del potencial en circuito abierto (OC).

En esta prueba inicial, para tener una primera experiencia con la tecnología, se construyeron quince CCM de igual dimensiones y características de cámara simple de electrodos verticales (Fig. III.10), separados a una distancia de 5 cm entre ellos, en recipientes llenados con suelo agrícola y así formar un sistema CCM con este primer diseño. La tierra (sustrato) se mezcló para lograr una mayor uniformidad, en cada celda se adicionaron compuestos agrícolas utilizados para el cuidado de plantas como lo son la cal agrícola, el abono orgánico y abono inorgánico (NPK, Nitrógeno, Potasio, Sodio) en partes de (1:10) respecto al volumen de sustrato.

Para el estudio de la influencia de los sustratos en el potencial y combinaciones de electrodos en el potencial, cabe resaltar que estos datos se tomaron con un multímetro digital obteniendo así valores instantáneos de la celda, a pesar de ello el dato instantáneo se estabiliza después de algunos minutos o su disminución es muy lenta, con esto se puede obtener unas primeras referencias las cuales comienzan a ubicar la investigación.

b) Prueba de electrodos en posiciones verticales y horizontales a igual distancia.

Para el desarrollo de esta prueba, se construyeron dos celdas de cámara simple (Fig. III.10) con similares características de construcción como: recipiente, cantidad de tierra, tamaño de los electrodos, en la primera se ubican los electrodos en posición vertical, y la segunda en posición horizontal en los dos casos la distancia entre los electrodos fue de 6 cm

c) Efecto de la posición del ánodo y cátodo en su configuración horizontal en una CCM-P con la planta Lágrima.

En esta prueba (Fig. III.14), se diseñaron tres celdas donde estandarizaron con las siguientes medidas: en un recipiente de plástico se comenzó añadiendo una capa de tierra de 5 cm de espesor, luego se colocó el primer electrodo, a continuación, se añade una nueva capa de tierra de 7 cm de espesor, se localiza el otro electrodo y se añade una última capa de tierra en la cual se siembra la planta lágrima. en la celda C1 (Grafito-Zinc) la planta sembrada pesó 140 g, C2 (Zinc-Grafito) 160 g y en C3 (Grafito-Grafito) 68 g, luego de varios días captando la señal de manera manual, se decide conectar el sistema de celdas anteriormente mencionado con el sistema de medición de manera automática y remota.

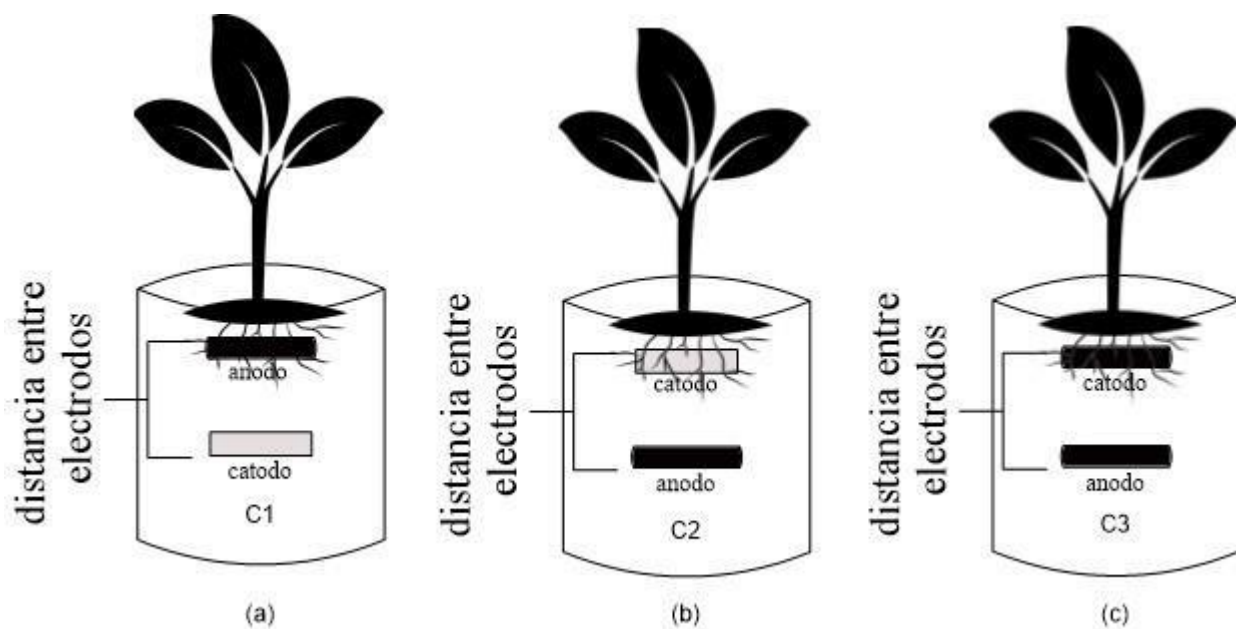


Fig. III.14: Esquemático el efecto de la posición de los electrodos

El riego de las plantas se realizó adicionando 250 ml de agua alrededor de entre las 7 am y 9 am, cada dos a tres días, las condiciones climáticas del municipio oscilan en promedios de temperatura entre 9 °C a 19 °C y un clima predominantemente húmedo debido a que la prueba se realizó en época de invierno, por el momento ésta prueba consta solamente de los voltajes de las celdas al transcurso del tiempo por medio del sistema de medición, dejando de lado por ahora los parámetros ambientales estudiados en secciones posteriores.

d) Efectos del desgaste de los electrodos.

Para evidenciar el efecto del deterioro en los materiales de los electrodos debido a las condiciones y procesos que ocurren en su interfaz, se realiza un registro fotográfico de los electrodos previo a la instalación en la celda y luego al momento del desmonte de la misma, esto con el fin de hacer una comparación cualitativa, y así obtener directrices sobre la vida útil de dichos materiales.

e) Prueba del efecto del área efectiva de los electrodos (CCM-P) con plantas Cintas y su caracterización eléctrica.

Para tener una idea de la relación del tamaño de los electrodos con la señal, se construyeron dos celdas (Fig. III.15) con recipientes de 10 cm de altura, diámetro inferior 9 cm, diámetro superior 10 cm, con una primera capa de tierra de 2 cm, luego se localiza en la primera celda un ánodo y en la segunda dos ánodos, a continuación, una capa de tierra de 5 cm y se coloca un cátodo por cada ánodo puesto, luego una capa final de tierra de 1 cm y se procede a trasplantar las plantas cintas.

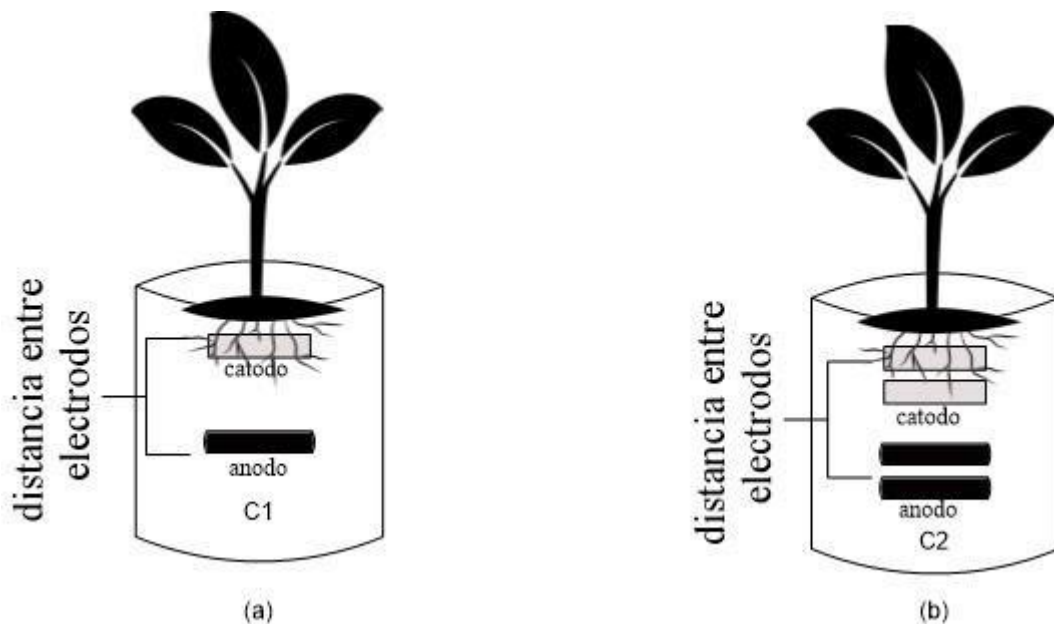


Fig. III.15: Esquemático el efecto del área de los electrodos

f) Efecto de la distancia del ánodo respecto al cátodo en la producción de energía.

Con el fin de encontrar una relación de la profundidad en la que se encuentra el ánodo, y la producción de energía, se realizaron dos celdas (Fig. III.16), estas celdas se estandarizaron con las

siguientes medidas: en un recipiente de plástico de 20.25 cm de altura y 13 cm lado, se comenzó añadiendo una capa de tierra de 7 cm de tierra medidos desde la base, luego se colocó el primer ánodo de grafito, a continuación se añade una nueva capa de tierra de 5 cm de tierra, se localiza el segundo ánodo de grafito y se añade una última capa de tierra en la cual se siembra la planta y justo en medio de sus raíces de la planta se localiza el tercer electrodo, la especie cinta en una celda y lengua de suegra en la segunda debido a que estas plantas presentan raíces largas las cuales están dentro del rango de distancias propuestas por los ánodos, pero además presentan diferencias entre sí, en su morfología.

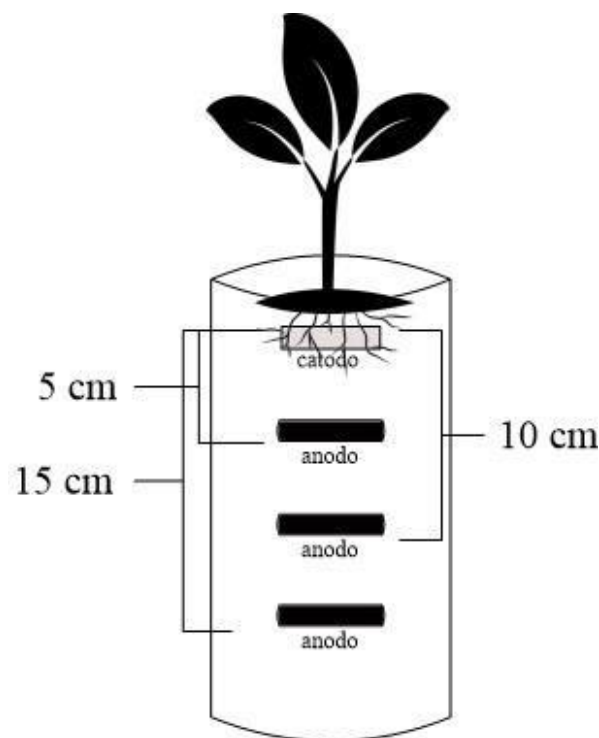


Fig. III.16: Esquema el efecto de la distancia entre electrodos utilizados las plantas Lengua de suegra y Cinta

2) Acondicionamiento de datos

El acondicionamiento digital es parte fundamental del análisis de las señales. Generalmente estas señales cuando son captadas por dispositivos electrónicos sin una correcta etapa de acople y pre-filtrado se contaminan por ruidos con diferentes orígenes, los datos obtenidos en este trabajo generan señales que oscilan en el orden de horas e incluso días, los ruidos de alta frecuencia, no afectan la forma fundamental de las señales, los datos de la señal de interés

tienen información de tiempo, frecuencia, e intensidad permitiendo realizar el análisis de frecuencia e intensidad con ayuda del software MATLAB [36], se acondicionó la señal para un adecuado análisis utilizando conceptos de procesamientos digital de señales como lo son los filtros aritméticos y exponenciales, transformada de Fourier, transformada de Wavelet, entre otros, las gráficas obtenidas sintetizan los datos.

El propósito de este trabajo de investigación fue generar una guía sobre el estudio de las celdas CCM-P, enfocadas a la producción de energía, para ello se obtuvieron datos cuantitativos de variables eléctricas que permitieron analizar objetivamente las celdas, estas son: voltaje, potencia, resistencia, etc., sin embargo, un hallazgo adicional fue el estudio del comportamiento de la señal, las bioseñales que están relacionadas con la salud y el metabolismo de la planta entre otras, cada día despierta gran interés de la comunidad científica.

a) Respecto a la generación de energía

Para un correcto análisis de la producción de energía eléctrica se hace necesario la adquisición de sensores de alta calidad para la captación de las señales eléctricas, debido a limitaciones económicas se hace imposible utilizar estos sensores para cada variable debido a esto se realiza una medición directa hacia el pin de la placa, se realizaron mediciones de resolución con una conversión a voltaje esto con el fin de tener un primer acercamiento a la señal, y observar tendencias, luego para calcular los valores de potencia reales que la planta alcanza, se realizó la adquisición de sensores para ello se utilizó el monitor de voltaje/corriente INA 3221 el cual proporciona una salida calibrada, por los motivos económicos anteriormente mencionados solo se dispuso de dos sensores, el circuito básico de la toma de voltaje y corriente, con estos datos se deben calcular la potencia y la energía del sistema, además de realizar gráficas que interrelacionan la actividad bacteriana con la producción de dicha energía, como lo son la caracterización por horas, por días, etc.

