



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA LA  
CAPTURA DE ELECTRONES QUE SE PRODUCEN EN EL  
PROCESO DE LA FOTOSÍNTESIS PARA GENERACIÓN DE  
ENERGÍA ELÉCTRICA

Br. Julio Alejandro Brito Dugarte

Mérida, Febrero, 2020



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA LA  
CAPTURA DE ELECTRONES QUE SE PRODUCEN EN EL  
PROCESO DE LA FOTOSÍNTESIS PARA GENERACIÓN DE  
ENERGÍA ELÉCTRICA**

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero  
Electricista

**Br. Julio Alejandro Brito Dugarte**  
Tutor(es): MSc. Ana Arraiz

Mérida, Febrero, 2020

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA LA  
CAPTURA DE ELECTRONES QUE SE PRODUCEN EN EL PROCESO  
DE LA FOTOSÍNTESIS PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA**

Br. Julio Alejandro Brito Dugarte

Trabajo de Grado, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al título de Ingeniero Electricista, aprobado en nombre de la Universidad de Los Andes por el siguiente Jurado.

---

Prof. Zulima Barboza  
Jurado.

---

Prof. Nelson Ballester  
Jurado

---

Prof. Ana Arraiz  
Tutor

## DEDICATORIA

A Dios, por darme vida, salud y sabiduría a lo largo de este proceso.

A mis padres, Diana y Ernesto, sin ustedes nada de esto hubiese sido posible. Mamá, por estar a mi lado en cada momento, tu apoyo moral y entusiasmo que me brindas en cada propósito. Papá, por el tiempo que estás conmigo compartiendo tus experiencias, conocimientos y consejos, por todo el amor que me dan ustedes, Gracias, los amo.

A mis tíos, Isabel y Aquiles, a quienes quiero como una madre y un padre más, por compartir momentos significativos conmigo y siempre estar dispuestos a escucharme y ayudarme en cualquier momento.

A mi esposa, Eldy, por ser parte esencial de mi vida, todo el apoyo que me has brindado ha sido sumamente importante, has estado conmigo en los mejores y peores momentos, siempre ayudándome y dándome palabras de aliento, por su paciencia y su amor incondicional. Te amo.

A mis niñas, Sophia y Saireth, su afecto y su cariño se convierten en mi felicidad, mi esfuerzo y mis ganas de ser cada día mejor. Aun a su corta edad me han enseñado muchas cosas de esta vida, ustedes me ayudan a encontrar el lado dulce de la vida, son mi motivación más grande.

## AGRADECIMIENTOS

A la ilustre Universidad de Los Andes y su Facultad de Ingeniería, por ser mi casa de estudios y aprendizaje, por abrir sus puertas como institución y dar la oportunidad de formar personas con actitudes virtuosas.

A mi tutora, MSc. Ana Arraiz, por cada detalle y momento dedicado para aclarar cualquier tipo de duda, por la claridad y exactitud con la que enseñó cada clase, discurso y lección. Gracias por haber elegido ser Docente y por haberme permitido el desarrollo de este trabajo de grado.

A todos mis familiares y amigos que con su apoyo incondicional me han hecho posible llegar hasta aquí.

**Br. Julio Alejandro Brito Dugarte. Diseño e implementación de un dispositivo para la captura de electrones que se producen en el proceso de la fotosíntesis para generación de energía eléctrica.** Universidad de Los Andes. Tutor: MSc. Ana Arraiz. Febrero 2020.

## Resumen

La presente investigación tuvo como propósito el estudio de una nueva forma de generar energía limpia, debido a la necesidad mundial de producir energía libre de contaminación, en este caso utilizando como fuente los nutrientes que se derivan del proceso de la fotosíntesis en las plantas, que luego son descompuestos por rizobacterias a nivel de las raíces y es allí donde se generan los electrones aprovechados en este estudio. Este sistema logra de forma indirecta aprovechar la energía emitida por el sol, sin embargo sigue produciendo electrones aun cuando es de noche, lo que significa generación de energía eléctrica las 24 horas. Para aprovechar esta idea se plantearon ciertos objetivos, investigar las plantas más adecuadas para ser utilizadas, conocer los efectos capacitivos implicados, desarrollar un prototipo que permita llevar a cabo este proceso y validarlo. Mediante revisión bibliográfica se escogió el tipo de planta con el cual se trabajaría, el material de los conductores a utilizar como electrodos en la captura de electrones y la forma estructural del prototipo a diseñar para estudiar sus efectos capacitivos. Luego se realizaron una serie de experimentos con las plantas escogidas y con diferentes estructuras capacitivas, esto permitió llegar al diseño del prototipo final que luego se validó con pruebas que dieron a conocer su comportamiento eléctrico. Por último mediante un circuito diseñado a partir de los resultados obtenidos en la validación se pudo demostrar que se puede alimentar ciertas cargas o almacenar energía en capacitores y baterías.

**Descriptor:** Energías renovables, plantas, radiación solar, fotosíntesis, materia orgánica, sustrato, rizobacterias, celda de combustible microbiana, electrones, electrodos, almacenamiento.

# ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
RESUMEN.....	vi
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>Capítulo</b>	<b>pp.</b>
<b>1 EL PROBLEMA</b>	<b>4</b>
1.1 Planteamiento del problema.....	4
1.2 Justificación.....	6
1.3 Objetivos.....	8
1.3.1 Objetivo General.....	8
1.3.2 Objetivos Específicos.....	8
1.4 Metodología.....	8
1.5 Alcance.....	9
1.6 Limitaciones.....	9
<b>2 MARCO TEÓRICO</b>	<b>10</b>
2.1 Antecedentes de la investigación.....	10
2.2 Bases teóricas.....	11
2.2.1 La Energía.....	12
2.2.1.1 Clasificación de las fuentes de energía.....	12
2.2.1.2 Energías renovables en Venezuela.....	13
2.2.1.3 Ventajas y desventajas de las energías renovables.....	16
2.2.2 Las Plantas.....	16
2.2.2.1 La Fotosíntesis.....	17
2.2.2.2 Fase dependiente de luz.....	17
2.2.2.3 Fase de fijación de carbono.....	18
2.2.2.4 Ciclo de Calvin.....	19
2.2.2.5 Fotorrespiración.....	21
2.2.2.6 Plantas C4.....	22
2.2.2.7 Plantas CAM.....	25
2.2.2.8 Comparación entre plantas C4 y C3.....	26
2.2.2.9 Comparación entre plantas CAM y C3.....	27

2.2.3	Rizosfera y Rizodepositos.....	28
2.2.4	Celda de combustible microbiana.....	28
2.2.4.1	Desempeño eléctrico de una MFC.....	30
2.2.5	Capacitancia.....	31
2.2.5.1	Capacitor de placas paralelas.....	32
2.2.5.2	Capacitores en paralelo.....	33
2.2.5.3	Capacitores en serie.....	33
2.2.5.4	Carga de un capacitor.....	33
2.2.5.5	Descarga de un capacitor.....	34
2.2.6	Dieléctricos.....	34
2.2.6.1	Ruptura dieléctrica.....	36
2.2.7	Energía almacenada.....	36
2.2.8	Conductores.....	37
<b>3</b>	<b>ANÁLISIS Y RESULTADOS</b> .....	<b>38</b>
3.1	Tipo de planta.....	38
3.2	Efectos capacitivos y conductores.....	39
3.3	Desarrollo del prototipo.....	39
3.4	Validación del prototipo.....	48
3.4.1	Medición de la capacitancia en condiciones de sustrato húmedo o seco..	49
3.4.1.1	Análisis de la capacitancia en condiciones de sustrato húmedo o seco.....	49
3.4.2	Variación del voltaje para diferentes condiciones de humedad.....	50
3.4.2.1	Análisis de la variación del voltaje para diferentes condiciones de humedad.....	51
3.4.3	Variación del voltaje según la hora del día.....	53
3.4.3.1	Análisis de la variación del voltaje según la hora del día.....	56
3.4.4	Calculo de la corriente máxima entregada mediante resistencias.....	65
3.4.4.1	Análisis de la corriente máxima entregada mediante resistencias.....	66
3.4.5	Calculo de la resistencia interna mediante capacitores.....	67
3.4.5.1	Análisis de la resistencia interna mediante capacitores.....	67
3.4.6	Calculo de la corriente máxima entregada mediante capacitores.....	68
3.4.6.1	Análisis de la corriente máxima entregada mediante capacitores.....	69
3.4.7	Capacidad para alimentar carga de manera continua.....	69
3.4.7.1	Análisis de la capacidad para alimentar carga de manera continua.....	70
3.4.8	Capacidad para cargar una batería de litio.....	71
3.4.8.1	Análisis de la capacidad para cargar una batería de litio.....	72
3.4.9	Desempeño eléctrico.....	72
3.4.10	Diseño de un circuito con fines demostrativos.....	73



CONCLUSIONES.....	75
RECOMENDACIONES.....	77
REFERENCIAS.....	78

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>pp.</b>
2.1 MFC compuesta por (2) cámaras.....	29
2.2 Permitividad relativa y conductividad en función de la frecuencia.....	36
3.1 Maceta de madera y placas de cobre, experimento 1.....	40
3.2 Capacitancia total, experimento 1.....	40
3.3 Experimento 1.....	40
3.4 Voltaje generado, experimento 1.....	41
3.5 Construcción maceta, experimento 2.....	41
3.6 Construcción maceta, experimento 2.....	42
3.7 Experimento 2.....	42
3.8 Voltaje generado, experimento 2.....	42
3.9 Capacitancia obtenida, experimento 2.....	43
3.10 Construcción maceta, experimento 3.....	43
3.11 Maceta, experimento 3.....	44
3.12 Construcción de celda, experimento 4.....	44
3.13 Construcción de celda, experimento 4.....	45
3.14 Construcción de celda, experimento 4.....	45
3.15 Electrodo, experimento 4.....	45
3.16 Voltaje generado, experimento 4.....	46
3.17 Voltaje generado, experimento 4.....	46
3.18 Conexión en serie, experimento 4.....	47
3.19 Medidas de las placas utilizadas en el prototipo como ánodo.....	47
3.20 Medidas de la celda utilizada y disposición de sus elementos.....	48
3.21 Conexión de las 20 celdas construidas.....	48
3.22 Esquema del circuito demostrativo.....	74

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>pp.</b>
2.1 Comparación entre plantas C3, C4 y CAM.....	27
3.1 Capacitancia medida en sustrato seco y sustrato húmedo.....	49
3.2 Diferencia de potencial vs humedad.....	50
3.3 Diferencia de potencial en diferentes horas del día, Día 1.....	53
3.4 Diferencia de potencial en diferentes horas del día, Día 2.....	53
3.5 Diferencia de potencial en diferentes horas del día, Día 3.....	54
3.6 Diferencia de potencial en diferentes horas del día, Día 4.....	54
3.7 Diferencia de potencial en diferentes horas del día, Día 5.....	54
3.8 Diferencia de potencial en diferentes horas del día, Día 6.....	55
3.9 Diferencia de potencial en diferentes horas del día, Día 7.....	55
3.10 Diferencia de potencial en diferentes horas del día, Día 8.....	55
3.11 Diferencia de potencial en diferentes horas del día, Día 9.....	56
3.12 Diferencia de potencial en diferentes horas del día, Día 10.....	56
3.13 Corriente entregada por el prototipo para diferentes cargas.....	65
3.14 Calculo de la resistencia interna.....	67
3.15 Calculo de la corriente máxima.....	68
3.16 Capacidad de alimentación continua.....	70
3.17 Capacidad para cargar una batería.....	71
3.18 Desempeño eléctrico del prototipo.....	72

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico</b>	<b>pp.</b>
3.1 Voltaje vs Humedad, plantas P1, P2, P3, P4 y P5.....	51
3.2 Voltaje vs Humedad, plantas P6, P7, P8, P9 y P10.....	51
3.3 Voltaje vs Humedad, plantas P11, P12, P13, P14 y P15.....	52
3.4 Voltaje vs Humedad, plantas P16, P17, P18, P19 y P20.....	52
3.5 Variación del voltaje en diferentes horas del día, Planta 1.....	57
3.6 Variación del voltaje en diferentes horas del día, Planta 2.....	57
3.7 Variación del voltaje en diferentes horas del día, Planta 3.....	57
3.8 Variación del voltaje en diferentes horas del día, Planta 4.....	58
3.9 Variación del voltaje en diferentes horas del día, Planta 5.....	58
3.10 Variación del voltaje en diferentes horas del día, Planta 6.....	58
3.11 Variación del voltaje en diferentes horas del día, Planta 7.....	59
3.12 Variación del voltaje en diferentes horas del día, Planta 8.....	59
3.13 Variación del voltaje en diferentes horas del día, Planta 9.....	59
3.14 Variación del voltaje en diferentes horas del día, Planta 10.....	60
3.15 Variación del voltaje en diferentes horas del día, Planta 11.....	60
3.16 Variación del voltaje en diferentes horas del día, Planta 12.....	60
3.17 Variación del voltaje en diferentes horas del día, Planta 13.....	61
3.18 Variación del voltaje en diferentes horas del día, Planta 14.....	61
3.19 Variación del voltaje en diferentes horas del día, Planta 15.....	61
3.20 Variación del voltaje en diferentes horas del día, Planta 16.....	62
3.21 Variación del voltaje en diferentes horas del día, Planta 17.....	62
3.22 Variación del voltaje en diferentes horas del día, Planta 18.....	62
3.23 Variación del voltaje en diferentes horas del día, Planta 19.....	63
3.24 Variación del voltaje en diferentes horas del día, Planta 20.....	63
3.25 Variación del voltaje en diferentes horas del día, Prototipo.....	64
3.26 Promedio del voltaje en diferentes horas del día para una planta.....	64
3.27 Voltaje promedio entregado por cada planta.....	65
3.28 Corriente vs Carga, valor teórico.....	66
3.29 Corriente vs Carga, valor medido.....	66
3.30 Resistencia interna del prototipo en función de la capacitancia conectada.....	68
3.31 Corriente máxima entregada en función de la resistencia interna.....	69

3.32 Voltaje de alimentación de un led rojo durante diez (10) días.....	70
3.33 Corriente suministrada a un led rojo durante diez (10) días.....	71
3.34 Voltaje de carga de una batería en función del tiempo.....	72

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

# INTRODUCCIÓN

Históricamente, el desarrollo de la sociedad humana se ha basado en el aprovechamiento de fuentes energéticas primarias del tipo fósil como lo es el carbón, el petróleo y gas natural en una constante búsqueda de poseer confort, estabilidad y desarrollo, que en otras palabras no es más que el mejoramiento de la calidad de vida humana.

Actualmente, el gas, el petróleo y el carbón abastecen a más de tres cuartas partes de la demanda mundial energética [1], lo cual deja en evidencia la peligrosa dependencia hacia los combustibles fósiles, esto se traduce en una grave contaminación local y global, ya que se ven afectados el aire, suelos y aguas, produciendo efecto invernadero, lluvia ácida entre otros.

En vista de esta situación y ante el encarecimiento e inevitable agotamiento de los combustibles fósiles, además de sus efectos negativos para el medio ambiente, es de vital importancia la búsqueda, investigación e implementación de formas de energía limpia para ser utilizadas, bien sea en factor productivo o por lo que representa en la provisión y prestación de bienes y servicios.

Hoy en día, existen gran variedad de fuentes de energías alternativas o limpias que de una u otra manera buscan resolver o reducir la gran problemática que se presenta al momento de generar electricidad, querer limitar sus efectos contaminantes y que además, puedan emplearse en lugares remotos donde resulta casi imposible y sumamente costoso realizar un tendido de líneas de transmisión para poder llevar el servicio eléctrico.

Por tal motivo, para clasificar una fuente energética basta con asociar dos conceptos básicos: “Aprovechar la energía natural del planeta”, que abre las puertas a una fuente de flujo energético inagotable a escala humana, y la “No generación de residuos tóxicos” que se puedan generar como consecuencia directa de su utilización [2].

Ciertamente, no todas las energías que se utilizan cumplen estos conceptos, un buen ejemplo se puede observar con el gas natural que al tener un nivel contaminante menor con respecto a los combustibles fósiles es considerada una energía poco contaminante, pero no renovable ni limpia [2].

Teniendo en cuenta que las energías limpias son aquellas que se producen de forma continua y son inagotables a escala humana, son estas energías tan antiguas como el sol o el planeta, ya que aparecieron con los ríos, las montañas, el viento y la luz, siendo utilizadas desde tiempo atrás para molinos de viento, ruedas hidráulicas y otros usos, pero hoy en día son más utilizadas para la producción de energía eléctrica, utilizando los recursos que el planeta ofrece, como la energía solar, eólica, biomasa, geotérmica o marítima, sobre todo en países desarrollados donde tienen acceso a la tecnología necesaria para poder implantar esta producción.

Por otra parte, prácticamente toda la energía que disponemos proviene del sol. El sol produce el viento, la evaporación de las aguas superficiales, la formación de nubes, las lluvias, etc. Su calor y su luz son la base de numerosas reacciones químicas indispensables para el desarrollo de los animales y sobre todo de los vegetales [3], tal es el caso de la fotosíntesis.

El propósito de esta investigación es el estudio de una nueva energía limpia, en la cual se puede aprovechar la energía emitida por el sol gracias al proceso natural de la fotosíntesis en las plantas y la producción de rizodepositos utilizados por las bacterias del suelo, donde se pueden aprovechar los electrones que allí se producen para capturar energía eléctrica a baja escala que pueda alimentar aparatos electrónicos de uso cotidiano del venezolano y así no depender del servicio eléctrico convencional.

Cabe destacar que las plantas pueden regular su proceso metabólico con el que producen materia orgánica. El excedente que no utiliza lo desprende en el suelo a través de las raíces, incorporándolos al sistema suelo/planta, alrededor de las cuales viven microorganismos que se aprovechan de dicha materia orgánica de la planta para su desarrollo, separándola y liberando electrones al medio en los procesos de descomposición. Colocando electrodos cerca de las raíces, se recolectan estos electrones y se puede generar corriente.

Un detalle importante en la idea de este tipo de energía, es que no se producen plantas para

procesarlas y generar biocombustible. Se habla literalmente de obtener energía de las plantas vivas, sin llegar a la necesidad de destruirlas para crear otros productos derivados de sus estructuras vegetales, suponiendo así, una gran diferencia con el resto de energías renovables generadas con plantas .

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)



# CAPÍTULO 1

## EL PROBLEMA

En el presente capítulo se describen las bases necesarias para ejecutar esta investigación, estableciendo las distintas razones que permiten crear las condiciones del proyecto, las mismas se muestran a continuación:

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad el tema de energías renovables es un tema preocupante a nivel mundial, debido a la sobreexplotación, el agotamiento de los combustibles fósiles y el alto nivel de contaminación e impacto ambiental que producen, gracias a esto el hombre se ha visto en la necesidad de buscar fuentes energéticas renovables que permitan la manutención del equilibrio de los ecosistemas [3].

No cabe duda de que el tema energético ha marcado la agenda mundial a lo largo de la historia. Hoy se encuentra en un constante cambio y existe una constante formulación de proyectos con la finalidad de maximizar la producción de energética eléctrica principalmente.

La energía eléctrica es de vital importancia en el desarrollo de las sociedades modernas y cabe destacar que también ha sido indispensable en el desarrollo personal de los individuos que componen dichas sociedades, ya que con las nuevas tecnologías se ha logrado la modernización en la manera de producir esta energía, generando un impacto en cada una de las sociedades e individuos que conforman la humanidad.

Además, representa un pilar fundamental de desarrollo en toda sociedad moderna, puesto que sin ésta es imposible llevar a cabo los principales procesos productivos de cualquier país, se encuentra como base fundamental en millones de actividades diarias, las cuales

son influyentes mundialmente como la tecnologización, industrialización, comunicación o una actividad tan básica como leer un libro de noche o calentar un plato de comida rápidamente. Por lo cual las personas se encuentran en dependencia constante de la generación de la energía eléctrica, lo que hace indispensable mantener una sustentabilidad energética en todo el mundo. La energía eléctrica al igual que las demás tecnologías generadas a nivel mundial, entregan una mayor comodidad en el vivir común, además de una facilitación de las tareas cotidianas y maximización del tiempo en la vida de cada uno de los sujetos que componen las distintas sociedades conformantes de la humanidad, observando también que gracias a la generación eléctrica se han logrado inmensos avances en la medicina permitiendo que una gran cantidad de pacientes logren prolongar sus vidas.

El uso de energías renovables es de gran aporte para nuestra sociedad, ya que ayuda a tener ciudades menos contaminadas y ecosistemas más estables y sostenibles, con las surgentes tecnologías, ha llegado también nuevas maneras de energía renovable lo cual amplía la lista de energías que se puedan utilizar en nuestra sociedad.

Las fuentes de energías renovables luego de su utilización son sometidas a procesos de renovación, ya sean de manera natural o artificial, siendo así una fuente inagotable del recurso utilizado [4]. Entre las energías renovables existentes se encuentran:

Energía Mareomotriz: “producida por el movimiento de las masas de agua provocado por las subidas y bajadas de las mareas, así como por las olas que se originan en la superficie del mar por la acción del viento” [4].

Energía Hidráulica: “producida por el agua retenida en embalses o pantanos de gran altura (que posee energía potencial gravitatoria). Si en un momento dado se deja caer hasta un nivel inferior, esta energía se convierte en energía cinética y, posteriormente en energía eléctrica en la central hidroeléctrica” [4].

Energía Eólica: “producida por el viento. Esta posteriormente se transforma en electricidad mediante el uso de equipos llamados aerogeneradores (molinos de viento especiales)” [4].

Energía Solar: llega a la tierra en forma de radiación electromagnética (luz, calor y rayos ultravioleta principalmente) procedente del sol, el aprovechamiento de la energía solar se

puede realizar de dos formas: conversión térmica mediante sistemas fototérmicos y conversión fotovoltaica mediante paneles solares [4].

La importancia de esta investigación radica en la necesidad de producir energías libres de contaminación utilizando como fuente los nutrientes que son desechados durante el proceso de la fotosíntesis en las plantas y metabolizados por las rizobacterias de la tierra, de esta manera podemos agregar a la energía solar una nueva forma de aprovecharla, y es mediante el uso de plantas vivas, que con la materia orgánica desechada y la descomposición de la misma gracias a microorganismos existentes en el suelo, se liberan electrones en el proceso que pueden ser aprovechados, y así poder disponer de una fuente de energía libre de contaminación sin mayores complicaciones ni costos en lugares remotos.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

La disponibilidad de recursos energéticos es uno de los factores más importantes en el desarrollo de un país, a su vez, el desarrollo tecnológico determina la utilización de ciertos tipos de energía como lo pueden ser solar, eólica, hidráulica, entre otras, y por tanto, la disponibilidad del recurso. La apuesta está en aprovechar las oportunidades abiertas por los nuevos desarrollos tecnológicos, tratando de explotar las capacidades, las competencias y las tecnologías emergentes para impulsar de esta forma la innovación y el crecimiento sustentable. En el contexto actual en el que las palabras claves son sostenibilidad, protección del medioambiente, prudencia, ahorro energético y visión a largo plazo, las energías limpias tienen un papel de trascendental importancia.

Este proyecto tiene la intención de darle la importancia y el gran cuidado que tiene este tipo de energía y poder brindar una herramienta para la generación de energía limpia. Además hay que tener en cuenta que debemos cuidar la atmosfera, evitando la contaminación del aire con los gases que se producen en la generación de electricidad por medio de combustibles fósiles mediante termoeléctricas.

Sabemos que día a día la población mundial aumenta cada vez más, y que con los desarrollos tecnológicos se pretende aumentar igualmente el bienestar de las personas trayendo como

consecuencia un aumento en la demanda de energía, esta se debe satisfacer de una manera sostenible mediante el uso de nuevas tecnologías.

Estamos acostumbrados a utilizar todo tipo de dispositivos electrónicos en nuestra vida cotidiana, desde el momento en que llegamos a casa cuando encendemos la luz, hasta los momentos en que empleamos dispositivos portátiles o dispositivos de comunicación que cuentan con una autonomía dada por una pila o batería, con un tiempo limitado en el que podemos utilizarlo hasta poder recargar las baterías y continuar con su uso, siendo necesario para la vida moderna y para, inclusive, relacionarnos con otras personas.

Actualmente, en Venezuela las personas sufren las consecuencias de un problema energético debido a la indisponibilidad de un servicio eléctrico confiable, es por eso que, un sistema para la alimentación de ciertas cargas específicas de uso común en las viviendas permitirá el uso continuo de la energía eléctrica para satisfacer esas necesidades específicas, como lo puede ser la carga de dispositivos de comunicación.

En miras de contribuir con el desarrollo tecnológico para generación de energía eléctrica limpia y ante la problemática que presenta actualmente el país, se propone el diseño de un dispositivo capaz de realizar la extracción de electrones que se producen en la descomposición de nutrientes a nivel de las raíces de las plantas, derivados del proceso de la fotosíntesis, utilizando una malla o una placa metálica colocada bajo las raíces de la planta para que funcione como electrodo y permita por medio de un circuito especialmente diseñado almacenar esta energía, para poder ser aprovechado en zonas residenciales.