Las malas soldaduras, los cables de baja calidad, la humedad a la que esté expuesto el sistema, el ajuste de impedancias, la red eléctrica, ruido blanco entre muchos otros factores, hacen que los datos obtenidos por un sistema automático de medición, lleve consigo muchas frecuencias parásitas o ruido, para evitar la confusión de los datos a causa de este ruido se realiza el filtrado de las señales provenientes del módulo de adquisición de datos implementado en esta investigación, haciendo uso del entorno MATLAB. El procesamiento se desarrolló en etapas, como primera etapa

se procedió a realizar un filtro de media móvil exponencial con el fin de eliminar los ruidos de alta frecuencia y a su vez caracterizar la celda en términos de su potencia ya que este filtro no altera la señal en comportamiento debido a que se basa en el promedio y además atenúa las señales que causan las frecuencias de ruido, limpiando la señal para el correcto análisis.

Para ello utiliza la fórmula de la forma:

$$A_n = \alpha M + (1 - \alpha) A_{n-1} \quad , \quad \text{III.1}$$

donde:

A_n = Valor Filtrado

A_{n-1} = Valor Filtrado Anterior

M = Valor muestreado de la señal para filtrar

α = Factor que va de 0 a 1

Donde A_{n-1} aporta un suavizado que depende directamente del valor, tiene ventajas en el cálculo ya que utiliza una única instrucción y almacena en memoria solo el valor filtrado anterior. En esta ocasión se utilizó el filtro exponencial como filtro pasa bajos para eliminar ruidos de altas frecuencias en la señal que permite estabilizar la medición de sensores. El factor Alpha es un condicionante para el filtro exponencial y sus valores variables van entre 0 y 1, con ello Alpha igual a 1, entrega una señal sin filtrar y Alpha igual a 0, entrega un valor filtrado siempre 0. Una disminución del valor Alpha aumenta la suavidad de la señal, haciéndola más estable y menos susceptible a cualquier ruido, pero esto también provoca un aumento del tiempo de respuesta del sistema, de alguna forma retrasa la señal respecto de la original. Los valores más habituales van desde 0,2 a 0,6.

b) Respecto a los bioseñales

Para un acercamiento con bases fuertes a esta tecnología, es pertinente hacer un análisis de la señal producida por estas plantas sin carga, dado que la bibliografía reporta datos de potencia muy bajas de órdenes de μW , y en mejores casos mW , el efecto de la carga entonces puede ser un factor que influya en el comportamiento de la señal y/o en el comportamiento de la planta, con el fin de encontrar relaciones de la señal que genera la planta y variables externas a la misma, se tomaron

lecturas de los distintos sensores cerca del entorno de la planta ubicados en una placa de pruebas, se realizaron comparaciones de la señal en circuito abierto y cerrado, también se compararon las variables ambientales con la señal de la celda, recogiendo valiosos resultados.

Estudio en ambiente controlado: Para abordar esta investigación teniendo en cuenta variables externas a la celda, los parámetros ambientales locales son características que determinan condición de vida de las plantas las cuales están estrechamente relacionadas con el potencial producido por las celdas, para esto se instalaron sensores ambientales en las cercanías de las celdas para monitorear estas variables. Cabe resaltar que la investigación hasta el momento de entrega de este documento se encuentra en un nivel de madurez tecnológica (TRLs por sus siglas en inglés - Technological Readiness Level) número 6 (modelo de sistema / subsistema o demostración de prototipo en un entorno relevante)[37], que nos indica que todas las pruebas se realizan en un ambiente de laboratorio.

E. Evaluación del rendimiento eléctrico del sistema

Con los valores de potencial obtenidos de las mediciones en circuito cerrado se analizaron las variables de potencias y energía, como características principales en la generación de energía eléctrica y desempeño. La potencia eléctrica se obtuvo para cada medición de potencial obtenidos utilizando la ecuación de la potencia (eq 3.1).

$$P = \frac{V^2}{R}$$

III.2

V voltaje de la celda [V]

R Resistencia de carga [Ω]

P la potencia eléctrica transferida a la resistencia [μ W]

Para el análisis del comportamiento de la celda a mediano plazo se decide realizar el análisis del promedio diario de estas potencias, primero se filtran los datos por día y se procede a calcular el promedio diario.

$$P_{prom} = \sum_{n_i \in n} P_{n_i} \tag{III.3}$$

siendo P_{prom} Potencia diaria promedio diaria [μW] n:
 número de mediciones por día[entero]

Para analizar la regularidad de la potencia en el transcurso del día, se filtran los datos por hora en cada día de las pruebas y se calcula el promedio de todas las mediciones correspondientes a cada hora, determinada entre las 0 y las 23 (eq 3.2), esta vez con el número de mediciones en cada hora. Mientras que la energía eléctrica diaria en $\mu W \cdot h$ (eq3.3) se calculó una para cada día utilizando las potencias (eq 3.2), como parámetro de entrada.

$$E = P_{prom} * t \tag{III.4}$$

Para con el fin analizar los datos anteriormente expuestos y los datos ambientales, se realizaron cálculos estadísticos descriptivos como lo son los máximos, mínimos, promedios, desviación estándar (eq 3.4) y varianza (eq 3.5).

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - X)^2} \tag{III.5}$$

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - X)^2 \tag{III.6}$$

Para tener una idea cuantitativa del desempeño de la celda se utilizó como referencia el área del ánodo, así podemos estimar extrapolando los datos la tasa promedio de generación de potencia (eq3.6) y de energía (eq 3.7), para caracterizar el rendimiento de las celdas.

$$Tasa P_{prom} = \frac{P_{prom}}{A_{anodo}} \tag{III.7}$$

$$Tasa E_{prom} = \frac{E_{prom}}{A_{anodo}} \tag{III.8}$$

P_{prom} : Potencia diaria promedio [$dia^{\mu W}$]

E_{prom} : Energía diaria promedio [$\mu \text{---} dia^{W*h}$]

A_{anodo} : Área del ánodo [m^2]

IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los resultados más importantes obtenidos en el desarrollo del trabajo de investigación, abordando distintas problemáticas, tanto sociales, tecnológicas y de recursos,

entre otras, posteriormente se abarca el problema de la investigación desde distintas áreas del conocimiento donde se muestran los resultados y la evaluación de las pruebas del sistema.

Las CCM-P fueron elaboradas utilizando la misma técnica, materiales y procedimientos, sin embargo, siempre existirán pequeñas variaciones al momento de su construcción debido a diferentes factores, entre ellos, errores humanos. Esto causa que cada celda tenga desempeños energéticos característicos, por ello se elaboraron varias celdas con la finalidad de tener la opción de abordar de una manera más robusta el estudio de la tecnología y seleccionar aquellas que tengan un mejor rendimiento energético.

La caracterización de las celdas CCM-P, se realizó determinando parámetros eléctricos críticos como: Voltaje de la celda (V_{cel}), Potencia de la celda (P_{cel}), Energía producida por la celda (E_{cel}), y para el desempeño se calcularon las tasas de potencia y energía respecto al área del ánodo, además se tomaron datos de parámetros ambientales como: humedad, temperatura y luminosidad ambiente.

A. Efecto del acondicionamiento en las señales.

El acondicionamiento de señal es uno de los componentes fundamentales para el análisis de las señales obtenidas por el sistema de adquisición de datos. Para el proceso explicativo de las etapas de acondicionamiento se tomaron datos de la prueba “Efecto de la distancia del ánodo respecto al cátodo en la producción de energía”, explicada a detalle en una sección posterior donde se presenta la medición de dos celdas con parámetros de diseño similares, pero con variación en el parámetro planta. Las dos gráficas de voltaje en el tiempo (Fig. IV.1) describen visualmente el efecto de las etapas de filtrado en las señales.

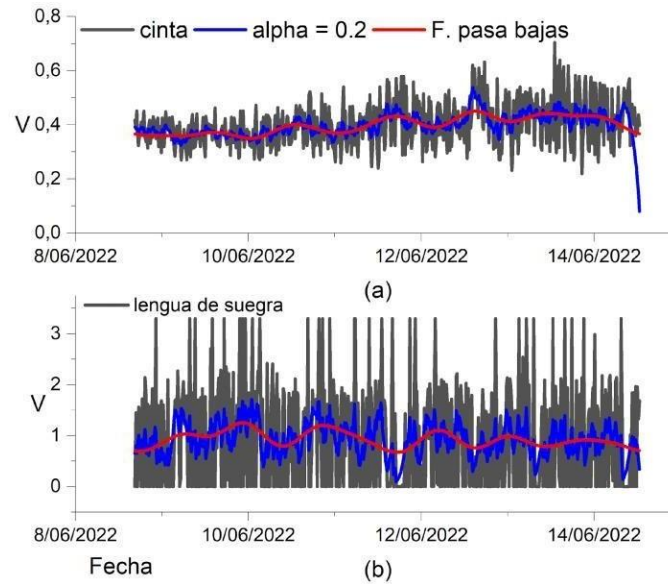


Fig. IV.1: Acondicionamiento de señal eléctrica de las CCM-P

La señal original (negra) de la celda con la planta cinta (Fig. IV.1a) como en la celda con la planta lengua de suegra (Fig. IV.1b) representan los potenciales obtenidos del conversor ADC de la placa, señales con picos(ruido) incluso hasta saturar el rango soportado por la placa ESP32, las líneas azules son la primera etapa de filtrado por medio de un de la media móvil exponencial (EMA), el cual se ajusta un valor de una constante (III.1), para atenuar los picos de la señal original (negra), permitiendo observar tendencias continuas y dominantes, este filtro además es útil para caracterizar las celdas en términos de su potencia, debido a que este filtro tiene al promedio como parte fundamental de su funcionamiento, resultando así de una manera general una señal más limpia. La señal roja representa el resultado de la segunda etapa de filtrado, la cual se compone de un filtro pasa banda, aplicando la transformada rápida de Fourier, que es útil para el estudio del comportamiento de las celdas CCM-P respecto a los parámetros objeto de comparación (temperatura, humedad, luminosidad, todos parámetros ambientales), extrayendo la componente de frecuencia del resultado de las comparaciones en esta segunda etapa, luego realizando la transformada inversa para recuperar la señal. En una prueba posterior se especifica y analiza a detalle esta etapa de filtrado.

Análisis frecuencia-temporal - Wavelet en las señales

Para obtener más información de la señal de los sensores ambiente y encontrar probable relación entre estos y los potenciales de las celdas, se realizó un procesamiento digital de las señales obtenidas de cada sensor de análisis en un espectro de frecuencia-tiempo que proporciona el toolbox wavelet de MATLAB en donde el eje horizontal representa el tiempo de duración (días) de la prueba, el eje vertical el valor de las frecuencias que se encuentran en la señal en (μHz) y una barra de colores, la cual representa la intensidad de las frecuencias en unidades arbitrarias (UA). Las señales muestran los datos de las variables ambientales captadas por el sistema de medición de la prueba mencionada en la sección anterior, en (Fig. IV.2) se encuentra información de las frecuencias que componen a la señal, además la duración temporal de cada frecuencia, también con qué nivel de intensidad se presentaron estas frecuencias, con esto se analiza, cuáles corresponden a eventos transitorios y cuales portan información continuamente, estas últimas frecuencias son objeto de análisis en esta investigación.