Esto se traduce en que las personas independientemente de la zona donde vivan o del estado del servicio eléctrico local, no estarán sujetas a fallas permanentes o temporales, o variaciones en el nivel de tensión, para poder alimentar estas cargas específicas; debido a que contarán con una fuente permanente de energía eléctrica.

A diferencia de los sistemas fotovoltaicos y eólicos este sistema funciona incluso por la noche y cuando no hay viento, además por medio del diseño del dispositivo propuesto se podría adquirir la energía de los rayos solares y almacenarlas para usarse cuando sea requerido, lo cual produciría una disminución en costos del servicio de electricidad para el hogar

contribuyendo a la vez con la preservación del medio ambiente e incitando a los individuos al uso de energías limpias como esta.

Implementar un dispositivo que sea capaz de generar energía a partir de un proceso derivado de la fotosíntesis implica un gran avance para nuestra sociedad, es dejar atrás la generación del exceso de gases del efecto invernadero que afectan directamente a la atmósfera e indirectamente a todos los seres vivos del planeta y abrir las puertas a futuras investigaciones en donde se pueda mejorar el aprovechamiento de este tipo de energía a grandes escalas.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar e implementar un prototipo para la captura de los electrones que se producen en el proceso de la fotosíntesis para generación de energía eléctrica.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Investigar los tipos de plantas que posean el mejor proceso de la fotosíntesis bajo condiciones de humedad.
- Investigar los efectos capacitivos que puedan estar implicados en la captura de electrones producidos por rizobacterias.
- Desarrollar un prototipo que tenga la capacidad de llevar a cabo el correcto funcionamiento del proceso de captura de los electrones.
- Validar el prototipo.

## **1.4 METODOLOGÍA**

En este trabajo se realiza una revisión bibliográfica para lograr establecer el tipo de planta que se adapte mejor a diferentes condiciones de humedad y que a su vez posea un proceso fotosintético óptimo en comparación con otras especies de plantas, de la misma manera se estudia la teoría de capacitores, en busca de la posibilidad de ser aplicado al diseño del prototipo.

Una vez definidos dichos aspectos el trabajo se llevara a cabo mediante investigación experimental para obtener datos que permitan diseñar un prototipo para la captura de electrones basado en capacitores y su efecto en el almacenamiento de energía, será necesario realizar cálculos que permitan establecer una comparación con las mediciones que se realizaran y así poder revisar las afirmaciones con la realidad.

Adicionalmente, se tomaran mediciones de voltaje para diferentes condiciones de humedad, diferencia de potencial en diferentes momentos del día, así como de corriente para diferentes cargas, que permitan obtener curvas características y realizar un análisis con mayor profundidad para así lograr validar el prototipo.

## **1.5 ALCANCE**

Este trabajo servirá de base para posteriores estudios e investigaciones donde se busque optimizar el diseño y estudiar otros aspectos relevantes de la misma. La creación de este prototipo de manera colateral también permitirá el almacenamiento de energía en condensadores o baterías, así como el encendido de un led.

## **1.6 LIMITACIONES**

Para esta investigación se utilizaron tres tipos de planta y no una variedad de ellas. Los materiales utilizados para el prototipo son costosos, por lo que se usaron solo las láminas de cobre y aluminio que se disponían en el momento de su construcción.

## **CAPÍTULO 2**

# **MARCO TEÓRICO**

En este capítulo se realiza una cuidadosa revisión de los estudios teóricos y prácticos que ya se han realizado y que tienen relación con el problema planteado.

### **2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN**

Strik (2008), en su trabajo: “Producción de electricidad verde con plantas vivas y bacterias en una celda de combustible”, Presentó la célula de combustible microbiana vegetal (planta-MFC), un concepto que explota una fuente de bioenergía in situ. En la planta-MFC, las plantas y las bacterias estaban presentes para convertir la energía solar en electricidad verde. La idea principal es que las plantas producen rizodepósitos, principalmente en forma de carbohidratos, y las bacterias convierten estos rizodepósitos en energía eléctrica a través de la pila de combustible. Allí, demostró la prueba de principio usando el maná de Reed. Logrando una producción máxima de potencia eléctrica de 67mW/m<sup>2</sup> en la superficie del ánodo. Este sistema se caracterizó por: (1) cosecha in destructiva in situ de bioenergía; (2) implementación potencial en humedales y suelos pobres sin competencia a la producción de alimentos o bioenergía convencional, lo que la convierte en un suministro adicional de bioenergía; (3) una producción de electricidad potencial estimada de 5800 kWh/año en Europa; y (4) operación libre de carbono y emisiones neutrales [5].

Strik (2011), en su trabajo: “Células solares microbianas: aplicación de organismos fotosintéticos y electroquímicamente activos”, habla sobre las células solares microbianas (MSC) y establece que son tecnologías desarrolladas recientemente que utilizan energía solar para producir electricidad o productos químicos. Las MSC usan microorganismos fotoautótrofos o plantas superiores para cosechar energía solar y usan microorganismos

electroquímicamente activos en el sistema bioelectroquímico para generar corriente eléctrica. Aquí, revisó los principios y el rendimiento de varios MSC en un esfuerzo por identificar los sistemas más prometedores, así como los cuellos de botella y las posibles soluciones, para las aplicaciones de MSC de "vida real". Presento una perspectiva de futuras aplicaciones basadas en las ventajas intrínsecas de las MSC, destacando específicamente cómo estos sistemas de energía viviente pueden facilitar el desarrollo de un techo verde que produzca electricidad [6].

Helder (2012), en su trabajo: “Nuevo medio de crecimiento de plantas para aumentar la potencia de salida de la célula de combustible vegetal-microbiana”, expone que en un ánodo de célula de combustible vegetal-microbiana, deben crearse condiciones favorables para el crecimiento de la planta y la producción de electricidad. Uno de los aspectos principales en esto es la composición del medio de crecimiento de la planta. El medio Hoagland se ha usado hasta ahora, con tampón de fosfato añadido para reducir las posibles pérdidas sobre la membrana debido a las diferencias en el pH entre el ánodo y el cátodo. Desarrolló un nuevo medio de crecimiento de plantas que mejora la producción actual, mientras que la planta sigue creciendo. Este medio es rico en amoníaco sin nitrato que contiene todos los macro y micronutrientes necesarios para el crecimiento de la planta, con una cantidad equilibrada de búfer de bicarbonato. La presencia de sulfato en el medio de crecimiento de la planta ayuda a mantener un bajo potencial de ánodo. Con el nuevo medio de crecimiento de plantas, la producción máxima de corriente de la celda de combustible vegetal-microbiana aumentó de  $186 \text{ mA/m}^2$  a  $469 \text{ mA/m}^2$  [7].

Los planteamientos anteriormente mencionados se consideran relevantes para esta investigación ya que hacen evidente las grandes posibilidades que existen para la implementación de este tipo de energías limpias y el aprovechamiento exitoso de las mismas en aplicaciones que generen soluciones para la población, además en ellas se exponen ciertos criterios de diseño y optimización que son de gran importancia en el estudio que se va a realizar.

Por otra parte los antecedentes tienen relación con este estudio en otros aspectos como: la metodología utilizada y objetivos planteados para la misma.

## **2.2 BASES TEÓRICAS**



### **2.2.1 La Energía.**

La energía es la capacidad que tienen los cuerpos para generar trabajo, bien sea mecánico, generación de luz o de calor entre otros, y puede manifestarse de diferentes maneras y sean gravitatoria, cinética, química eléctrica, magnética, etc. Existiendo la posibilidad que se transformen entre sí, siempre y cuando se respete el principio de conservación de la energía [3].

Se podría decir que toda la energía disponible que tenemos proviene del Sol. El Sol produce el viento, la evaporación de las aguas superficiales, la formación de nubes, las lluvias, etc. Su calor y su luz son la base de numerosas reacciones químicas indispensables para el desarrollo de las plantas y los animales, cuyos restos con el paso de los siglos, originaron los combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural. [3]

#### **2.2.1.1 Clasificación de las fuentes de energía.**

Las fuentes de energía pueden clasificarse en renovables y no renovables viéndolas desde el punto de vista de su disponibilidad.

Las energías renovables son aquellas cuyo potencial es inagotable, ya que provienen de la energía que llega a nuestro planeta de forma continua como consecuencia de la radiación solar o de la atracción gravitatoria de la luna. Entre ellas podemos encontrar la energía hidráulica, solar, eólica, biomasa, geotérmica y marítima.

Las energías no renovables son aquellas que existen en la naturaleza en una cantidad limitada, no se renuevan a corto plazo y por eso se agotan cuando se utilizan. Este tipo de fuentes energéticas son el carbón, petróleo y gas natural.

Desde el punto de vista de la utilización podemos clasificar la energía en primaria, secundaria y útil.

La primaria es que se obtiene directamente de la naturaleza y corresponde a un tipo de energía almacenada o disponible, como los combustibles fósiles o las energías renovables. La secundaria se obtiene a partir de transformaciones de la energía primaria, como la electricidad o la gasolina. La útil es la que obtiene el consumidor después de la última conversión realizada

por sus propios equipos de demanda, como la energía mecánica gastada en un motor o la luminosa en una bombilla. [3]

### **2.2.1.2 Energías renovables en Venezuela.**

Venezuela es uno de los países más desarrollados en electrificación de América Latina y el segundo con el registro más alto de consumo eléctrico por habitante, con una generación neta de 4.179 kilovatios por hora por habitante (kWh/hab), seguida de Chile (3.393 kWh/hab), Argentina (2.860 kwh/hab), Uruguay (2.750 kWh/hab), Brasil (2317 kWh/hab), México (1.999 kWh/hab), y Panamá (1.873 kWh/ hab), según cifras del Banco Mundial, del Instituto Nacional de Estadística (INE), de la Organización Latinoamericana de Energía y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)[8].

El modelo energético venezolano siempre ha girado en torno a los desarrollos hidroeléctricos en el Bajo Caroní (Macagua, Gurí, Caruachi y Tocoma) y a las plantas termoeléctricas sustentadas en la quema de combustibles fósiles (diesel, gas y carbón). El país posee poca experiencia en proyectos alternativos de energías renovables, cuyo aporte es insignificante en el balance energético nacional [9].

El acceso a servicios energéticos como elemento fundamental de la reducción de la pobreza y la mejora de las condiciones de vida de los grupos socialmente más vulnerables, era un tema que hasta finales del siglo XX figuraba como aspecto de poca relevancia en las políticas energéticas del estado venezolano. En la actualidad, uno de los lineamientos en materia energética es promover de manera eficaz la justicia y la inclusión social, a través del suministro del servicio eléctrico de forma universal. Para lograr el abastecimiento en zonas donde el sistema convencional de distribución eléctrica no es viable por razones económicas, financieras y ambientales, la promoción de esquemas alternativos como la generación de electricidad con el uso de fuentes renovables, debe ser el vector de las iniciativas de electrificación en estas comunidades.

Es por el ello que desde el año 2005 el estado venezolano, a través de la Fundación para el Desarrollo del Servicio Eléctrico (FUNDELEC), ente adscrito al Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica, ha puesto en práctica el Programa Sembrando Luz, iniciativa con la

cual se instrumenta la búsqueda de soluciones de electrificación rural y suministro de agua potable, aprovechando los adelantos que ofrece la ciencia y la tecnología en el campo de la energía solar, eólica e hidroeléctrica. El Programa Sembrando Luz constituye la instancia técnica y social de FUNDELEC responsable de la coordinación y ejecución de proyectos en materia de energías renovables, las cuales están enmarcadas dentro del Convenio Integral de Cooperación Cuba – Venezuela; y persiguen la promoción, desarrollo y aprovechamiento de las energías renovables, en el marco de la política de diversificación y uso racional del acervo energético del país.

Sembrando Luz persigue dotar de servicios básicos (electricidad y agua potable) a comunidades ubicadas en zonas aisladas, indígenas y fronterizas, mediante la instalación de tecnologías que aprovechan el acervo local de fuentes renovables disponibles en estas localidades. Asimismo promueve la inserción de esquemas alternativos no contaminantes que contribuyen con la diversificación de la matriz de producción de energía de forma racional y con equilibrio ambiental. [8]

Desde el punto de vista de energético, el estado venezolano busca ampliar y fortalecer el servicio eléctrico, con mecanismos alternativos de electrificación que implican la incorporación de sistemas fotovoltaicos y eólicos al sistema de generación eléctrica. Además, el promedio de horas sol y la ubicación geográfica, son dos cualidades que se unen para brindar al país las condiciones óptimas para el desarrollo de la industria de los paneles solares.

Este Proyecto de FUNDELEC, bajo su programa Sembrando Luz, arrancó a mediados del 2005, cuando expertos cubanos y venezolanos iniciaron recorridos por ocho (8) estados del país, para evaluar el potencial de energía solar y eólica de Venezuela. En esa oportunidad se determinó que cerca de siete mil (7000) comunidades a nivel nacional necesitan del servicio eléctrico y se puso en marcha esta importante labor social con la meta de instalar ochocientos doce (812) Sistemas Fotovoltaicos a lo largo del territorio nacional, beneficiando a las comunidades que nunca habían contado con este servicio. [8]

Pocos venezolanos saben que desde el año 2005, en Venezuela, se han instalado sistemas fotovoltaicos unifamiliares que iniciaron con tecnología española (paneles solares y aerogeneradores) y alemana (banco de baterías) siendo la estructura de soporte y equipos

complementarios ensamblados en Venezuela. Además, se han instalado catorce (14) sistemas híbridos, cuya tecnología está integrada por uno (1) o dos (2) aerogeneradores de dos (2) y tres (3) palas, un conjunto de paneles fotovoltaicos y un moto-generador (diesel) de respaldo, es decir, aprovechan el viento y el sol abundantes en la región occidental costera de nuestro país (Zulia y Falcón). En esa región el país cuenta con el mayor potencial en energías renovables (eólica y solar) debido a la incidencia directa de los vientos alisios y la latitud tropical del norte costero. Estos sistemas se han instalado en La Guajira (Zulia) y Paraguaná (Edo. Falcón) fundamentalmente, aunque también hay dos (2) en Los Andes (Mérida) [10].

En total, el estado venezolano a través de FUNDELEC y el programa "Sembrando Luz", ha instalado más de tres mil (3000) sistemas de energía solar fotovoltaica en el país, la mayoría de los cuales hoy prestan servicio eléctrico en las zonas más alejadas y en las comunidades más apartadas de nuestro territorio nacional. Desde comunidades indígenas del Amazonas y Bolívar, hasta la población de Castilletes en el extremo más norte de La Guajira venezolana, pasando por varias comunidades Wayuu a través de toda La Guajira venezolana, hasta pocos metros del hito número 1 de la frontera colombo-venezolana, hay paneles solares instalados por FUNDELEC en el marco del programa "Sembrando Luz" [10].

En vista de la necesidad de expansión de la electrificación rural, de acuerdo al mandato legal de acceso universal a la electricidad establecido en la Ley Orgánica de Sistema y Servicio Eléctrico y considerando la política de estado número 22 de la Ley Plan de la Patria que establece: "Política 22: Impulsar un cambio en la matriz de fuentes de generación de electricidad favoreciendo el uso de energías limpias. Programas: 1. Expansión de parques eólicos, sistemas fotovoltaicos, centrales mini hidroeléctricas y centrales de biomasa en el país. 2. Sistemas con fuentes alternas de energía en Comunidades Aisladas Indígenas y Fronterizas.". El estado creó la Unidad de Energía Renovable de Venezuela (UNERVEN) como una filial de Petróleos de Venezuela, S.A Industrial (PDVSA Industrial). La empresa puede fabricar hasta doscientos (200) aerogeneradores al año de 1500 W, 3000 W y/o 6000 W y hasta veinte mil ochocientos (20.800) módulos solares anualmente, de 195 W cada uno. Todo esto existe en Venezuela, aunque es muy poco conocido, todo esto ha sido parte de una política energética alternativa del ex presidente Chávez, como impulso a las Energías Renovables en el país [10].

En referencia al programa "Sembrando Luz", el ex presidente Chávez explicó en su momento, que esta iniciativa responde a la preparación de "la era post petrolera" y que busca incrementar los esfuerzos para garantizar plenamente el suministro y distribución de energía en todo el país. "Tenemos que ir preparándonos para la era post petrolera y ahí está la energía: el sol, el viento (...) que no se retarde nada, no demoremos nada, no perdamos un día, ni una hora, en el impulso de estos proyectos" dijo el ex presidente Chávez. Tristemente, hoy todos estos proyectos y planes están siendo abandonados y el gobierno actual ha dejado de lado la electrificación rural con energías renovables y promueve tecnologías de electrificación y actividades mineras agresivas con el medioambiente [10].

### **2.2.1.3 Ventajas y desventajas de las energías renovables.**

Entre algunas ventajas en la utilización de energías renovables podemos encontrar: [3]

- Son limpias. Mínimo impacto ambiental.
- No generan residuos difíciles de tratar, y muy pocos gases contaminantes.
- Utilizan recursos que no se agotan.
- La fuente de energía es autóctona, no hay que importarla, con lo que disminuye la dependencia energética del país que las aplica.
- Generan puestos de trabajo en todas las etapas de su sistema energético: construcción, operación y mantenimiento.
- No contribuyen al cambio climático.
- Los recursos primarios son gratis (por ejemplo, la radiación solar).

Aunque también existen dos grandes obstáculos en general: [11]

- Intermitencia en la etapa de transformación de energía.
- Capacidad de almacenamiento.

A estas dos se le pueden agregar los costos de inversión que varían dependiendo de la situación económica y geográfica de los países interesados pero que generalmente son mayores que las energías del tipo convencional.

### **2.2.2 Las plantas.**

Las plantas son las formas vivientes más abundantes que existen en la tierra, con períodos de vida superiores al resto de organismos vivos, poseen la capacidad de elaborar sus propios alimentos y utilizar los recursos del ambiente para su manutención y crecimiento, son organismos sésiles, y con una amplia plasticidad fenotípica [13].

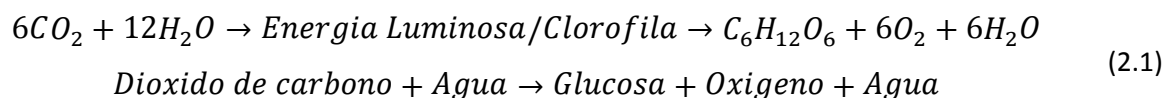
Entre sus características más relevantes destaca la formación de oxígeno ( $O_2$ ) a partir de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) que es absorbido por las hojas a través de los estomas [14]. Representan la principal fuente de carbono para el consumo de otros organismos como animales, bacterias y hongos [12].

Venezuela es un país con una gran cantidad de plantas, que varían de acuerdo a los diferentes tipos de climas, pudiendo encontrarse en cada uno de ellos desde hierbas diminutas hasta árboles gigantes, lo que trae como consecuencia una vegetación característica en cada región.

### 2.2.2.1 La Fotosíntesis.

La fotosíntesis es un proceso físico-químico por el cual plantas, algas, bacterias fotosintéticas y algunos protistas como diatomeas utilizan la energía de la luz solar para sintetizar compuestos orgánicos. Se trata de un proceso fundamental para la vida sobre la tierra y tiene un profundo impacto sobre la atmósfera y el clima terrestres. [12]

Durante la fotosíntesis, una célula utiliza energía luminosa capturada por la clorofila para realizar la síntesis de carbohidratos. La reacción general de la fotosíntesis puede resumirse de la siguiente manera:



Las reacciones de fotosíntesis se dividen en dos fases: aquellas dependientes de luz (corresponde a la parte foto de la fotosíntesis) y aquellas reacciones de fijación de carbono (la parte síntesis de la fotosíntesis). Cada conjunto de reacciones ocurre en una parte distinta del cloroplasto: las reacciones dependientes de luz están asociadas con los tilacoides, y las reacciones de fijación de carbono ocurren en el estroma. [13]

### 2.2.2.2 Fase dependiente de luz.

Esta fase se realiza en los "granos de los cloroplastos"; la energía proveniente del sol es captada por la clorofila, provocando el desprendimiento de electrones de esta molécula. Algunos de esos electrones actúan disociando las moléculas de agua absorbidas por la planta a través de los órganos correspondientes. Las moléculas de agua se desdoblán en sus dos componentes: un (1) átomo de oxígeno y dos (2) átomos de hidrógeno: este proceso de ruptura de la molécula de agua se denomina "hidrólisis" [14].

El átomo de oxígeno, que el vegetal no utiliza, se aparea con otro y forma moléculas de gas oxígeno que se liberan a través de los estomas de las hojas hacia la atmósfera, permitiendo la respiración de todos los seres vivos.

Los átomos de hidrógeno resultantes de esta disociación, que serán utilizados posteriormente en la etapa oscura, pasan a integrar la molécula de un coenzima capaz de "transferir hidrógenos", denominada "NADP" (Nicotinamida Adenina Dinucleótido Fosfato), transformándola en "NADP hidrogenado" (NADPH).

La energía de los electrones restantes es almacenada en el nucleótido de adenosina, un compuesto altamente energético que tiene la propiedad de almacenar energía pero también de transferirla rápidamente, permitiendo otra reacción química. Este compuesto se forma cuando una (1) molécula de "ADP" (Adenosin Difosfato) se une con una (1) molécula llamada "grupo fosfato", formando ATP (Adenosina Trifosfato). [14]

### **2.2.2.3 Fase de fijación de carbono.**

Esta Fase se lleva a cabo en la matriz del cloroplasto. Donde existe un azúcar compuesta de cinco (5) carbonos denominada "ribulosa difosfato" [12].

A esta molécula se le une el CO<sub>2</sub> absorbido por los estomas, transformándola en un compuesto de seis (6) carbonos de gran inestabilidad, dado que enseguida se divide en dos (2) moléculas de tres (3) átomos de carbono, denominadas "ácido fosfoglicérico" que es el primer producto orgánico de la fotosíntesis y cuya importancia radica en que, según las re combinaciones químicas que realice, se puede transformar en: proteínas vegetales, lípidos, vitaminas o reponer la ribulosa difosfato consumida hasta el momento [14].

Pero la recombinación más frecuente es la que permite que cada molécula de ácido fosfoglicérico se una con un átomo de hidrógeno que le transfiere el NADPH. De este modo se origina dos nuevas triosas llamadas fosfogliceraldehído, las que finalmente se unen entre sí formando una hexosa estable denominada glucosa. Para que se realice esta unión, es necesario el aporte de energía química que provee el ATP formado en la primera etapa [14].

La glucosa es soluble en agua, por lo cual puede ser transportada fácilmente hacia todos los órganos del vegetal y en ellos puede almacenarse o formar disacáridos como la "sacarosa" o monosacáridos como la "fructosa" e incluso polimerizarse originando almidón [14]. Todos estos compuestos se distribuyen en la planta a través de células denominadas floema, de esta manera es llevado hasta las raíces y en algunos casos son excretados como productos de desechos, por otro lado, el agua absorbida por las raíces es transportada hasta las hojas, frutos y flores por otro tipo de células huecas llamadas xilema, donde posteriormente será hidrolizado formando  $O_2$  y  $H^+$  [12].

#### **2.2.2.4 Ciclo de Calvin.**

La fijación de carbono ocurre en el estroma mediante una secuencia de trece (13) reacciones conocidas como el ciclo de Calvin. Las trece (13) reacciones del ciclo de Calvin se dividen en tres (3) fases: Absorción de  $CO_2$ , reducción de carbono, y regeneración de RuBP. Todas las trece (13) enzimas que catalizan los diferentes pasos en el ciclo de Calvin están localizadas en el estroma del cloroplasto. Diez (10) de las enzimas también participan en la glucólisis. Estas enzimas catalizan reacciones reversibles, degradando moléculas de carbohidratos en la respiración celular y sintetizando moléculas de carbohidratos en la fotosíntesis [13].

**Absorción de  $CO_2$ .** La primera fase del ciclo de Calvin consiste en una reacción individual en la que una (1) molécula de  $CO_2$  reacciona con un compuesto de cinco (5) carbonos fosforilado, la ribulosabifosfato (RuBP). Esta reacción se cataliza por la enzima ribulosabifosfato, carboxilasa, oxigenasa, también conocida como rubisco. El cloroplasto contiene más enzima rubisco que cualquier otra proteína, y esta enzima puede ser una de las más abundantes proteínas en la biosfera. El producto de esta reacción es un intermediario de seis (6) carbonos inestable, que inmediatamente se rompe en dos (2) moléculas de fosfoglicerato (PGA) con tres (3) carbonos cada uno [13].



El carbono que originalmente fue parte de una molécula de  $\text{CO}_2$  ahora se hace parte de una cadena carbonada; el carbono se ha “fijado”. El ciclo de Calvin también se conoce como la ruta C3 porque el producto de la reacción de fijación de carbono inicial es un compuesto de tres (3) carbonos. Las plantas que inicialmente fijan el carbono de esta manera se conocen como plantas C3. [13]

**Reducción de carbono.** La segunda fase del ciclo de Calvin consiste en dos pasos en los cuales la energía y la potencia reducida del ATP y del NADPH (ambos producidos en las reacciones dependientes de luz) se utilizan para convertir las moléculas de PGA a gliceraldehído-3-fosfato (G3P). Por cada seis (6) carbonos que entran al ciclo como  $\text{CO}_2$ , seis (6) carbonos pueden abandonar el sistema como dos (2) moléculas de G3P, para ser empleadas en la síntesis de carbohidratos. Cada una de esas moléculas de tres (3) carbonos de G3P es esencialmente la mitad de una molécula de hexosa (azúcar de seis carbonos). (En efecto, se puede recordar que el G3P es un intermediario clave en la descomposición de azúcar en glucólisis) [12].