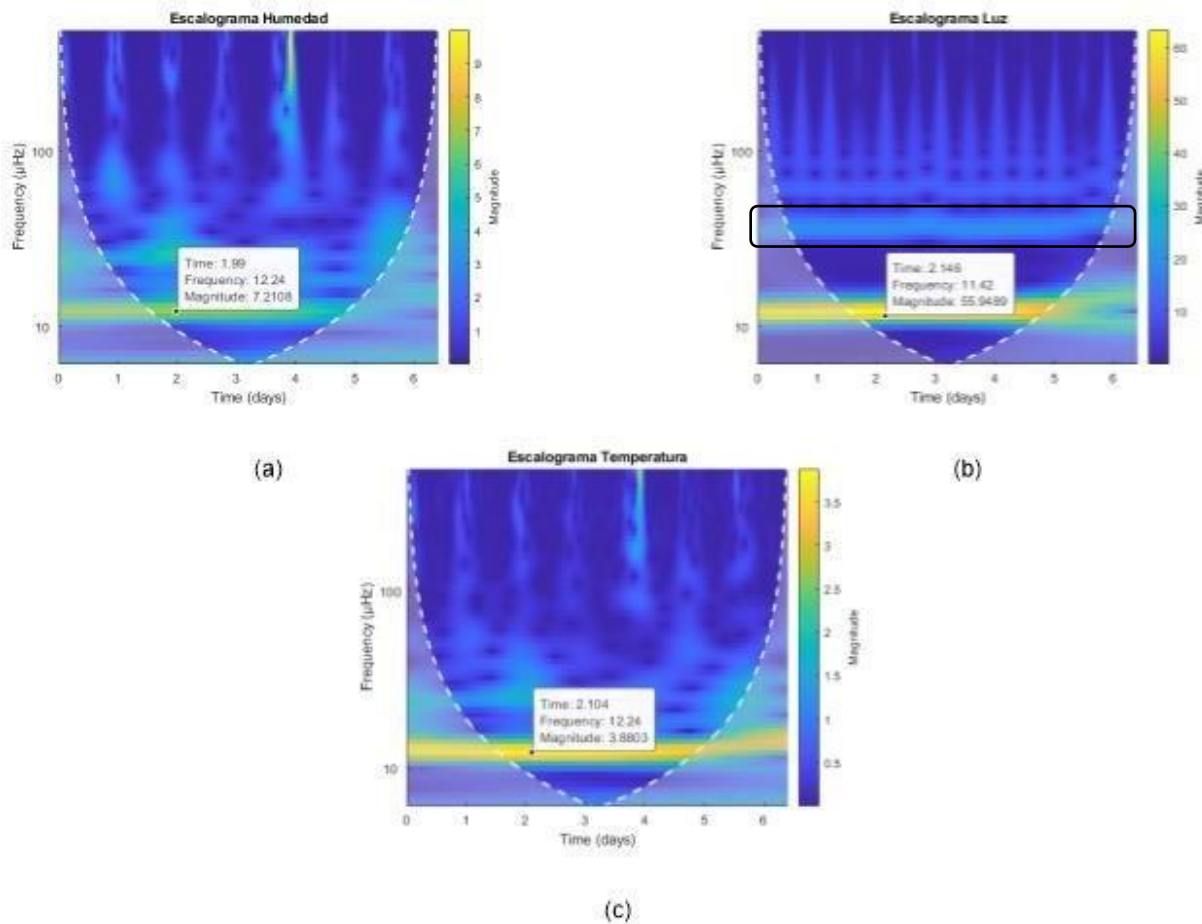


Fig. IV.2: Análisis frecuencia - temporal de variables ambientales

Los escalogramas revelan comportamientos periódicos (baja frecuencia) en los tres sensores ambientales durante la totalidad de la prueba con una banda de frecuencias de alta intensidad alrededor de los 10-14 μHz aproximadamente, la cual está acompañada de señales de menor intensidad, pero de frecuencia superior, una de estas bandas de señal la cual se presenta alrededor de los 50 μHz aparentemente es continua y común en toda la prueba, con leves variaciones de frecuencia e intensidad entre sensores. En los tres sensores además del análisis de la gráfica podemos ver que las señales tienen una característica particular de picos (alta frecuencia) con aparente periodicidad regular, que a modo de observación presentan características que llaman la atención; las (Fig. IV.2a), (Fig. IV.2c) presentan señales de alta frecuencia transitorios pero con periodicidad de una banda por día, la (Fig. IV.2b) presenta la banda de frecuencias (bajas) comunes mejor marcadas que en las (Fig. IV.2a), (Fig. IV.2c), además unas bandas de frecuencia un poco

más altas con presencia en toda la prueba y adicionalmente las señales de alta frecuencia periódicas pero en esta se presenta dos bandas por día.

Una vez realizado el análisis de frecuencia - temporal de las variables ambientales, se procedió a realizar el mismo proceso para dos CCM-P de plantas cinta y planta lengua de suegra (Fig. IV.3). Con el fin de comparar y/o relacionar estas señales, estas imágenes corresponden a los escalogramas arrojados por las celdas de la prueba utilizada en toda esta sección.

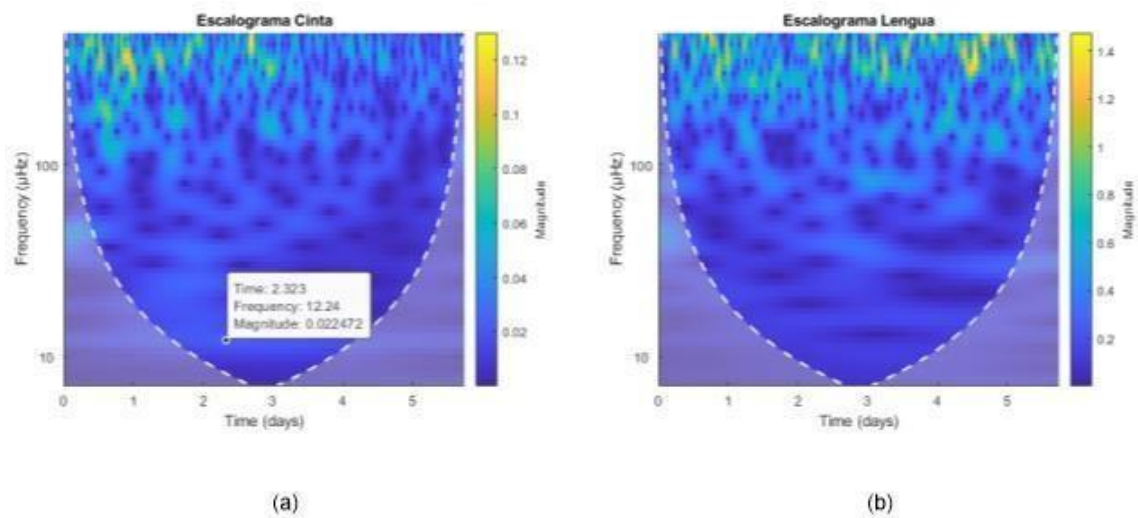


Fig. IV.3: Escalogramas de las CCM-P

Los escalogramas arrojados por las plantas, presentan comportamientos distintos, llama la atención (Fig. IV.3) la presencia de una banda de señal intensa y continua de baja frecuencia (10-14) μHz similar a como se evidencio en los sensores ambiente (Fig. IV.2), aunque con mayor claridad e intensidad en la planta cinta(Fig. IV.3a), junto a ella también aparece aunque difusa y poco clara la segunda señal de interés se observa un incremento de intensidades de las frecuencias alrededor de los 50 μHz (Fig. IV.3) la cual se caracteriza por una menor intensidad y mayor frecuencia, también se evidenciaron indicios de los picos periódicos de alta frecuencia debido al ruido que generan los cables y las conexiones expuestas, y otros factores externos a la prueba, no se permite evidenciar con mayor claridad, se realizaron unas suposiciones respecto a las imágenes presentadas.

La cinta presenta una intensidad mayor en la componente dominante debido a su biología la cual le dota de raíces grandes y tuberculosas las cuales generan mayor cantidad de biomasa o exudados. Hay al menos una frecuencia claramente identificable a lo largo de toda la prueba.

Cabe la posibilidad de que los electrodos estén ajustados para una de las especies, pero no para las otras y esto se manifiesta en la intensidad de las frecuencias, parámetros como el tamaño y longitud de las raíces es un factor a tener en cuenta en próximas pruebas.

B. Combinaciones de diferentes materiales, sustratos y comparación del potencial en circuito abierto (OC).

Para determinar cuál pareja de electrodos sería la más prometedora para ser utilizada en el desarrollo de la investigación y basados en la bibliografía estudiada, además de accesibilidad de los materiales se tomaron tres tipos de sustratos con diferentes características y cinco parejas de electrodos para realizar la siguiente prueba. (Fig. IV.4)

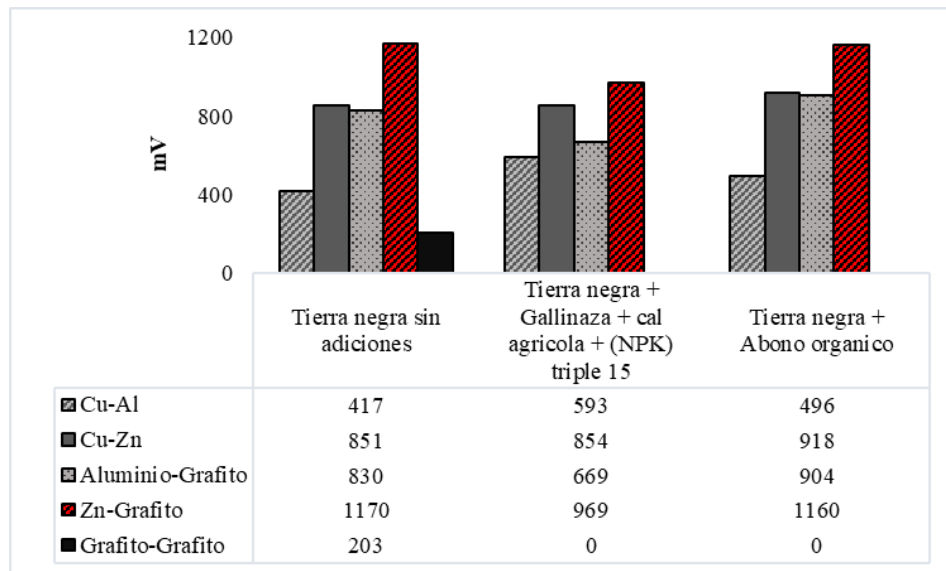


Fig. IV.4: Voltajes de los distintos candidatos de electrodos en distintos sustratos

Se utilizó tierra agrícola de sustrato base y luego se añadieron diferentes tipos de nutrientes comunes en la agricultura colombiana en partes iguales como lo describe la (Fig. IV.4) para luego ser mezclada y depositada en cada celda, posterior a ello se realiza la toma de datos del potencial eléctrico (V_{OC}) con un voltímetro para cada una de las quince CMM con sus diferentes sustratos y

parejas de electrodos; el histograma evidencia situaciones distintas en los tres sustratos, donde la tierra negra sin adiciones fue el mejor medio o sustrato para la realización de esta prueba y en cuestión de la mejor pareja de electrodos, la pareja de grafito como (ánodo) y zinc como (cátodo) obtuvieron un potencial considerable respecto a las demás parejas de electrodos, brindando así los primeros resultados para cumplir los requerimientos propuestos.

C. Prueba de electrodos en posiciones verticales y horizontales a igual distancia (6 cm).

Una vez elegida la pareja más prometedora de electrodos para la implementación de la celda, la pareja grafito como ánodo y zinc como cátodo, se procedió a comparar el porcentaje relativo de los potenciales (Fig. IV.5), con el propósito de caracterizar la ubicación de los electrodos respecto a una horizontal o una vertical, en estas celdas no existe el parámetro planta, y por ende tampoco la rizosfera la cual se genera en las raíces de la misma, debido a esto se asumió que la diferencia de potencial de los materiales es característica de cada configuración.

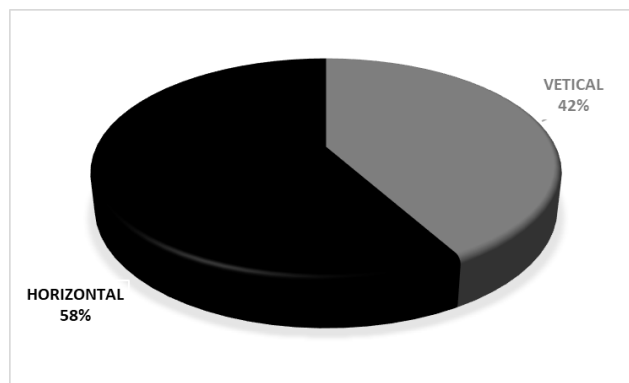


Fig. IV.5: Desempeño del potencial que genera la posición de electrodos en las celdas

Una vez montadas las dos celdas CCM, se procedió a adquirir los datos por medio del sistema de adquisición de datos (IoT), donde se obtuvieron 120 datos para cada una de las celdas. La primera prueba se realizó con el montaje de una celda CCM con electrodos verticales, debido a su fácil montaje. Para la segunda prueba se decidió implementar por consecuencia del estudio bibliográfico la configuración con electrodos horizontales, obteniendo así, después de promediar los valores tanto de la configuración de electrodos en vertical como horizontal, que la celda con ánodos horizontales presenta condiciones más eficientes, evidenciando así claramente un mejor desempeño en el voltaje adquirido, obteniendo 915 milivoltios, que corresponden al 58% respecto a 589

milivoltios, correspondientes al 42% del total del voltaje obtenido en la prueba (Fig. IV.5), valores promediados, por lo tanto se adoptó este diseño para las posteriores pruebas. Con esta prueba se cumple el segundo requerimiento, que habla del diseño en la colocación de los electrodos, corroborando una vez más, lo descrito en la literatura que ha sido de referencia para la elaboración de esta investigación.