La reacción de dos (2) moléculas de G3P es exergónica y conduce a la formación de glucosa y fructosa. En algunas plantas, la glucosa y la fructosa se unen para producir sacarosa (azúcar de mesa común). (La sacarosa se puede obtener de la caña de azúcar, de la remolacha, y de la savia de arce). La célula vegetal también utiliza glucosa para producir almidón o celulosa. [13]

**Regeneración de RuBP.** Observe que aunque se eliminan dos (2) moléculas de G3P del ciclo, restan diez (10) moléculas de G3P; esto representa un total de treinta (30) átomos de carbono. Mediante una serie de diez (10) reacciones que constituyen la tercera fase del ciclo de Calvin, esos treinta (30) carbonos y sus átomos asociados se reacomodan en seis (6) moléculas de ribulosa-1,5-bisfosfato, cada una de las cuales queda fosforilada por el ATP para producir RuBP, el compuesto de cinco (5) carbonos con el que inició el ciclo. Estas moléculas de RuBP inician el proceso de fijación de  $\text{CO}_2$  y otra vez la producción final de G3P [13].

En resumen, los insumos requeridos para las reacciones de fijación de carbono son seis (6) moléculas de  $\text{CO}_2$  (la fuente de carbonos y oxígenos en los carbohidratos), fosfatos transferidos del ATP, y electrones (como hidrógeno) aportados por el NADPH (pero principalmente obtenidos por la fotólisis del agua). Al final, los seis (6) carbonos del  $\text{CO}_2$

forman parte de una molécula hexosa. Las restantes moléculas de G3Pse utilizan para sintetizar las moléculas RuBP que se pueden combinar con más moléculas de CO<sub>2</sub>. [13]

#### **2.2.2.5 Fotorrespiración.**

En presencia de suficiente CO<sub>2</sub>, la enzima RuDP carboxilasa oxigenasa introduce el CO<sub>2</sub> dentro del ciclo de Calvin con una gran eficacia (actividad carboxilasa). Sin embargo, cuando la concentración de CO<sub>2</sub> en la hoja es muy pequeña comparada con la concentración de oxígeno, la misma enzima cataliza la reacción de la RuDP con el oxígeno (actividad oxigenasa), en vez del CO<sub>2</sub>. Esta reacción es el primer paso de un proceso conocido como fotorrespiración, por el cual los glúcidos son oxidados a CO<sub>2</sub> y agua en presencia de luz. A diferencia de la respiración mitocondrial, la fotorrespiración es un proceso donde la energía se pierde, y no se produce ni ATP ni NADH. En algunas plantas, cerca del 50 % del carbono fijado en la fotosíntesis puede ser reoxidado a CO<sub>2</sub> durante la fotorrespiración. [12]

La luz es necesaria para que la fotorrespiración tenga lugar, ya que su sustrato inicial es la RuDP, que se regenera en el ciclo de Calvin con la provisión de ATP y NADPH que se producen en las reacciones luminosas. La abundancia relativa de CO<sub>2</sub> y de O<sub>2</sub> en el cloroplasto, y el resultado de la competencia entre estos gases por la enzima RuBisCO, son los factores determinantes de que la RuDP siga la vía fotosintética o fotorrespiratoria [12].

Las condiciones que conducen a la fotorrespiración son bastante comunes. El CO<sub>2</sub> no siempre se encuentra disponible para las células fotosintéticas de la planta, entra en la hoja por los estomas, orificios especializados que se abren y se cierran, dependiendo, entre otros factores de la cantidad de agua. Cuando la planta está sometida a unas condiciones calurosas y secas, debe cerrar sus estomas para evitar la pérdida de agua. Esto provoca también una disminución del CO<sub>2</sub> y permite que el oxígeno producido en la fotosíntesis se acumule. También sucede que cuando las plantas crecen muy juntas y el aire está muy calmado, el intercambio de gases entre el aire que rodea la hoja y la atmósfera global puede ser muy reducido. En estas condiciones, el aire cercano a las hojas de la planta activa tendrá concentraciones de CO<sub>2</sub> demasiado pequeñas para sus actividades fotosintéticas. Incluso si las estomas están abiertas, el gradiente de concentración entre el exterior de la hoja y el interior será tan poco importante,

que muy poco  $\text{CO}_2$  se podrá difundir hacia la hoja. La combinación de concentraciones bajas de  $\text{CO}_2$  y altas concentraciones de oxígeno conduce a la fotorrespiración [14].

La RuBisCO tiene una afinidad por el  $\text{CO}_2$  mucho mayor que la que presenta por el  $\text{O}_2$ , pero como la atmósfera está mucho más concentrada en  $\text{O}_2$  (21%) que en  $\text{CO}_2$  (0.03%), esta ventaja se reduce y la relación entre carboxilación y oxigenación es de aproximadamente 3:1. La solubilidad de los gases disminuye cuando aumenta la temperatura, pero este descenso es más marcado en el  $\text{CO}_2$  que en el  $\text{O}_2$ , por lo que las altas temperaturas (que además afectan al comportamiento de la enzima, aumentando su afinidad por el  $\text{O}_2$ ) favorecen la oxigenación de la RuDP y, por tanto, la vía fotorrespiratoria. Esta pérdida de carbono fijado, en forma de  $\text{CO}_2$  liberado por fotorrespiración, representa un lastre para la planta, ya que consume materia orgánica ya formada sin producir ATP, es decir, deshace parte de lo conseguido en la fotosíntesis. [13]

El problema de la fotorrespiración queda resuelto en algunas plantas mediante una ruta alternativa de fijación del carbono. En estos casos, la anulación de la vía fotorrespiratoria tiene lugar mediante un mecanismo de fijación de  $\text{CO}_2$  previo al ciclo de Calvin que, combinado con ciertas peculiaridades bioquímicas, anatómicas y fisiológicas de estas plantas, logra aumentar la concentración de  $\text{CO}_2$  en las inmediaciones de la enzima RuBisCO y así desplazar fuertemente la actividad de esta enzima hacia la carboxilación. En estas plantas, el primer paso de la fijación de carbono es la unión del dióxido de carbono a una (1) molécula llamada ácido fosfoenolpirúvico (PEP), formando un (1) ácido de cuatro (4) carbonos llamado ácido oxalacético. Hay dos (2) grupos de plantas que utilizan esta alternativa, las plantas  $\text{C}_4$  y las plantas CAM. Las restantes especies, en las que el  $\text{CO}_2$  se fija para formar el compuesto de tres carbonos llamado ácido fosfoglicérico (PGA), se conocen como plantas  $\text{C}_3$ . [14]

#### **2.2.2.6 Plantas $\text{C}_4$ .**

En las plantas  $\text{C}_4$  las reacciones previas al ciclo de Calvin constituyen la llamada vía de Hatch y Slack. La fijación del  $\text{CO}_2$  tiene lugar, en primer término de forma transitoria, en el citosol de las células del mesófilo, donde la enzima PEP carboxilasa lo une al ácido fosfoenolpirúvico (PEP), de tres (3) átomos de carbono. De esta carboxilación se obtiene, como primer producto

de fijación del  $\text{CO}_2$ , un (1) ácido dicarboxílico de cuatro (4) carbonos, el ácido oxalacético [14].

El ácido oxalacético es luego transformado en otro ácido de 4C que será transportado, vía plasmodesmos, a las células de la vaina. En algunas plantas  $\text{C}_4$  esta transformación es una reducción, que tiene lugar en los cloroplastos del mesófilo, y de la que se obtiene ácido málico; en otras se trata de una transaminación que ocurre en el citosol y de la que se obtiene ácido aspártico [14].

El ácido málico entra a los cloroplastos de la vaina y allí es descarboxilado a ácido pirúvico. El aspártico es reconvertido a ácido oxalacético en las células de la vaina, ya sea en mitocondrias (en ciertas especies) o en el citosol (en otras plantas); el ácido oxalacético es reducido a ácido málico y descarboxilado a pirúvico. En todos los casos la descarboxilación libera  $\text{CO}_2$  en la vaina, que puede entrar al ciclo de Calvin al ser fijado por la enzima RuBisCO; el ácido pirúvico que queda es transportado nuevamente al mesófilo donde, previa fosforilación, podrá reiniciar el ciclo [14].

Por tanto, el  $\text{CO}_2$  que fija la enzima RuBisCO y entra al ciclo de Calvin no procede directamente y entra al ciclo de Calvin no procede directamente de la atmósfera, sino que ha sido fijado transitoriamente en el mesófilo y vuelto a liberar en las células de la vaina. Esta compartimentalización (fijación inicial del  $\text{CO}_2$  en el mesófilo, ciclo de Calvin en la vaina) permite un mejor aprovechamiento del  $\text{CO}_2$  ya que:

La enzima PEP carboxilasa tiene una enorme afinidad por el  $\text{CO}_2$ , y por otra parte, no tiene actividad oxigenasa, por lo que el  $\text{O}_2$  no interfiere en la fijación [13].

El  $\text{CO}_2$  captado en el mesófilo y liberado en la vaina resulta mucho más concentrado en ésta que en el tejido fotosintético de las plantas  $\text{C}_3$ , de manera que compite mejor con el  $\text{O}_2$  y se favorece así la actuación como carboxilasa de la RuBisCO [13].

El mecanismo de bombeo de  $\text{CO}_2$  hacia la vaina tiene un costo energético ya que por cada molécula de  $\text{CO}_2$  que se transporta del mesófilo al ciclo de Calvin se hidrolizan dos (2) ATP. Las plantas  $\text{C}_4$ , por tanto, emplean cinco (5) ATP para fijar y reducir a carbohidrato una molécula de  $\text{CO}_2$ , mientras que en las plantas  $\text{C}_3$  sólo se necesitan los tres (3) ATP del ciclo

de Calvin. Por su mayor necesidad de energía en forma de ATP por molécula de CO<sub>2</sub> fijado, las plantas C<sub>4</sub> tendrían en principio una menor eficiencia fotosintética. Sin embargo, debido a que el efecto de la vía de Hatch y Slack es reducir o anular la oxigenación de la RuDP, las plantas C<sub>4</sub> no presentan niveles detectables de fotorrespiración; las plantas C<sub>3</sub>, en las que parte del CO<sub>2</sub> fijado se pierde por fotorrespiración, serían desde este punto de vista las que tendrían una menor eficiencia fotosintética [14].

La clave de esta aparente contradicción radica en las condiciones ambientales en las que tiene lugar la fotosíntesis, especialmente la temperatura. La ventaja de las plantas C<sub>3</sub> (su ahorro de ATP) se pierde en condiciones de alta temperatura, que favorecen la oxigenación de la RuDP y por tanto las pérdidas por fotorrespiración; con temperaturas elevadas, en general a partir de 30°C, la eficiencia en el uso fotosintético de la luz de las plantas C<sub>4</sub> es mayor que la de las C<sub>3</sub> [14].

Por otra parte, en una atmósfera de baja unidad relativa (condición provocada o favorecida por las altas temperaturas), los estomas tenderán a cerrarse parcialmente, obstruyendo el flujo de CO<sub>2</sub> hacia el interior de la hoja. La menor concentración interna de CO<sub>2</sub> favorecerá la oxigenación de la RuDP en las plantas C<sub>3</sub>, cuya eficiencia fotosintética disminuirá. En las plantas C<sub>4</sub>, en cambio, la fijación vía PEP carboxilasa y la compartimentalización del proceso, favorecen una eficaz captura del CO<sub>2</sub> sin pérdidas por fotorrespiración, aun con una baja concentración interna de CO<sub>2</sub> derivada del efecto de un déficit hídrico sobre el comportamiento estomático [14].

En suma, las plantas C<sub>4</sub> se ven favorecidas en condiciones de alta temperatura y baja humedad relativa, que son las predominantes en los climas tropicales y subtropicales, relativamente áridos, de las regiones de donde son originarias. Las plantas C<sub>4</sub> constituyen un grupo importante de especies, por lo general adaptadas precisamente a ambientes con altas temperaturas, iluminación intensa y escasez de agua; las especies C<sub>4</sub> pertenecen a unas cuantas familias de Angiospermas, entre las que destacan las Gramíneas, Amarantáceas, y Quenopodiáceas. Se encuentran entre ellas las especies cultivadas de mayor productividad agrícola, como el maíz (*Zea mays*), el sorgo (*Sorghum bicolor*) o la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), y algunas de las malas hierbas agresivas, como *Cynodon dactylon*, *Sorghum halepense*, *Cyperus rotundus* y diversas especies de *Amaranthus* [14].

Las plantas C3 se comportan más eficazmente en condiciones de temperaturas no muy altas y alta humedad relativa. Son C3 la mayor parte de las plantas cultivadas, como el trigo (*Triticum aestivum*), el girasol (*Helianthus annuus*) o las coles (*Brassica oleracea*). [14]

#### **2.2.2.7 Plantas CAM.**

La sigla CAM significa, en inglés, “metabolismo ácido de las Crasuláceas”, debido a que esta variante fotosintética se describió inicialmente en plantas de esta familia. Actualmente se conoce un buen número de especies CAM, pertenecientes a diversas familias de plantas crasas o suculentas: Crassulaceae, Cactaceae, Euphorbiaceae, Aizoaceae, etc. La piña (*Ananas comosus*), perteneciente a la familia Bromeliaceae, presenta este tipo de metabolismo [14].

Se trata en general de plantas originarias desérticas o subdesérticas, sometidas a intensa iluminación, altas temperaturas y pronunciados déficit hídricos, adaptadas a condiciones de aridez bastantes extremas. En estas plantas el tejido fotosintético es homogéneo, sin vaina diferenciada, ni tampoco clorénquima empalizada. Pero sus estomas muestran un peculiar comportamiento ya que, al contrario de los de las demás plantas, se abren de noche y se cierran de día. El metabolismo de las plantas CAM presenta también unas reacciones previas al ciclo de Calvin, similares a las de las plantas C4, y se verifica asimismo una compartimentalización, pero no espacial (ya que el clorénquima es uniforme) sino temporal: las reacciones del ciclo de Calvin ocurren de día, con los estomas cerrados, mientras que las reacciones previas tienen lugar de noche, con los estomas abiertos [14].

Durante la noche, los estomas abiertos permiten la fijación del CO<sub>2</sub> atmosférico por el PEPcarboxilasa en el citosol; el PEP sobre el que actúa esta enzima procede de la degradación del almidón, acumulado en los cloroplastos durante el día. De la carboxilación del PEP se obtiene ácido oxalacético, que luego es reducido a málico. El ácido málico no se transporta a otras células sino que se acumula en la vacuola de la misma célula [14].

Durante el día, con los estomas cerrados, el málico sale de la vacuola y se descarboxila a pirúvico; en esta reacción se libera CO<sub>2</sub>, que entra a los cloroplastos para iniciar allí el ciclo de Calvin. El ácido pirúvico es transformado en PEP, que luego pasa a fosfato de triosa; las

triosas en los cloroplastos dan lugar a la síntesis y acumulación de almidón, a partir del cual se regenerará el PEP durante la noche [14].

Como la incorporación del  $\text{CO}_2$  al ciclo de Calvin tiene lugar con los estomas cerrados, su concentración dentro de la hoja es lo suficientemente alta como para impedir que la enzima RuBisCO actúe como oxigenasa. De esta manera se anula la fotorrespiración en estas plantas.

El cierre diurno de las estomas impide las intensas pérdidas de agua por transpiración que sufrirían estas plantas con la elevada temperatura y bajísima humedad relativa características de las regiones áridas y desérticas de las que son originarias. La apertura estomática y la entrada del  $\text{CO}_2$  a la hoja, en cambio, tienen lugar de noche, cuando la temperatura es menor, la humedad es mayor y las pérdidas de agua por transpiración son bajas. [14]

#### 2.2.2.8 Comparación entre plantas C4 y C3.

- El  $\text{CO}_2$  que fija la enzima RuBisCo en el ciclo de Calvin no procede directamente de la atmósfera, sino que ha sido fijado transitoriamente en el mesofilo y vuelto a liberar en las células de la vaina.
- La enzima PEPcarboxilasa tiene una gran afinidad por el  $\text{CO}_2$  y por otra parte, no tiene actividad oxigenasa, por lo que el  $\text{O}_2$  no interfiere en la fijación.
- El  $\text{CO}_2$  captado en el mesofilo y liberado en la vaina resulta mucho más concentrado en esta que en el tejido fotosintético de las plantas C3, compitiendo mejor con el  $\text{O}_2$  y favoreciendo la actividad carboxilasa de la RuBisCo.
- Por cada  $\text{CO}_2$  fijado, el metabolismo C4 tiene mayor coste energético que las C3:
  - Las plantas C4 gastan cinco (5) ATP y dos (2) NADPH.
  - Las plantas C3 gastan tres (3) ATP y dos (2) NADPH.
- Condiciones ambientales
  - Plantas C4: climas tropicales y subtropicales, relativamente áridas con iluminación intensa, altas temperaturas y baja humedad relativa
  - Plantas C3: climas templados, temperatura no muy alta y alta humedad relativa.
- A alta temperatura ( $>30^\circ\text{C}$ ) se favorece la actividad oxigenasa de la RuBisCo y por lo tanto, las pérdidas por fotorrespiración. Más eficacia en las C4.

- Con baja humedad relativa, los estomas tienden a cerrarse, impidiendo el adecuado suministro de CO<sub>2</sub> al interior de las hojas. La menor concentración de CO<sub>2</sub> favorece la actividad oxigenasa de la RuBisCo. Las plantas C4 fijan todo el CO<sub>2</sub> por escaso que sea, con la PEPcarboxilasa y luego lo bombean a las células de la vaina del haz. [14]

### 2.2.2.9 Comparación entre plantas CAM y C3.

- Plantas que presentan una compartimentalización temporal respecto a la asimilación del CO<sub>2</sub>.
- Propios de climas desérticos o subdesérticos, sometidos a intensa iluminación, altas temperaturas y pronunciados déficits hídricos (condiciones de aridez muy extremas).
- Abren sus estomas por las noches (asimilan el CO<sub>2</sub> atmosférico con la PEPcarboxilasa) y los cierran por el día (el CO<sub>2</sub> intracelular se incorpora al ciclo de Calvin) con lo que la actividad carboxilasa de la RuBisCo es máxima.
- Este metabolismo supone un elevado coste energético (mayor que el de las plantas C4) por lo que su rendimiento fotosintético por unidad de tiempo es menor y su crecimiento más lento.
- Es un metabolismo muy adaptado a evitar las pérdidas de agua. [14]

**Tabla 2.1. Comparación entre plantas C3, C4 y CAM**

	<b>Plantas C3</b>	<b>Plantas C4</b>	<b>Plantas CAM</b>
<b>Anatomía de la hoja</b>	Células de la vaina del haz sin apenas cloroplastos	Células de la vaina del haz con grandes cloroplastos	Células con grandes vacuolas
<b>Carboxilasa final</b>	RuBisCO	RuBisCO	RuBisCO
<b>Metabolismo adjunto</b>	Ninguno	Transferencia de CO <sub>2</sub>	Almacenaje de CO <sub>2</sub>
<b>Carboxilasa adjunta</b>	Ninguna	PEP	PEP
<b>Fotorrespiración</b>	Alta	Baja	Moderada
<b>Abertura estomática</b>	Día	Día	Noche
<b>Incorporación directa del CO<sub>2</sub></b>	Si	No	No
<b>Temperatura óptima para la Fotosíntesis</b>	15-25 °C	30-47 °C	Sobre 35 °C
<b>Región Climática</b>	Templada	Tropical	Árida



### **2.2.3 Rizosfera y Rizodepositos.**

La rizosfera es una zona donde ocurre la interacción entre microorganismos que se encuentran en el suelo y las raíces de las plantas, posee la principal característica de que allí se produce el aumento de la biomasa microbiana y de su actividad [15].

La planta viva a través de la fotosíntesis utiliza la energía solar para fijar el CO<sub>2</sub> en forma de carbohidratos. Dependiendo de las especies de plantas, edad y condiciones ambientales, hasta el 60% del carbono fijo neto puede transferirse de sus hojas a las raíces [15]. El sistema radicular de la planta produce y libera diferentes compuestos orgánicos en el suelo, que incluyen exudados (azúcares, ácidos orgánicos, etc.), secreciones (carbohidratos poliméricos y enzimas), lisados (materiales de células muertas) y gases (etileno y CO<sub>2</sub>) [16].

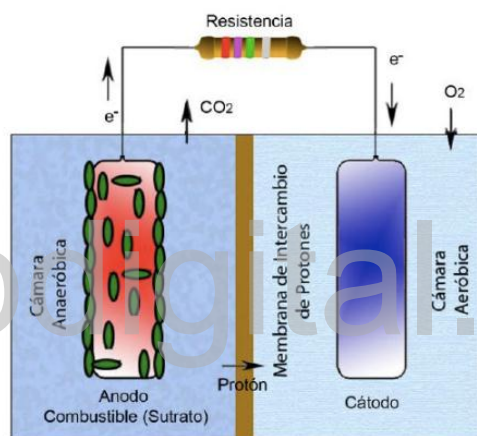
El total de estos procesos de liberación se denominan rizodeposición de la planta y sus productos, generando de esta manera rizodepositos [17]. Los rizodepositos producidos pueden totalizar hasta el 40% o más de la productividad fotosintética de la planta y desempeñan muchos papeles en la rizosfera [5]. Los rizodepositos contienen carbono y una parte de este carbono puede ser utilizada por microorganismos en la rizosfera, lo que puede generar interacciones mutuamente beneficiosas entre plantas y microorganismos [16]. Dado que la mayor parte de los rizodepositos son moléculas pequeñas, la planta las sintetiza de manera eficiente y la bacteria las metaboliza de manera eficiente [5].

### **2.2.4 Celda de combustible microbiana.**

La celda de combustible microbiana (MFC, por sus siglas en inglés) es una tecnología emergente y podría contribuir a solucionar problemas críticos de la sociedad actual, entre ellos la crisis energética [18].

Una MFC es un dispositivo que utiliza microorganismos para convertir energía química presente en un sustrato en energía eléctrica, esto es posible cuando bajo ciertas condiciones algunos microorganismos transfieren los electrones producidos en su actividad metabólica a un (1) electrodo (ánodo) en lugar de a un (1) aceptador natural de electrones (como oxígeno) [18].

Una MFC típicamente está compuesta por dos (2) cámaras, una anódica y otra catódica [19] en medio de las cuales hay un separador. La cámara anódica contiene sustratos orgánicos que al oxidarse por acción de los microorganismos, generan electrones, protones y  $\text{CO}_2$  [18]. En cada una de las cámaras se coloca un (1) electrodo, el ánodo de cámara anódica y el cátodo en la cámara catódica [20], una vez que los electrones se liberan en la cámara anódica, estos son captados por el ánodo y posteriormente transferidos hacia el cátodo mediante un circuito externo [18]. Simultáneamente, en la cámara anódica se generan protones que migran hacia la cámara catódica a través de un separador [21], donde se combinan con el oxígeno del aire para reducirse a agua con los electrones que captan directamente del cátodo, debido a que esta relación no está catalizada por microorganismos el cátodo se refiere como abiótico [18].



**Figura 2.1. MFC compuesta por (2) cámaras. [18]**

La celda se fabrica en acrílico o en vidrio, para los electrodos se puede utilizar diferentes materiales como cobre, platino, grafito u otros [20]. El separador, que es un importante componente del sistema porque es una membrana que impide el paso de electrones de la cámara anódica a la catódica y deja pasar los protones [18], puede ser de varios tipos: membrana de intercambio de cationes (MIC), membrana de intercambio de aniones, membrana bipolar, membrana de microfiliación, puente salino, fibra de vidrio, y otros materiales para filtrado [21].

Una variante de la MFC de doble cámara se obtiene eliminando la cámara catódica y exponiendo el cátodo directamente al aire, transformándose así en una MFC de una sola cámara, esto hace que sea un sistema mucho más económico y sencillo [20].

### 2.2.4.1 Desempeño eléctrico de una MFC.

El desempeño eléctrico de una MFC se estudia a partir de las mediciones de voltaje que se realizan en la resistencia externa conectada entre el ánodo y el cátodo y los respectivos cálculos que se derivan de ellas [18]. Los parámetros que se analizan para evaluar el comportamiento eléctrico de este tipo de dispositivos son: la densidad de potencia (DP), la eficiencia coulombica (EC) [22] y la resistencia interna (RI) [23].

La densidad de potencia (DP) expresada como la potencia por unidad de área del electrodo anódico [24] y la potencia por unidad de volumen del sustrato [25], se calculan de la siguiente manera:

$$P_A = \frac{I * U}{A} \quad (2.2)$$

$$P_V = \frac{I * U}{V} \quad (2.3)$$

Donde, I es la corriente en amperios, U es el potencial en voltios, A es el área de la superficie del electrodo anódico en m<sup>2</sup> y V es el volumen del sustrato de la cámara anódica [18].