D. Efecto de la posición del ánodo y cátodo en su configuración horizontal en una CCM-P con la planta Lágrima.

Se realizó el montaje de tres CCM-P (Fig. IV.6), con la planta lágrima para el análisis de la influencia de la posición de los electrodos en su diseño horizontal en la producción del potencial y comparar lo reportado en artículos investigados. Los tres prototipos de celdas se crearon desde el inicio de esta investigación para además de lo anterior, estudiar el desgaste de los materiales y la intensidad de la señal en el transcurso del tiempo, debido a que en esta etapa el sistema IoT aún no se desarrollaba primero se realizó el seguimiento de la señal con un voltímetro de manera manual obteniendo valiosa información y posteriormente se realizaron las pruebas con el sistema IoT.

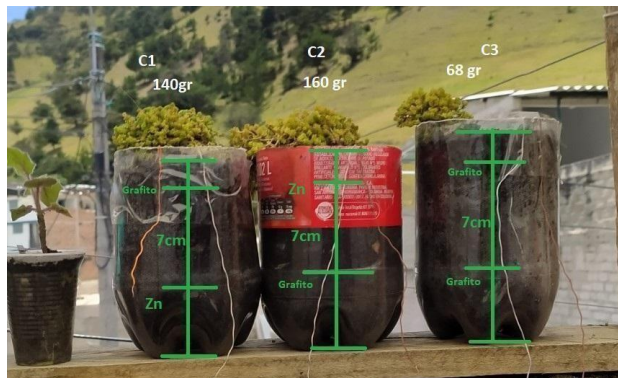


Fig. IV.6: Montaje de las CCM-P con la planta lágrima

Los datos que describen la prueba se anexaron en la tabla de la ficha técnica (Tabla IV.I) en la que se destaca el largo periodo de duración de la prueba y debido a que fue tomada manualmente el tiempo de muestreo no es continuo.

Tabla IV.I: Ficha técnica de la medida

CRITERIO	DESCRIPTOR	UNIDADES
----------	------------	----------

No	1.1	consecutivo
Prueba	Efecto de la posición del ánodo y cátodo en su configuración horizontal en una CCM-P con la planta Lágrima	
variables eléctricas	3	
variables ambientales	0	V
Tiempo de muestreo	NA	%/°C
Muestras	108	min
Duración	28,28	días
Inicio	22/09/2021	fecha
Final	20/10/2021	fecha

Para obtener el primer análisis en la gráfica se documentaron los voltajes obtenidos manualmente con un voltímetro en distintas horas del día, luego se filtraron por día, a los cuales se promedió para obtener un solo valor de voltaje por día (Fig. IV.7). Los potenciales se tomaron desde el día de la creación física de la celda. La gráfica (Fig. IV.7) representa los promedios diarios de los potenciales de las celdas.

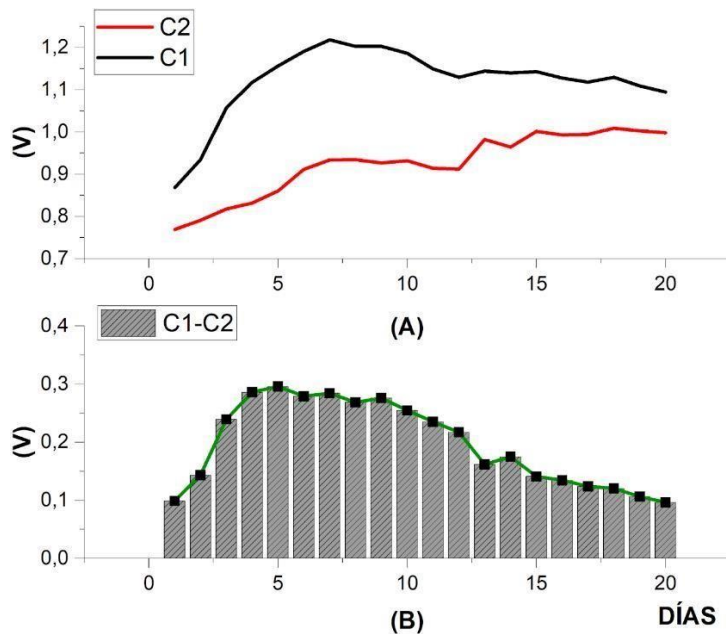


Fig. IV.7: Señal de las celdas C1 Y C2 (prueba 1)

En esta gráfica (Fig. IV.7 a) que relacionan el potencial de las celdas (eje vertical) con los días transcurridos de prueba (eje horizontal), se obtuvieron dos señales (líneas), donde la línea negra representa el potencial de la celda C1 y la línea roja el potencial de la celda C2, se monitorean con el fin de determinar el potencial promedio producido por las celdas, y comparar este dato característico de cada configuración (C1, C2), para determinar cuantitativamente la elección del mejor diseño de celda, cuyo resultado arroja que la configuración C1 es la mejor opción puesto que los datos obtenidos muestran un claro dominio en toda la prueba, pero como se observa (Fig. IV.7 a), el comportamiento resulta un poco más interesante, las dos señales producidas por las celdas, muestran inicialmente una etapa de crecimiento desde el día uno hasta el día siete de la prueba aproximadamente, se asume este comportamiento a la formación de la biopelícula de bacterias eléctricamente activas, C1 evidencia con mejor detalle la discusión, C2 por otra parte en las proximidades del día siete entra en una etapa de amortiguamiento en donde los potenciales de la señal se mantuvieron muy cercanos, después de esta etapa, las celdas se comportan de manera distinta, C1 llegó al máximo y comenzó una etapa de decrecimiento de la señal, y por su parte C2 retoma una etapa de crecimiento, la diferencia de las dos señales (Fig. IV.7 b) visualiza como la diferencia de potencial entre las celdas disminuye al transcurso de los días, concluyendo que la decisión tomada respecto a la configuración, debe ser evaluada y corroborada con más experimentación.

La celda C3 (Fig. IV.8) se estudia de manera individual ya que el parámetro de estudio contemplaba la ubicación de los electrodos y no el cambio de material de los mismos, sin embargo, es una prueba que tiene información que aportar.

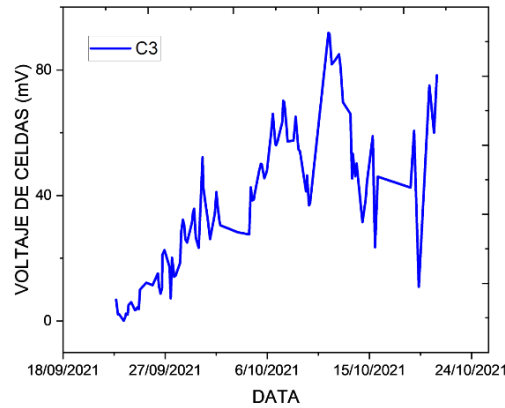


Fig. IV.8: Señal de la celda C3 (Prueba 1)

De igual manera que en la (Fig. IV.8), se evidencia un aumento significativo y continuo en el voltaje de la celda al transcurso de los días, atribuido a las causas mencionadas en el análisis anterior, cabe resaltar que el potencial de la prueba grafito-grafito es significativamente menor, al producido por grafito-zinc, pero además existe una dispersión pronunciada en la toma de datos a esto aún no se tiene explicación física en el presente trabajo, se hace necesaria más evidencia, y una mejor captura de datos. Por último, se evidenció que el riego constante y periódico del agua está estrechamente relacionado con el aumento de la señal dado que minutos después de agregada el agua en la celda, se evidencia un aumento de voltaje, dando indicios de posibles señales relaciones con los sensores. Días después de la prueba anterior se realizaron otras pruebas con el mismo montaje, monitoreando los potenciales producidos por cada celda, esta vez se implementó el sistema IoT para la adquisición de los datos

TABLA IV.II: Ficha técnica de la prueba (a) y (c)

CRITERIO	DESCRIPTOR	UNIDADES
No	1.5	consecutivo
Prueba	Efecto de la posición del ánodo y cátodo en su configuración horizontal en una CCM-P con la planta Lágrima	
variables eléctricas	3	V %/°C

variables ambientales	0	
Tiempo de muestreo	NA	min
Muestras	70	muestras
Duración	2,92	días
Inicio	1/11/2021	fecha
final	4/11/2021	fecha

Una prueba que duro alrededor de 3 días con muestras cada 15 minutos, e inicio el 1/11/2021 y conto con 70 muestras en total.

TABLA IV.III: Ficha técnica de la prueba (b) y (d)

CRITERIO	DESCRIPTOR	UNIDADES
No	1.9	consecutivo
Prueba	Efecto de la posición del ánodo y cátodo en su configuración horizontal en una CCM-P con la planta Lágrima	
variables eléctricas	3	V
variables ambientales	0	%/°C
Tiempo de muestreo	NA	min
Muestras	76	muestras
Duración	3,13	días
Inicio	9/11/2021	fecha
final	12/11/2021	fecha

Una prueba que duro alrededor de 3 días con muestras cada 15 minutos, e inicio el 9/11/2021 y conto con 76 muestras en total.

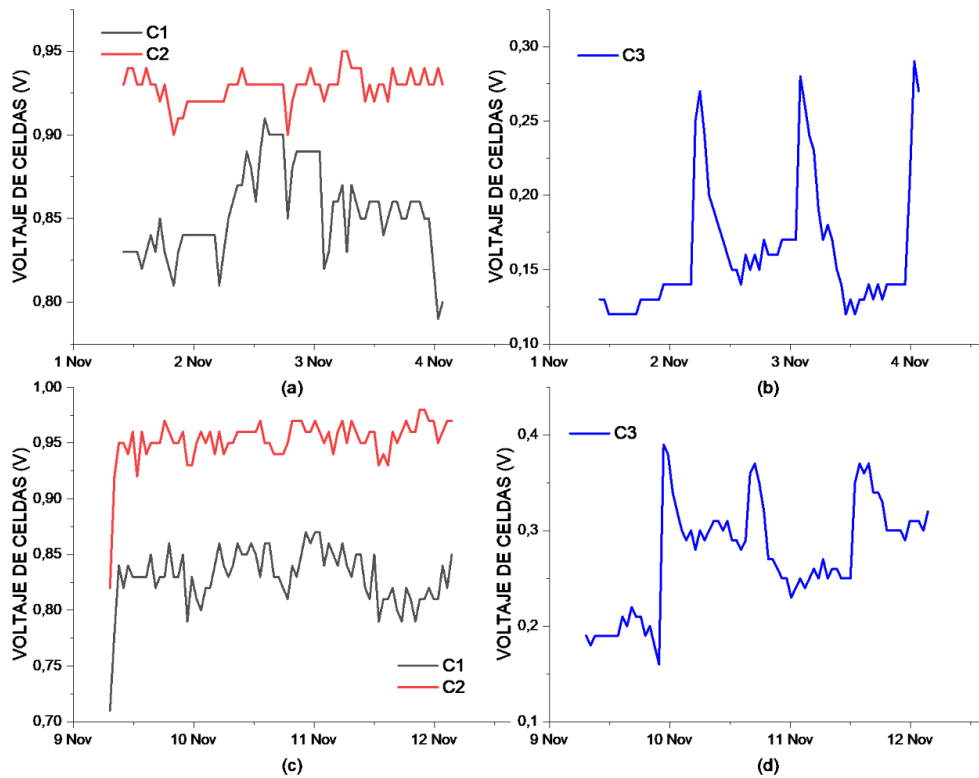


Fig. IV.9: Señal de las celdas C1 C2 y C3 (prueba 2)

la celda C2 presentó un mayor potencial (Fig. IV.9 a) (Fig. IV.9 c) justo como se esperaba que ocurriera debido a que la resta (Fig. IV.7 b) de los potenciales en la prueba anterior mostraba esta tendencia, esto se asume a las condiciones del ánodo, que aun estando más distante de la base de las raíces de la planta, el fondo de la celda tiene menos oxígeno libre y por lo tanto favorece las condiciones anaeróbicas para la generación de este potencial además los datos de estas presentan tendencias estables en las dos pruebas, con esto se concluye que los datos obtenidos son característicos de la configuración. La celda C3 por su parte muestra claros picos al adicionar agua y en el transcurso del día descende (Fig. IV.9 b) (Fig. IV.9 d), lo cual se asocia a la pérdida de humedad del suelo, y por lo tanto a la disminución de la conducción eléctrica, retomando la posibilidad de una probable aplicación de biosensores teniendo en cuenta las ventajas de utilizar estos materiales anticorrosivos y de bajo costo en relación a los sensores actualmente disponibles en el mercado.

La cosecha de energía requiere un parámetro fundamental que acopla a la fuente que emite la energía con el dispositivo que lo almacena, este parámetro es el voltaje, se realizó el dimensionamiento de una planta de carga de baterías de litio de 3,7 V y 1500 mA, para una potencial aplicación.

El promedio de voltaje de la celda C2 es de 0,95 V, para alcanzar el valor de voltaje de alimentación de la batería y con respecto a los datos reportados, se requiere de una conexión en serie de tres CCM-P de iguales características a las de la prueba para alcanzar 3,9 V, los cuales posteriormente son regulados por el módulo de regulación de carga de la batería.

E. Efectos del desgaste de los electrodos

En esta prueba consta del registro fotográfico para una apreciación cuantitativa del desgaste de los electrodos (Fig. IV.10), específicamente el que se compone de metal debido a que es este el que se oxida, la celda fue creada el día 22 de septiembre del 2021, con la cual se realizaron algunas de las pruebas analizadas en este capítulo, posteriormente se desmontó el día, 8 de abril del 2022, casi siete meses después de su montaje con esto se pretende tener una idea cualitativa de la vida útil de estos materiales.

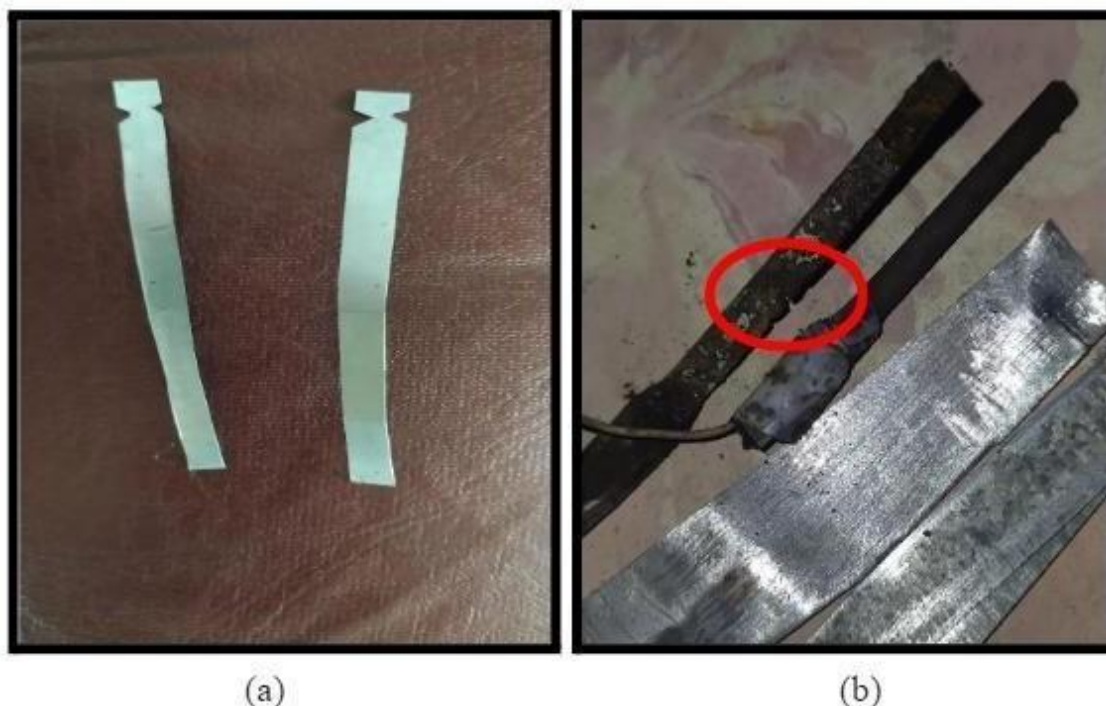


Fig. IV.10: Efecto del tiempo en los electrodos

Se pudo constatar cómo el paso del tiempo y las condiciones del entorno a las que se encuentran sometidos los electrodos deteriora y acelera su vida media: el grafito visualmente no evidencia gran diferencia, se necesitan más pruebas en los que se tenga en cuenta la masa antes y después para determinar su desgaste físico. Por otra parte, en el electrodo de zinc el deterioro es más evidente debido a la naturaleza del material metálico (Fig. IV.10 b) el cual ha adquirido el color típico de la oxidación además de esto se observa la destrucción física del material en algunas partes de la lámina.

F. Prueba del efecto del área efectiva de los electrodos (CCM-P) con plantas Cintas y su caracterización eléctrica.

Para tener una idea de los potenciales que genera esta tecnología, se comparó dos celdas CCM-P con la planta cinta, de características similares en su estructura y distancia de electrodos, aumentado el área efectiva de los electrodos una de la otra celda (Fig. IV.11). Ésta prueba consta de un seguimiento de seis días aproximadamente sometidas al clima de Popayán, donde se monitorean datos de variables ambientales (temperatura, humedad, luminosidad) y las señales de voltaje, corriente que producen cada una de las CCM-P bajo la influencia de una carga. La ficha técnica de la medida (Tabla IV.IV), destaca las variables y parámetros característicos que describen las generalidades de la prueba realizada.



Fig. IV.11: Montaje de la prueba: dos CCM-P con plantas cintas

Tabla IV.IV: Ficha técnica de la prueba

CRITERIO	DESCRIPTOR	UNIDADES
Prueba		
variables eléctricas	Efecto del tamaño de los electrodos (CCMP)	
	6	V
variables ambientales	3	%/°C
Tiempo de muestreo	15	min
	552	muestras
Muestras		
Duración	5.8	días
	8/6/2022	fecha
Inicio		
final	14/6/2022	fecha

Para garantizar el monitoreo de los parámetros ambientales en las cercanías a la planta se presenta la tabla de los datos estadísticos de operación ambiental otorgados por el sistema de medición (Tabla IV.V), estas variables cumplen una función fundamental al momento del análisis de las señales y su correlación con las variables ambientales monitoreadas.

Tabla IV.V: Datos estadísticos ambientales de la prueba

CRITERIO	HUMEDAD [%]	LUZ [%]	TEMPERATURA [°C]
MAX	98.30	100.0	35.30
	90.79	47.71	20.43

PROMEDIO	50.80	0.00	14.60
MIN			
RANGO	47.50	100.00	20.70
	12.65	49.10	4.72
DESVIACIÓN [U]	159.92	2410.82	22.28
VARIANZA [U2]			

Los rangos ambientales presentan dominios amplios, la variable de luminosidad idealmente debió terminar en 50% de dato promedio, garantizando una formación simétrica de los días y las noches muestreados, pero en este caso el promedio (47.71%) indica la simetría de la medición, lo que indica que en la prueba predominó la fase nocturna. La humedad a pesar de tener mínimos cercanos al 50%, estos son durante periodos cortos de tiempo ya que su promedio se sitúa cerca del 90% acorde al promedio de humedad relativa informado por la plataforma Google al igual que la temperatura. Con esta prueba se analizó la relación de área de superficie efectiva de los electrodos en la producción de energía de las celdas CCM-P de cámara simple, donde se realizaron gráficas del comportamiento de las variables respecto al tiempo (Fig. IV.12), en las cuales se observaron las primeras tendencias.

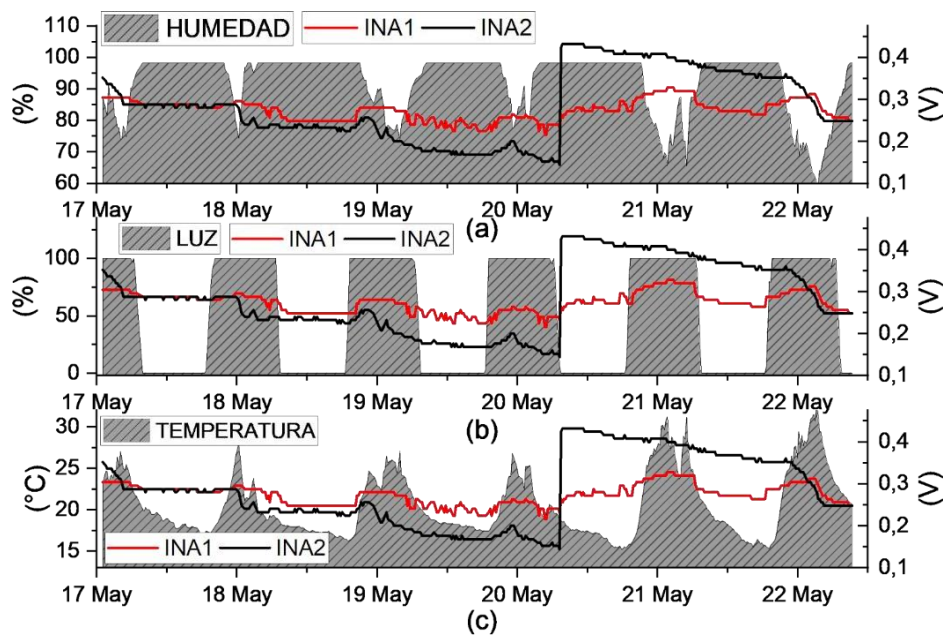


Fig. IV.12 Señales de la prueba en el paso del tiempo

Analizando las gráficas (Fig. IV.12) de la señal en el tiempo, se visualiza los voltajes obtenidos por los sensores conectados a las dos celdas las cuales INA1 (línea roja) representa la señal captada por el monitor de voltaje de la celda diseñada con un par de electrodos (Fig. III.15.a) y INA2 (línea negra) representa la señal captada por el monitor de voltaje de la celda diseñada con dos pares de electrodos (Fig. III.15.b) y las señales captadas por los sensores (áreas), se observan posibles relaciones proporcionales del voltaje de las celdas y las señales ambientales, debido a que se evidencia picos de voltaje en el transcurso de la fase diurna y valles de voltaje en la noche (Fig. IV.12.b). Respecto a la humedad del suelo existe otra nueva evidencia de la probable relación proporcional con el voltaje ya que el día 20/05/2022 a las 18:20 (aprox), se añadió 350 mL (aprox) de agua evidenciando el aumento del voltaje y disminuyendo progresivamente al paso de los días (Fig. IV.12), lo que se relaciona con la retención de humedad del suelo, ya que al presentar mayor humedad en el sustrato, la conducción de energía eléctrica se ve favorecida reflejado en el aumento de voltaje en la señal y por efecto de la gravedad la humedad desciende haciendo cada vez más difícil la conducción evidenciado en la disminución paulatina de la señal. Para el estudio de la generación de energía eléctrica. La prueba se desarrolló en circuito cerrado, se procedió a calcular parámetros como la potencia y la energía que generaron las celdas durante los seis días de estudio, en esta etapa se calcula promedio diario de la potencia y la energía (Tabla IV.VI).

Tabla IV.VI: Valores del área del ánodo y resistencia de carga de las celdas

NOMBRE DE LA CELDA	ÁREA DEL ÁNODO [m ²]	RESISTENCIA [KΩ]
Celda un Par de Electrodo	0.0015	469
	0.0030	469
Celda dos Pares de Electrodo		

Para caracterizar la generación de energía eléctrica de las dos celdas se presenta a continuación la tabla que describe los parámetros eléctricos característicos respecto a cada día de la prueba, además se determinó la producción de potencia eléctrica promedio diario (Fig. IV.13) y la producción de energía eléctrica promedio por horas (Fig. IV.15), obteniendo datos que describe el comportamiento de las CCM-P, con el objetivo de tener un parámetro de la generación de electricidad.

A continuación (Tabla IV.VII), se representa los valores de los promedios diarios de las potencias (P1, P2), tasas de potencias (Tasa_P1, Tasa_P2), energía (E1, E2) y tasas de energía (Tasa_E1, Tasa_E2) durante la prueba, obtenidos para la caracterización del comportamiento eléctrico de los dos prototipos bajo la influencia de una carga.

Tabla IV.VII: Caracterización de la generación de energía eléctrica durante la prueba

DÍA	P1 [uW]	Tasa_P1 [uW/m ²]	E1 [uWh]	Tasa_E1 [uWh/m ²]	P2 [uW]	Tasa_P2 [uW/m ²]	E2 [uWh]	Tasa_E2 [uWh/m ²]
17	0.19	125.37	3.72	2507.31	0.19	129.78	3.86	2595.59
18	0.16	108.95	3.24	2179.04	0.14	95.54	2.84	1910.90
19	0.14	95.90	2.85	1917.98	0.10	66.28	1.97	1325.62
20	0.13	90.18	2.68	1803.56	0.15	98.58	2.93	1971.60
21	0.19	126.08	3.75	2521.50	0.34	226.58	6.73	4531.69
22	0.17	112.99	3.36	2259.73	0.22	147.20	4.37	2943.90
Promedio	0.16	109.91	3.27	2198.19	0.19	127.33	3.78	2546.55

Luego de estudiar el comportamiento de la potencia de las CCM-P (Tabla IV.VII), se evidencia una generación continua en las dos celdas durante toda la prueba, se comprueba la generación continua de energía por al menos 5 días, debido a que la prueba es desarrollada en circuito cerrado. Como se observa en fila de promedios(Tabla IV.VII), la celda con dos pares de electrodos representa el 54% de la potencia promedio que se generó en la prueba con un valor de $0,19 \mu\text{W}$, esto evidencia un aumento de 8% respecto a la prueba de un par de electrodos, debido a estos resultados se concluye que el método no es viable en el proceso de aumentar el rendimiento, se decidió entonces hacer el posterior análisis tomando en cuenta sólo los datos de la celda que contiene un par de electrodos, la tasa de potencia promedio de esta celda es de $109,91 \mu\text{W/m}$.