Con relación a la resistencia interna (RI) éste es un parámetro muy importante para caracterizar un generador de corriente como lo es una MFC. Se puede obtener a partir del análisis de las curvas de polarización que se derivan de las mediciones de voltaje en la resistencia externa [26,22], o por la técnica de espectroscopia de impedancias [27,28], que se fundamenta en la aplicación de una pequeña señal de voltaje a la celda electroquímica y posterior medición de la corriente a través de ella [29].

La eficiencia coulombica (EC) es un parámetro que permite obtener la fracción de energía eléctrica que se puede generar en la MFC a partir de un sustrato determinado. Su medición es importante porque posibilita comparar el desempeño de diferentes MFC. La EC se calcula como la razón entre la carga generada y la carga teórica presente en el sustrato de la cámara anódica [30], mediante la siguiente expresión matemática [25]:

$$EC\% = \frac{\sum_{i=1}^n U_i * t_i}{R * F * b * \Delta S * V} * M * 100 \quad (2.4)$$

Donde,  $U_i$  es el voltaje de la MFC en el tiempo  $t_i$ ,  $R$  es la resistencia externa,  $F$  es la constante de Faraday (96485C/mol),  $b$  es el número de moles de electrones producidos por (1) un mol de demanda química de oxígeno (DQO),  $\Delta S$  es la concentración removida de DQO (g/L),  $V$  es el volumen del líquido (L) y  $M$  es el peso molecular del oxígeno (32g/mol) [18].

En diversas publicaciones se observan claras diferencias en cuanto al desempeño eléctrico de las MFC, debido a que son varios los factores que lo afectan, entre ellos: la arquitectura, el tipo de separador utilizado, el material de los electrodos, el sustrato y los microorganismos [18]

En diferentes investigaciones, los autores describen algunas combinaciones específicas entre los diferentes factores que inciden en el desempeño eléctrico de una MFC, ellos analizan el comportamiento de una o dos variables, sin embargo, es muy complejo establecer una condición óptima que logre los mejores resultados [18]. Las variables inciden de diferente forma: por ejemplo, la salinidad del sustrato mejora la conductividad y la resistencia interna del sistema, pero afecta el proceso metabólico de las células [31]. Los electrodos que mejor contribuyen al desempeño eléctrico por su alta habilidad catalítica son muy costosos [27]. A pesar del uso de soluciones buffer en las cámaras de las MFC, se pueden generar gradientes de pH que inciden en el desempeño eléctrico [32].

En términos generales en una MFC la producción de energía, a escala de laboratorio es muy baja, no obstante, en algunos trabajos se describen aplicaciones asociadas a sistemas electrónicos de bajo consumo [20]. En este orden de ideas, la perspectiva es experimentar con otras arquitecturas de celda y otros escenarios que involucren grandes volúmenes de materia orgánica [28], con lo que se esperaría mayores niveles de densidad de potencia.

### **2.2.5 Capacitancia.**

Si se consideran dos conductores dentro de un material dieléctrico y los llamamos conductor 1 (C1) y conductor 2 (C2), además C1 posee una carga positiva  $Q$  y C2 posee una carga igual pero negativa. Se sabe que la carga llega a la superficie y forma una densidad de carga superficial, que el campo eléctrico es normal a la superficie del conductor y además cada conductor es una superficie equipotencial. [33]

Si C1 lleva la carga positiva, el flujo eléctrico se dirige de C1 a C2, y C1 tiene el potencial positivo, es decir que debe realizarse trabajo para llevar una carga positiva de C2 a C1. [33]

Designando la diferencia de potencial entre C1 y C2 como  $V_0$ , es posible definir la capacitancia de este sistema de conductores como “la relación de la magnitud de la carga en cualquiera de los conductores a la magnitud de la diferencia de potencial entre dichos conductores”. [34]

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \quad (2.5)$$

La capacitancia siempre será una cantidad positiva ya que la carga  $Q$  y la diferencia de potencial  $\Delta V$  siempre se expresan como cantidades positivas. En el SI la capacitancia se expresa como coulombs por cada volt, la unidad para capacitancia es el farad (F). [34]

### 2.2.5.1 Capacitor de placas paralelas.

Dos placas metálicas paralelas de igual área  $A$  están separadas por una distancia  $d$ . Una placa tiene carga  $+Q$  y la otra tiene carga  $-Q$ . Si las placas están muy juntas, se puede suponer que el campo eléctrico es uniforme entre las placas y cero en cualquier otra parte. [34]

En términos generales, se determina  $Q$  por medio de una integral de superficie sobre el conductor positivo y se encuentra  $V_0$  llevando una carga unitaria positiva de la superficie negativa a la positiva. [33]

$$C = \frac{\oint \epsilon \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}}{-\int_{-}^{+} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L}} \quad (2.6)$$

Por lo tanto:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (2.7)$$

Es decir, la capacitancia de un capacitor de placas paralelas es proporcional al área de sus placas e inversamente proporcional a la separación de las placas. [34]

La geometría de los conductores influye en la capacidad del par de placas para almacenar carga, a medida que un capacitor adquiere carga, los electrones fluyen hacia la placa negativa y salen de la placa positiva, entonces, si dichas placas poseen un área grande, las cargas acumuladas son capaces de distribuirse sobre dicha área de manera sustancial y la cantidad de carga que se puede almacenar aumenta conforme el área de la placa aumenta, entonces, es razonable que la capacitancia sea proporcional al área de placa  $A$ . [34]

Si se estudia la región que separa las placas y se colocan más cerca, el campo eléctrico tiene el mismo valor pero se extiende sobre una distancia reducida, esto se traduce en que la magnitud de la diferencia de potencial entre las placas  $\Delta V$  es menor, en consecuencia, acercar más las placas hace que la carga sobre el capacitor aumente, si  $d$  disminuye, la carga aumenta, como resultado la relación entre  $C$  y  $d$  es proporcional. [34]

#### 2.2.5.2 Capacitores en paralelo.

Cuando los capacitores están en paralelo, la capacitancia total es simplemente la suma de todas las capacitancias. [33]

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n \quad (2.8)$$

#### 2.2.5.3 Capacitores en serie.

Al conectar capacitores en serie, la capacitancia total es la suma inversa de la suma de todas las capacitancias inversas. [33]

$$C_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}} \quad (2.9)$$

#### 2.2.5.4 Carga de un capacitor.

Suponiendo que un capacitor se encuentra inicialmente descargado, es decir que la diferencia de potencial entre sus bornes es cero (0), y es conectado en un arreglo circuital RC sencillo (fuente, resistencia y capacitor) se observara un paso de corriente que empezara a cargar el condensador de manera que una vez alcanzada la carga máxima la corriente en el circuito será cero (0) y la diferencia de potencial entre bornes del capacitor será igual al de la fuente que lo alimenta. La intensidad de corriente y la diferencia de potencial respecto al tiempo serán:

$$V_{C(t)} = E + (V_0 - E)e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2.10)$$

$$I_{C(t)} = \frac{E - V_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2.11)$$

Donde  $I_c$  es la corriente de carga en el capacitor,  $V_c$  es el voltaje en bornes del capacitor,  $V_0$  es el voltaje inicial en bornes del capacitor,  $E$  es el voltaje de la fuente,  $R$  es la resistencia conectada (resistencia de carga),  $C$  es la capacitancia del condensador y  $t$  representa el tiempo de carga.

#### 2.2.5.5 Descarga de un capacitor.

En este caso el capacitor se encuentra inicialmente cargado con voltaje entre sus bornes igual al de la fuente que lo alimentaba y desconectado de la fuente de alimentación, al conectarle una carga resistiva comienza a descargarse hasta que la diferencia de potencial entre bornes sea cero (0). ). La intensidad de corriente y la diferencia de potencial respecto al tiempo serán:

$$V_{C(t)} = V_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2.12)$$

$$I_{C(t)} = \frac{-V_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2.13)$$

#### 2.2.6 Dieléctricos.

Un material dieléctrico es usado principalmente para aislar componentes ya que posee una baja conductividad eléctrica debido a que en su última capa de valencia presenta entre 7 a 8 electrones lo que no permite la movilidad de los mismos, también son usados como elemento constructivo en los capacitores. Se caracteriza por los siguientes parámetros, conductividad o su inversa resistividad y constante dieléctrica o permitividad. [33]

La conductividad es  $\sigma=J_1/E$  donde  $J_1$  es la densidad de corriente de fugas y  $E$  es el campo eléctrico aplicado, siendo sus unidades S/m. Normalmente se mide en términos de resistencia de aislamiento  $R$  en  $\Omega$ , siendo su valor: [33]

$$R = \frac{d}{\sigma \cdot A} \quad (2.14)$$

La constante dieléctrica o permitividad representa la cantidad de energía electrostática que puede ser almacenada,  $\epsilon_r=C/C_0$  donde  $C$  representa la medida de capacidad en F y  $C_0$  es la capacidad equivalente en vacío, que se calcula como  $C_0=\epsilon_0 \cdot A/d$  siendo  $\epsilon_0$  la permitividad del vacío igual a  $8,8541878176 \times 10^{-12}$  F/m [33]

Existen valores típicos de conductividad y permitividad para diferentes tipos de terrenos en función de la frecuencia, estos valores se refieren a estructuras de suelos subsuperficiales homogéneas. [35]

Aunque pocas veces la estructura subsuperficial es homogénea, ya que se encuentra integrada por varias capas de distinto espesor y diferentes conductividades y permitividades. [35]

En la figura 2.1 se muestran las curvas B, C, y E referentes a suelo húmedo, agua dulce a 20°C y suelo muy seco respectivamente. Los valores de permitividad relativa y conductividad mostrados para diferentes tipos de suelo indican la gama aproximada de valores que pueden encontrarse en diversas condiciones, ya que en regiones fértiles y muy húmedas se darán valores más altos, o en el caso de suelos recubiertos por nieve pueden hallarse valores inferiores a los mostrados. [35]

Los valores para permitividad relativa de suelo seco, húmedo y agua dulce varían de la siguiente manera:



- Suelo seco, de 2 a 6, siendo su valor típico 2.
- Suelo húmedo, de 10 a 30, siendo su valor típico 10.
- Agua dulce, 80.

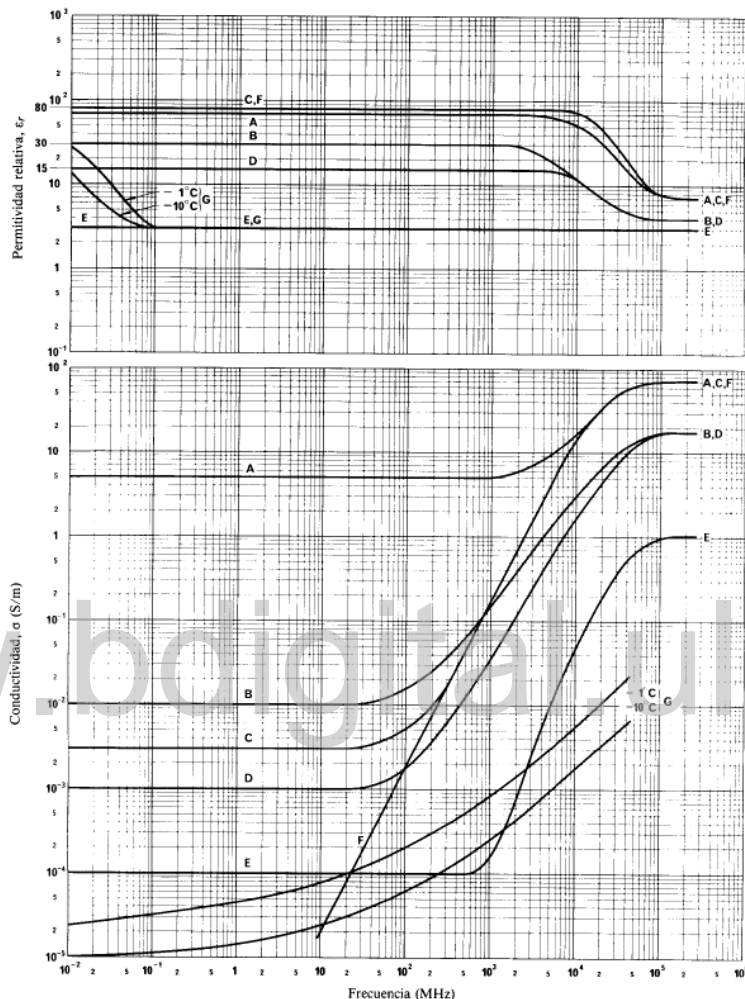


Figura 2.2. Permitividad relativa y conductividad en función de la frecuencia. [35]

### 2.2.6.1 Ruptura dieléctrica.

Se produce cuando la tensión aplicada al material dieléctrico por medio de dos electrodos alcanza el valor necesario para producir la conducción entre los electrodos, cortocircuito. [34] En un dieléctrico sólido la ruptura depende de la estructura molecular y la morfología del material así como de la geometría del material, la temperatura y el entorno ambiental. [34]

### 2.2.7 Energía almacenada.

En un capacitor las cargas positivas y negativas se encuentran separadas por un sistema de dos conductores, en este sistema se almacena energía potencial eléctrica ( $U$ ) medida en joule. Es por eso que si las placas de un capacitor con carga se conectan mediante un conductor como un alambre, la carga se desplaza entre cada placa y su alambre conector hasta que el capacitor se descarga, generalmente, la descarga se observa como una chispa visible. [34]

Es posible expresar la energía potencial eléctrica almacenada en el capacitor como:

$$U = \frac{C \cdot (\Delta V)^2}{2} \quad (2.15)$$

### 2.2.8 Conductores.

Los conductores eléctricos son aquellos que tienen poca resistencia a la circulación de la corriente eléctrica, debido a sus propiedades eléctricas. Su estructura atómica permite el movimiento de los electrones a través de ellos, por lo que favorece la transmisión de electricidad. [33] Materiales como el cobre, el aluminio y la plata son buenos conductores eléctricos, cuando están con carga en alguna pequeña zona, la carga se distribuye de inmediato en toda la superficie del material. [34]

## CAPÍTULO 3

# ANÁLISIS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se darán a conocer detalladamente los resultados y análisis obtenidos de cada una de las actividades realizadas durante la investigación.