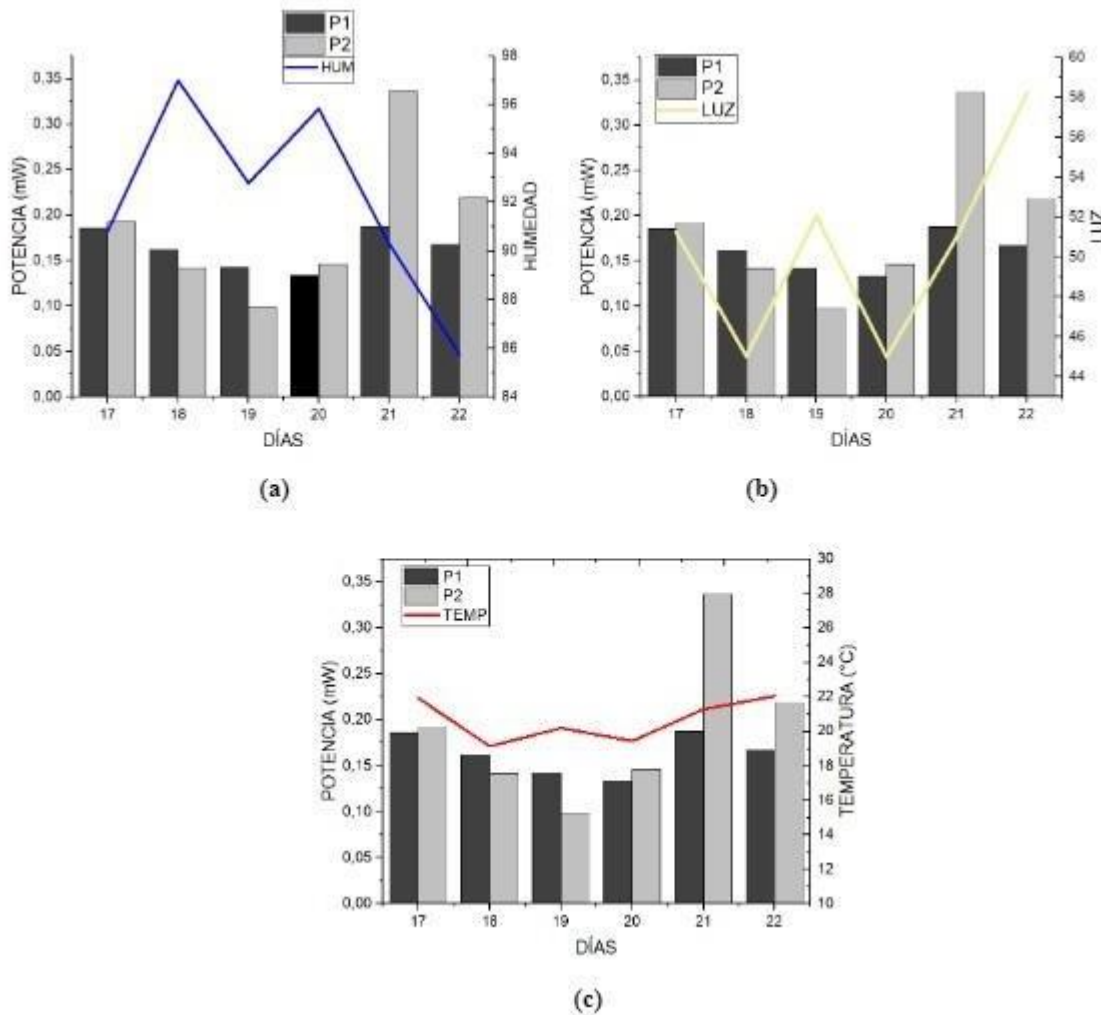


Fig. IV.13: Promedios de potencia por día con las variables ambientales

El análisis de la transferencia de potencia es uno de los parámetros que hasta el momento no se había tenido en cuenta para el desarrollo de esta investigación, donde se relaciona el promedio de potencia diaria de cada celda con las variables ambiente en un gráfico de dos ejes donde el principal eje representa las potencias transferidas a la carga por las celdas y el eje secundario, muestra los valores de la variable ambiente durante el transcurso de toda la prueba (Fig. IV.13). Analizando la potencia diaria de promedio de las celdas, las dos celdas se comportan de manera similar, además que los valores de potencia reportados en la prueba no son los esperados, ya que al duplicar el área superficial de los electrodos se esperaba un aumento del doble de su capacidad o cercano. El día 21 presenta un pico irregular debido a que este valor se ve influenciado por el agua del riego de la planta que se realizó este día, se hace presente una aparente relación proporcional con la temperatura ambiental, esto da indicios a un biosensor ya que es una señal eléctrica la cual reacciona a variables externas, además, esta señal podría estar relacionada con la salud de la planta, debido a que su entorno, genera las condiciones de vida de la planta y por ende el rendimiento de la celda, estas señales abren una posibilidad a el estudio y la caracterización de especies vegetales, con distintos fines (ambiental, productivo, investigativo, etc.). Para fines de la investigación más a fondo de esta relación se procedió a realizar un procesamiento de la señal en el software MATLAB, aplicando filtros para la reducción de ruido y posteriormente el acondicionamiento de las señales con la ayuda de la transformada de Fourier en esta gráfica se relaciona la señal tratada de la temperatura y la señal tratada del voltaje de la celda C1 durante el tiempo que transcurrió la prueba (Fig. IV.14).

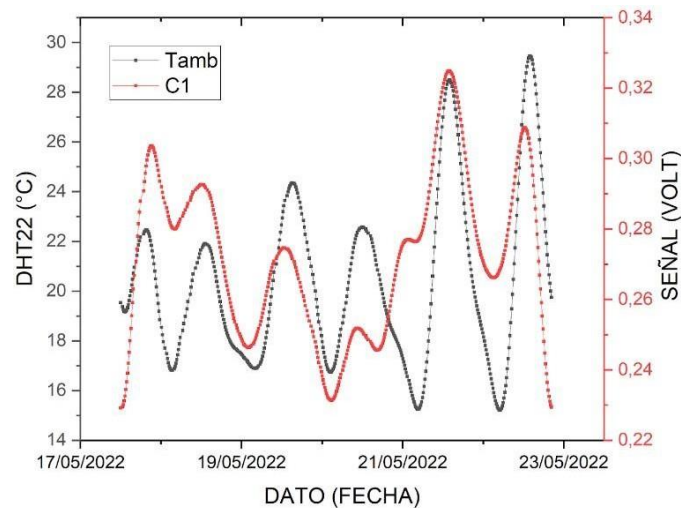


Fig. IV.14: Comparación de la señal de temperatura ambiente y la señal acondicionada de la celda C1

En este desarrollo, el comportamiento de la señal mostrada se debe a una información en cadena que se refleja en la señal de la celda C1 (Línea roja). La CCM-P además de depender de la biomasa que genera la planta, es dependiente de varios factores entre ellos, la salud de la planta ya que una planta vigorosa y en excelente estado de salud, en teoría producirá mayor cantidad de exudados (materia prima), lo que se traduce en un aumento de voltaje, además de su propia biología (fotorrespiración). La vitalidad de las plantas a su vez están condicionadas a rangos específicos de los parámetros ambientales, algunas con tolerancias amplias y otras no tanto, la temperatura ambiental es uno de estos factores que también afecta la producción de potencial, al incorporar en el sistema de captación de datos el sensor DHT22, sensor ambiental que monitorea la variables de temperatura y humedad, se analizó el comportamiento, afectación o beneficio que tienen estas variables en la producción de voltaje. Las gráficas (Fig. IV.15) muestran una relación directamente proporcional y aunque con algunos datos atípicos los cuales se atribuyen al diseño y conexiones eléctricas, el cual es un punto importante para posteriores estudios.

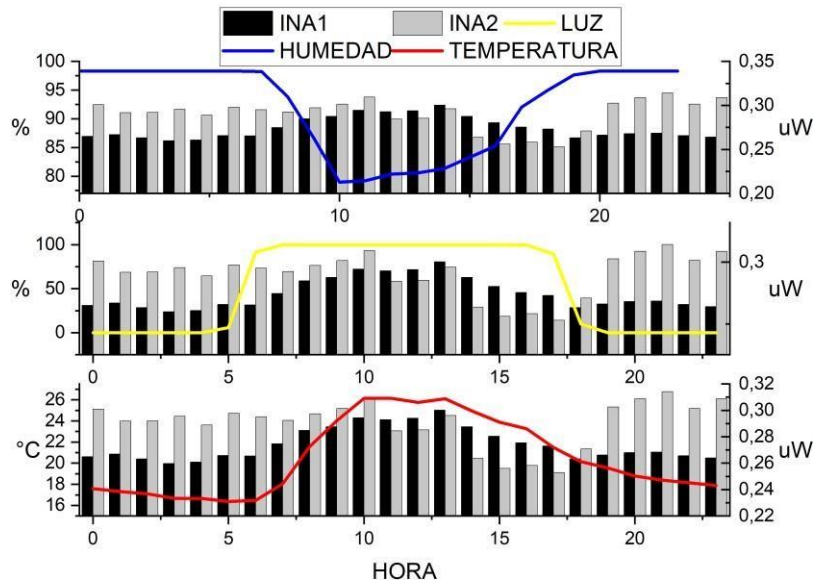


Fig. IV.15: Promedio de potencia y las variables ambiente respecto a la hora del día

En la (Fig. IV.15), se representa los promedios de potencia (barras) de las CCM-P en estudio respecto a las variables ambiente monitoreadas (líneas) para observar el efecto de generación de las celdas respecto a estas variables, en esta grafica (Fig. IV.15 b), se relaciona la luminosidad con los datos de las celdas, donde se evidencia una actividad eléctrica mayormente diurna más fuertemente en la CCM-P de un par de electrodos. Por otro lado, analizando la figura (Fig. IV.15 c) se evidencia una clara relación del voltaje de la CCM-P de un par de electrodos, con la temperatura.

G. Efecto de la distancia del ánodo respecto al cátodo en la producción de energía.

Para este desarrollo, se tomaron los datos de voltaje de cada CCM-P (Fig. IV.16) construidas para la realización de esta prueba, además se monitorea las variables ambientales para así definir los rangos de temperatura, humedad y luminosidad registrados al transcurso de esta prueba. Los criterios técnicos (Tabla IV.VIII) que se tuvieron en cuenta para el desarrollo y análisis de esta prueba, brinda una ventaja en la caracterización de la prueba.



Fig. IV.16: Montaje de las dos CCM-P de la prueba efecto de la distancia de los electrodos

Tabla IV.VIII: Ficha técnica de la prueba

CRITERIO	DESCRIPTOR	UNIDADES
Prueba	Efecto de la distancia del ánodo respecto al cátodo en la producción de energía	N/A
variables eléctricas	6	Voltios
	3	% y °C
variables ambientales	15	min
	498	N/A
Frecuencia de muestreo	7.1	Días
	03/05/2022	Fecha
	10/05/2022	Fecha

Muestras
Duración
Inicio
Final

Antes de continuar con el análisis primero se hace un trabajo de reacondicionamiento de la señal como se explicó en secciones anteriores debido a que estas señales se trabajaron sin una etapa de acondicionamiento analógico como lo es el sensor de voltaje INA 3221, estas señales se tomaron directo al pin de la ESP32 (Fig. IV.17), (Fig. IV.18)

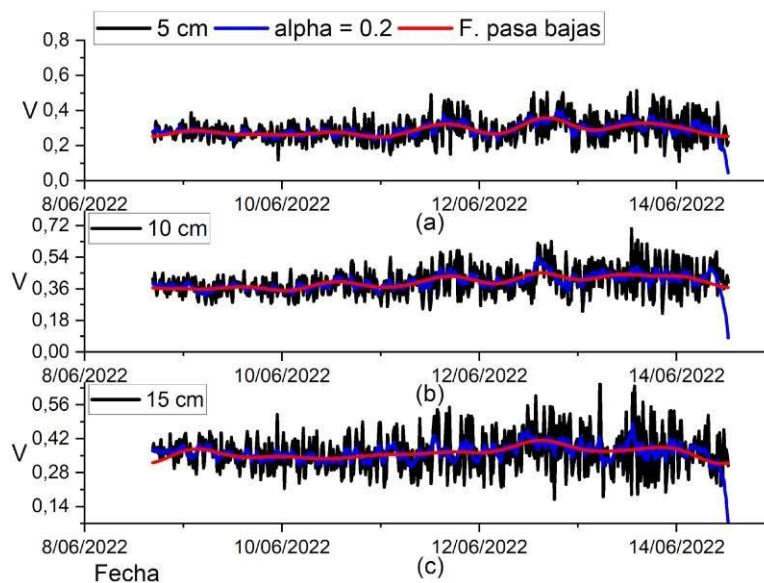


Fig. IV.17: Señales originales y filtradas de la CCM-P de planta cinta

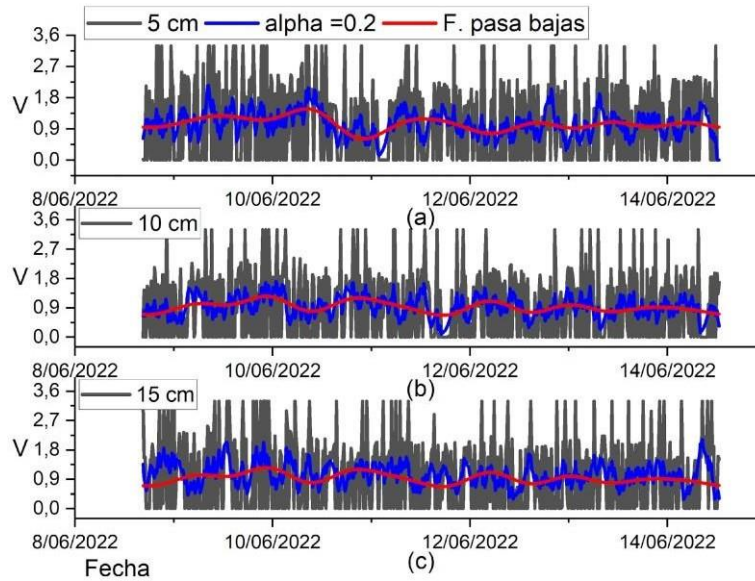


Fig. IV.18: Señales originales y filtradas de la CCM-P de la planta lengua de suegra

Luego del proceso de acondicionamiento con sus respectivos filtrados de señales, se obtuvieron nuevas señales (Fig. IV.17), (Fig. IV.18), las cuales revelan el comportamiento metabólico de cada especie. La especie cinta (línea negra) es de tipo respiración C3, cuya actividad metabólica (proceso de fotosíntesis) predomina en el día y según la literatura estudiada soporta el análisis experimental obtenido, de igual forma, la planta lengua de suegra se categoriza de tipo de respiración CAM (plantas con proceso metabólico nocturno), las cuales nos indica tanto la literatura como la experimentación que este tipo de plantas activan su metabolismo en las noches.

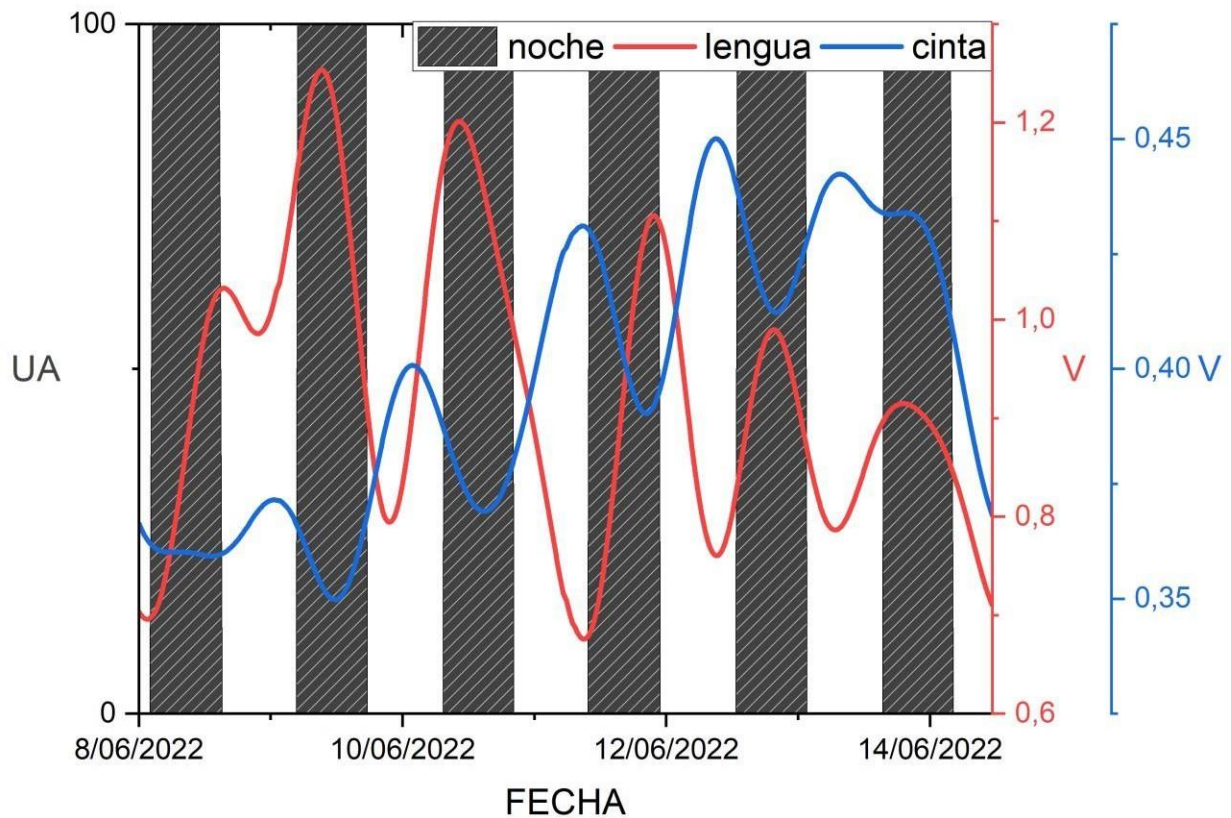


Fig. IV.19: Comparación de la señal procesada de la Cinta y lengua de suegra respecto a la luz del sol

En la comparación de las dos señales de las celdas con distinta planta (Fig. IV.19) previamente filtradas y acondicionadas se evidencia un comportamiento opuesto, es decir cuando una de las dos señales presenta valles la otra presenta picos e igualmente en el sentido contrario. Al introducir los datos del sensor de luz, se comparan con dichas señales, evidenciando comportamientos característicos de plantas: diurnas (cinta) ya que sus máximos de actividad eléctrica ocurren en la fase del día en la que se encuentra presente el sol, nocturnas (lengua) presentando mayor actividad en la fase oscura. La planta cinta presenta tendencia creciente mientras que la lengua de suegra decrece al pasar los días, lo cual se asocia a una mayor producción de biomasa que genera cada especie al transcurso del tiempo.

Con el fin de tener mayor claridad respecto lo expuesto anteriormente se graficaron los promedios del voltaje producido por las celdas respecto a cada hora del día como en la sección anterior.

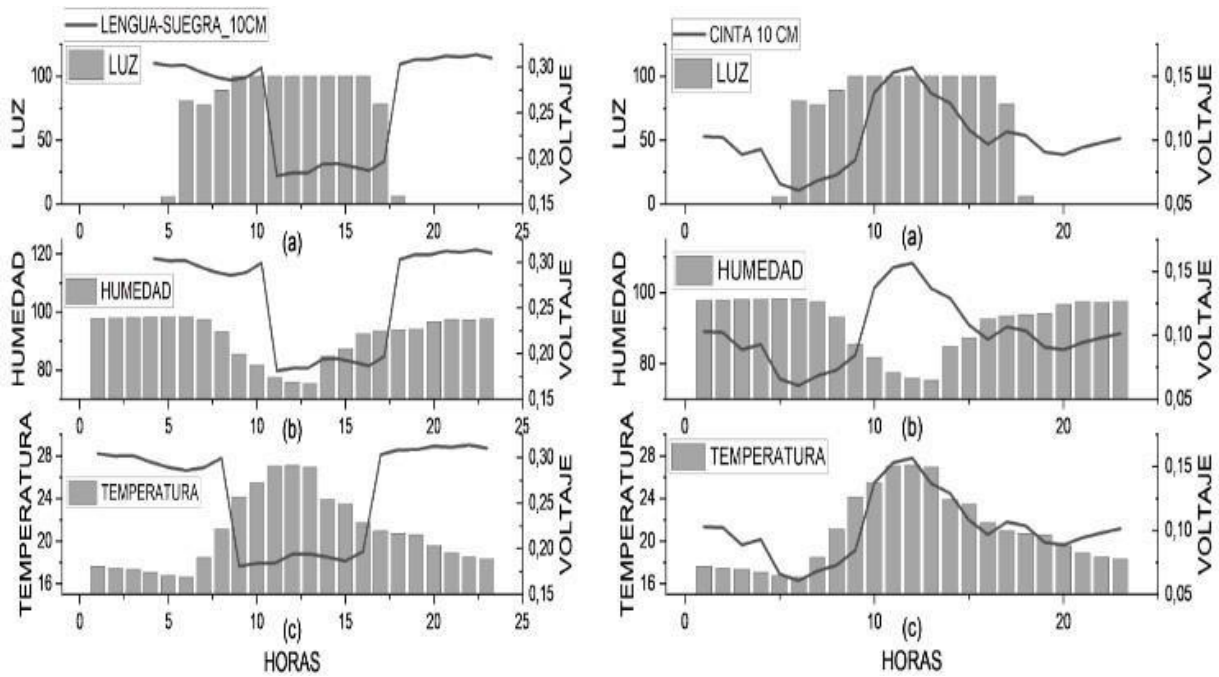


Fig. IV.20: Promedio del voltaje y las variables ambientales respecto a la hora del día

Las líneas presentadas en las gráficas representan el voltaje promedio de las celdas, nuevamente, observamos en la planta lengua de suegra muestra un comportamiento de máxima actividad en la señal en la fase nocturna (Fig. IV.20 a), y de manera opuesta la planta cinta presenta un incremento en la señal a medida que comienza el día y decrece al llegar la fase nocturna, es importante resaltar la estrecha relación que muestra la señal producida por la celda que contiene la planta cinta con la temperatura (Fig. IV.20 c) debido a que esta relación la evidenciamos en pruebas anteriormente analizadas. La energía obtenida por las celdas CCM-P tiene la habilidad de aprovechar un proceso natural de la fijación de carbono en las plantas, estas usan la energía del sol, agua y dióxido de carbono para producir sustancias orgánicas. El definir el tipo de planta estaría relacionado con la aplicabilidad de la celda, por ejemplo: en una posible aplicación de diseño de una planta que supla la energía del alumbrado público sin un banco de baterías de respaldo, se sabe que el alumbrado público debe consumir la energía en las noches, debido a esto se debería escoger idealmente una planta cuya actividad metabólica sea predominantemente nocturna (CAM). Al igual que en un posible generador de energía, dado que la demanda energética de los hogares promedio es más alta en la fase nocturna, por otro lado, la planta cinta posiblemente tendría ventajas en aplicaciones relacionadas con la fase diurna.

Resistencia
[Ω]

Tabla IV.X: Estadística de los datos eléctricos y ambientales planta lengua de suegra

	RANGOS ELÉCTRICOS						RANGOS AMBIENTALES		
	LENGUA 15 Cm		LENGUA 10Cm		LENGUA 5Cm		LUZ	HUMEDAD	TEMPERATURA
	[V]	[μW]	[V]	[μW]	[V]	[μW]	[%]	[%]	[°C]
Máximo	0.46	0.33	0.52	0.48	0.47	0.47	100	98	33
	0.21	0.07	0.20	0.07	0.31	0.21	44	91	21
	0.09	0.01	0.08	0.01	0.18	0.07	0	54	15
Promedio	0.37	0.21	0.44	0.35	0.29	0.18	100	45	18
	0.06	0.01	0.08	0.01	0.05	0.01	0.05	0.01	0.00
Mínimo	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	2.41	0.12	0.02
	648.000		560.000		469.00				

Rango	
Desviación [U]	
Varianza [U²]	
Resistencia [Ω]	

Se puede corroborar nuevamente según estos datos que es posible extraer una mayor cantidad de potencia de las celdas añadiendo área de electrodos, y de manera individual ya que en esta prueba cada ánodo estaba conectado a un valor de resistencia distinto, se deben realizar comparaciones de esta prueba con una similar pero con una referencia por ánodo por que puede producirse efectos de apantallamiento, los rangos monitoreados por el sistema de medición presentan similitud con los de pruebas anteriores.

H. Resumen

Tabla IV.XI: Resumen de las pruebas

EXPERIMENTO	OBJETIVO	CONCLUSIONES	TIPO DE HALLAZGOS CONFIGURACIÓN	
Combinaciones de diferentes materiales para determinar el potencial de los electrodos	Determinar los electrodos que generan mayor potencial.	la pareja Zn-C, es la que genera el más alto potencial, efectivamente la	MFC	la combinación C-C también resulta de interés.

<p>Combinación de diferentes sustratos y materiales.</p>	<p>Corroborar el punto anterior probando la combinación en diferentes sustratos.</p>	<p>pareja Zn-C sigue generando el mayor potencial de celda</p>	<p>MFC</p>	<p>las tierras de mayor concentración de materia orgánica generan voltajes más estables y lo contrario ocurre en tierras áridas</p>
<p>Ubicación de los electrodos (H)</p>	<p>Determinar la ubicación correcta de los electrodos, respecto a la generación de potencial</p>	<p>la celda #2 fue la que obtuvo el mayor potencial.</p>	<p>P-MFC</p>	<p>la celda #3 presentó picos de voltaje muy marcados, a estímulos de humedad, esto nos lleva a profundizar más en esta configuración.</p>
<p>Comparación entre distintos tipos de plantas</p>	<p>Caracterizar plantas de respiración tipo C3 y CAM.</p>		<p>P-MFC</p>	

V. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

A. Conclusiones

- La metodología desarrollada permitió en una primera etapa bajo una investigación bibliográfica de más de 60 documentos entre, artículos, patentes etc., suscritas por la Universidad del Cauca y en el buscador de Google académico adquirir conocimientos bases para comprender el comportamiento eléctrico y los materiales para la construcción de las

celdas de combustible (CCM y CCM-P). En la segunda etapa, las pruebas a los prototipos que se realizaron a lo largo de todo el año de investigación se utilizaron para corroborar la investigación académica, debido a que el desarrollo se implementó de manera teórico práctica.

- El análisis de los datos obtenidos de las pruebas, permitió de una manera cuantitativa, bajo procesamiento digital de los datos y análisis estadísticos, definir parámetros de diseño y materiales para la construcción de una CCM-P que se ajusten a las condiciones climáticas de la ciudad de Popayán.
- El desarrollo y monitoreo de las distintas pruebas demostró que es posible la creación de una CCM-P, los valores de voltaje, reportados en las pruebas de circuito abierto permiten almacenar en pequeñas baterías, además los valores de potencia y energía en circuito cerrado demuestran la generación de nueva energía, las pruebas con la planta cinta generaron tasas de potencia respecto al área geométrica del ánodo en promedio de $127.33 \mu\text{W}/\text{m}^2$ y energías $2198.19 \mu\text{W}/\text{m}^2$.
- A pesar de que esta tecnología presenta grandes retos en la generación de altos potenciales, la implementación de la misma en la región del Cauca, el desarrollo de este trabajo pretende informar e incentivar nuevas investigaciones y desarrollos del tema en la región, además deja planteadas incógnitas desde diferentes áreas del conocimiento.

B. Trabajos futuros

- Para los trabajos futuros se recomienda tener en cuenta el ajuste de impedancias a momento de tomar las pruebas para un análisis de potencia más preciso, además, previo a la toma de datos de potencia se debe realizar una prueba de transferencia de potencia, con la cual se maximiza la producción de la energía de la celda, debido al teorema de máxima transferencia de potencia.

- Para mejorar los resultados obtenidos, se recomienda adicionar una membrana de intercambio iónico, mejorar la calidad de las conexiones y conductores, aislar las etapas, realizar estudio de plantas C4 y tratar el grafito para maximizar el área efectiva.
- Controlar correctamente parámetros como humedad de suelo, temperatura de suelo y pH requerido por el cultivo durante su desarrollo al aplicarse en estas celdas de combustible microbiana asistida por fotosíntesis (CCM-P) para lograr optimizar la generación de electricidad.
- En la parte biológica, se recomienda verificar la presencia de bacterias electrogénicas por medio de distintas técnicas de biología molecular como una PCR, y así asegurar la presencia de bacterias electroquímicamente activas.
- Optimización de los materiales utilizados en la celda. Como es de saberse, los electrodos en las celdas CCM-P son cruciales para un buen desempeño por ello se recomienda experimentar con nuevos materiales o recubrimientos para aumentar la energía obtenida por las celdas.
- Selección de suelos adecuados. A pesar de que cada especie de planta necesita un tipo de suelo acorde a sus necesidades, debe tenerse en cuenta que para un buen desempeño de una CCM-P el suelo debe ser rico en materia orgánica, poseer buena conductividad eléctrica y mantener una alta humedad. Por tal razón se recomienda experimentar con sustratos que favorezcan a la planta a usar.

VI. REFERENCIAS

- [1] L. Carrette, K. A. Friedrich, and U. Stimming, “Fuel Cells ± Fundamentals and Applications”, doi: 10.1002/1615-6854.
- [2] “Ley 1715 de 2014 - Gestor Normativo - Función Pública.” <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353> (accessed Jul. 23, 2022).

- [3] D. Revelo, N. Hurtado, J. R.-I. tecnológica, and undefined 2013, “Celdas de combustible microbianas (CCMs): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica,” *SciELO Chile*, Accessed: Jul. 15, 2022. [Online]. Available: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=s0718-07642013000600004&script=sci_arttext
- [4] F. T. Kabutey *et al.*, “An overview of plant microbial fuel cells (PMFCs): Configurations and applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 110, pp. 402–414, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.RSER.2019.05.016.
- [5] S. Cordero Rodríguez, “PLANTAS DE METABOLISMO FOTOSINTÉTICO C-3, C-4 Y CAM”.
- [6] M. S. Dresselhaus and I. L. Thomas, “Alternative energy technologies,” *Nature* 2001 414:6861, vol. 414, no. 6861, pp. 332–337, Nov. 2001, doi: 10.1038/35104599.
- [7] J. M. WHIPPS and J. M. LYNCH, “SUBSTRATE FLOW AND UTILIZATION IN THE RHIZOSPHERE OF CEREALS,” *New Phytologist*, vol. 95, no. 4, pp. 605–623, Dec. 1983, doi: 10.1111/J.1469-8137.1983.TB03525.X.
- [8] H. Bais, T. Weir, L. Perry, ... S. G.-A. review of plant, and undefined 2006, “The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms,” *researchgate.net*, vol. 57, pp. 233–66, 2006, doi: 10.1146/annurev.arplant.57.032905.105159.
- [9] U. S.-P. C. C. Physics and undefined 2007, “Anodic electron transfer mechanisms in microbial fuel cells and their energy efficiency” *pubs.rsc.org*, Accessed: Jul. 23, 2022. [Online]. Available: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2007/cp/b703627m>
- [10] “Fisiología Vegetal: aspectos básicos - E-Prints Complutense.” <https://eprints.ucm.es/id/eprint/9233/> (accessed Jul. 23, 2022).
- [11] “Producción de bioelectricidad por medio de una celda de combustible microbiana fotosintética (PMFC).” <https://repositorio.unbosque.edu.co/handle/20.500.12495/2568> (accessed Mar. 28, 2022).
- [12] “Estudio de viabilidad de la generación de energía eléctrica mediante una célula de combustible vegetal microbiana (Plant-Microbial Fuel Cell) por fotosíntesis de la planta *Phaseolus vulgaris* (frijol) - Repositorio Institucional USAC.” <http://www.repositorio.usac.edu.gt/15363/> (accessed Mar. 30, 2022).
- [13] “Evaluación de la celda de combustible planta-microbiana (PMFC) y las condiciones de su entorno

- en la generación de energía eléctrica.”
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4228> (accessed Mar. 30, 2022).
- [14] R. Nitorisavut, R. R.-R. and S. E. Reviews, and undefined 2017, “Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering,” *Elsevier*, Accessed: Jul. 23, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117303805>
- [15] W. Apollon *et al.*, “Progress and recent trends in photosynthetic assisted microbial fuel cells: A review,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 148. Elsevier Ltd, p. 106028, May 01, 2021. doi: 10.1016/j.biombioe.2021.106028.
- [16] M. Helder, D. P. B. T. B. Strik, H. V. M. Hamelers, A. J. Kuhn, C. Blok, and C. J. N. Buisman, “Concurrent bio-electricity and biomass production in three Plant-Microbial Fuel Cells using *Spartina anglica*, *Arundinella anomala* and *Arundo donax*,” *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 10, pp. 3541–3547, May 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2009.12.124.
- [17] “Sustentabilidad energética de redes de sensores inalámbricos mediante celdas de combustible basadas en plantas.” <http://risisbi.uqroo.mx/handle/20.500.12249/2616> (accessed Jul. 15, 2022).
- [18] “Bioelectricidad generadas por pilas de combustible Microbiana de Hierbabuena (*Mentha spicata*) y Cinta (*Chlorophytum comosum*) - Yanacancha - Chupaca –2021.” <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/75573> (accessed Jul. 15, 2022).
- [19] “Mejoras en el potencial de generación de energía eléctrica de plantas vivas a partir de celdas de combustibles microbiano.” <https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/7812> (accessed Jul. 15, 2022).
- [20] A. M. Angulo, “Diseño y experimentación de un prototipo para la generación de energía eléctrica no convencional mediante el proceso fotosintético de plantíos,” *Ingeniería Eléctrica*, Nov. 2020, Accessed: Jul. 15, 2022. [Online]. Available: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/607
- [21] D. S. Garcia Ramos and Y. A. Ledesmas Delgado, “Desarrollo de un prototipo de sistema para la generación de energía eléctrica a partir del proceso de fotosíntesis de las plantas,” Sep. 2019, Accessed: Jul. 25, 2021. [Online]. Available: <https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/handle/20.500.12558/2380>
- [22] “Evaluación de una celda de combustible microbiana para el tratamiento del agua residual del campus universitario Meléndez.” <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/11588> (accessed Jul. 15, 2022).

- [23] B. E. Arteaga, S. Nacional, A. Sena, and E. A. Benavides Cordoba, "Diseño, construcción y análisis del desempeño eléctrico de una celda de combustible microbiana," *researchgate.net*, Accessed: Jul. 15, 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Carlos-Rosero-Zambrano/publication/351286871_DISENO_CONSTRUCCION_Y_ANALISIS_DEL_DESEMPEÑO_ELECTRICO_DE_UNA_CELDA_DE_COMBUSTIBLE_MICROBIANA_CCM_CON_ELECTRODOS_DE_ACERO_INOXIDABLE_Y_GRAFITO/links/60e62aac1c28af345850f572/DISENO-CONSTRUCCION-Y-ANALISIS-DEL-DESEMPEÑO-ELECTRICO-DE-UNACELDA-DE-COMBUSTIBLE-MICROBIANA-CCM-CON-ELECTRODOS-DE-ACEROINOXIDABLE-Y-GRAFITO.pdf
- [24] "BioTech 2020 - BioTech 2020." <https://www.biotech2020.cz/> (accessed Jul. 23, 2022).
- [25] "Home | Bioolux." <https://bioolux.com/> (accessed Jul. 23, 2022).
- [26] "Plant-e, electricidad a partir de plantas." <https://epre.gov.ar/web/plant-e-electricidad-a-partir-deplantas/> (accessed Jul. 23, 2022).
- [27] "Plant-e | Chispa de la naturaleza." <https://plant-e.com/en/> (accessed Jul. 25, 2022).
- [28] "Sustentabilidad, diseño e ingeniería." <https://iwaingenieria.com/> (accessed Jul. 23, 2022).
- [29] "¿Qué es internet de las cosas (IoT)? | SAP Insights." <https://www.sap.com/latinamerica/insights/what-is-iot-internet-of-things.html> (accessed Jul. 18, 2022).
- [30] "INA3221 Datasheet, PDF - Alldatasheet." https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Ina3221%20datasheet&gclid=Cj0KCQjw2_OWBhDqARIsAAUNTTGkNRleWdLZ1-t8uFbYVfHyQxxYb0GKO1mMVwzVMcl-4iWdZJKJbjoaAlQfEALw_wcB (accessed Jul. 23, 2022).
- [31] "ESP-MQTT - ESP32 - ESP-IDF Programming Guide latest documentation." <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/protocols/mqtt.html> (accessed Jul. 23, 2022).
- [32] "Ubidots |." <https://industrial.ubidots.com/accounts/signin/> (accessed Jul. 23, 2022).
- [33] "GitHub - ubidots/esp32-mqtt: Wrapper to send or retrieve data from Ubidots using MQTT." <https://github.com/ubidots/esp32-mqtt> (accessed Jul. 23, 2022).
- [34] "PCB Design and Circuit Simulator Software - Proteus." <https://www.labcenter.com/> (accessed Jul. 23, 2022).

- [35] “SOLIDWORKS.” <https://www.solidworks.com/es> (accessed Jul. 23, 2022).
- [36] “Mi Cuenta de MathWorks.” <https://la.mathworks.com/mwaccount/> (accessed Jul. 23, 2022).
- [37] O. A. Mejía-Delgado and Y. Y. Mejía-Delgado, “Madurez tecnológica de la generación Z: reto de la transformación digital en Colombia,” *Revista CEA*, vol. 8, no. 16, pp. e1913–e1913, Jan. 2022, doi: 10.22430/24223182.1913.