### 3.1. Tipo de planta.

Mediante la revisión bibliográfica para la investigación realizada, se pudo conocer que las plantas se dividen en tres grupos según el proceso fotosintético que estas realizan, estos son: plantas de tipo C3, plantas de tipo C4 y plantas de tipo CAM, siendo las plantas tipo C4 las que presentan el mejor proceso fotosintético ya que tiene muy poca fotorrespiración, pero este tipo de plantas son de climas tropicales los cuales tienen temperaturas entre 30 y 47°C, ya que la investigación se realizó en Mérida, estado Mérida, donde su clima es templado, este tipo de planta no puede ser utilizado de manera eficiente, es por ello que se escogió trabajar con plantas de tipo C3 que son las que mejor se adaptan al clima merideño ya que la temperatura óptima para el proceso fotosintético de las mismas se ubica entre 15 y 25°C tal como se muestra en la tabla 2.1.

Para esta investigación se escogió trabajar con Anturio (*Anthurium Scherzerianum*) comúnmente conocida como Cala Roja, Alcatraz (*Zantedeschia aethiopica*) también conocida como lirio de agua y Bambú (*Bambusoideae*).

Estas plantas se desarrollan muy bien en climas templados con temperaturas relativamente bajas, además de que poseen la capacidad de adaptarse de manera eficiente en condiciones donde el terreno presenta un alto nivel de humedad, siendo esta característica de vital importancia ya que tener un sustrato con estas propiedades facilita la captación de electrones que es lo que se buscó lograr con la investigación realizada.

### 3.2 Efectos capacitivos y conductores.

Una vez que se estudió la teoría sobre capacitancia, se decidió utilizar la configuración de capacitor de placas paralelas ya que la finalidad fue captar los electrones producidos a nivel de las raíces de las plantas, la configuración antes mencionada se adaptó muy bien porque permitió ubicar las raíces de las plantas justo en medio de las placas que lo conforman, de esta manera los electrones se producen justo dentro del arreglo capacitivo, además de facilitar los cálculos realizados para capacitancia, donde solo se requiere saber el área efectiva de las placas, la distancia entre ellas y la constante dieléctrica para el medio utilizado, en este caso, tierra húmeda.

Siendo el cobre y el aluminio dos de los mejores conductores que existen, se decidió utilizarlos como ánodo (+) y cátodo (-) respectivamente en la configuración de capacitor de placas paralelas, ya que el cobre posee mejor conductividad que el aluminio este se establece como ánodo (+). Además al estar ambos electrodos en la misma tierra sin ningún tipo de aislamiento es necesario que sean de materiales diferentes para lograr establecer una diferencia de potencial diferente de 0 V.

### 3.3 Desarrollo del prototipo.

Para desarrollar el prototipo fue necesario realizar cuatro (4) experimentos, que se describirán a continuación.

- **Primer experimento:** se diseñó una maceta de madera con forma cúbica de 20 cm por cada arista, en la cual se introdujeron placas de cobre en posición vertical, cada placa cuadrada de  $400 \text{ cm}^2$ , separadas entre sí 2 cm, logrando formar diez (10) capacitores (figura 3.1) que luego se conectaron en paralelo para aumentar la capacitancia total, obteniendo 11,747 nF (figura 3.2), los espacios vacíos se llenaron con tierra abonada en la cual se introdujeron las raíces del Anturio (figura 3.3), esta forma de armar el prototipo no fue eficiente ya que las raíces de la planta no se distribuían equitativamente en cada capacitor formado, además el voltaje obtenido fue muy bajo, 0,016 mV (figura 3.4).



**Figura 3.1. Maceta de madera y placas de cobre, experimento 1**



**Figura 3.2. Capacitancia total, experimento 1**



**Figura 3.3. Experimento 1**



**Figura 3.4. Voltaje generado, experimento 1**

- Segundo experimento:** se utilizó un recipiente plástico de forma cilíndrica de 14 cm de radio y 35 cm de altura, en este recipiente se utilizó una placa de aluminio (figura 3.5) y una placa de cobre (figura 3.6), cada una de  $392 \text{ cm}^2$ , a diferencia del primer experimento, en esta ocasión las placas se colocaron en posición horizontal, y se usó un solo par de placas, se armó de la siguiente manera: primero se colocaron 4 cm de tierra abonada, luego se ubicó la placa de aluminio y allí 2 cm de tierra abonada nuevamente, luego se introdujeron los lirios de agua (figura 3.5) y 8 cm de tierra abonada, por último se colocó la placa de cobre y sobre ella 10 cm de tierra abonada (figura 3.6), de esta manera las raíces de la planta quedaron totalmente en medio de las placas, con esta configuración se logró obtener una capacitancia de  $223,24 \text{ mF}$  (figura 3.9) y generar  $566 \text{ mV}$  (figura 3.8).



**Figura 3.5. Construcción Maceta, experimento 2**



**Figura 3.6. Construcción Maceta, experimento 2**



**Figura 3.7. Experimento 2**



**Figura 3.8. Voltaje generado, experimento 2**



Figura 3.9. Capacitancia obtenida, experimento 2

- Tercer experimento:** ya que en el segundo experimento los resultados fueron bastante aceptable, se procedió a construir un arreglo con veinte (20) plantas de bambú emulando su forma constructiva, se usó una gavera de cerveza para aprovechar cada una de sus divisiones y en ellas sembrar un (1) bambú con cada par de placas (figura 3.10), se colocó 2 cm de tierra abonada, luego una placa de aluminio de  $31 \text{ cm}^2$  (figura 3.11) sobre ella 1 cm de tierra abonada, se sembró el bambú con 7 cm de tierra abonada y se ubicó la placa de cobre, para finalizar se colocó 2 cm de tierra abonada. Cada celda construida genero 100 mV pero al intentar conectarlas en serie no se sumaban las diferencias de potencial debido a que todas se encontraban con la misma tierra.



Figura 3.10. Construcción maceta, experimento 3





**Figura 3.11. Maceta, experimento 3**

- **Cuarto experimento:** se utilizó la misma configuración para armar el prototipo del segundo y tercer experimento pero en esta ocasión se disminuyó la distancia entre las placas a 3 cm y cada bambú se sembró por separado en vasos plásticos (figura 3.12 y 3.13), con la finalidad de que cada uno fuese una celda aislada (figura 3.14), en esta ocasión cada bambú logro generar entre 200 mV a 550 mV (figuras 3.16 y 3.17) y al conectarlo en serie las diferencias de potencial se sumaban efectivamente (figura 3.18).



**Figura 3.12. Construcción de celda, experimento 4**



**Figura 3.13. Construcción de celda, experimento 4**



**Figura 3.14 Construcción de celda, experimento 4**



**Figura 3.15. Electrodo, experimento 4**



**Figura 3.16. Voltaje generado, experimento 4**

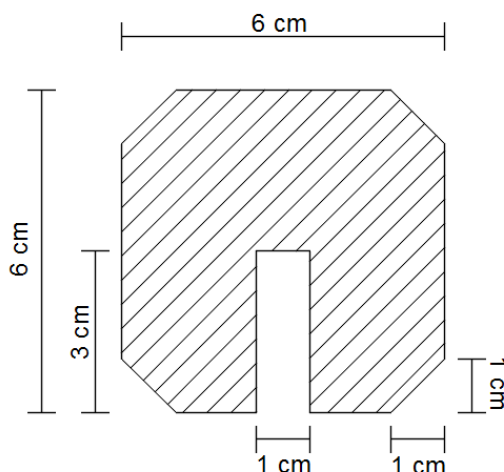


**Figura 3.17. Voltaje generado, experimento 4**

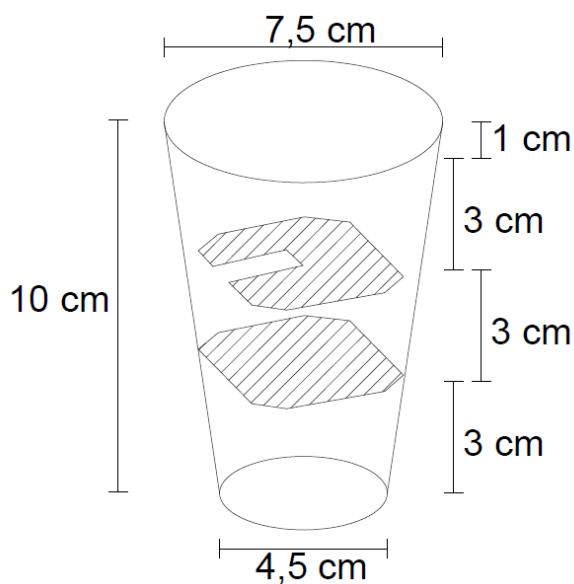


**Figura 3.18. Conexión en serie, experimento 4**

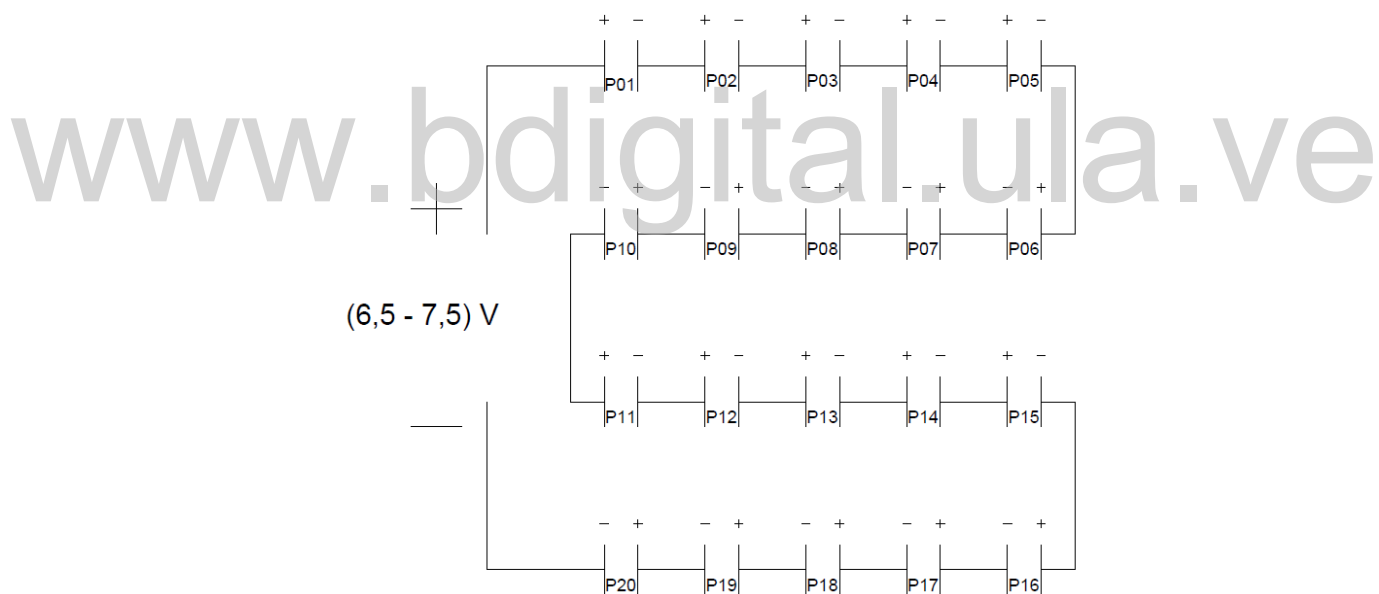
- Propuesta del Prototipo:** se propuso la construcción de veinte (20) celdas, cada celda aislada de las demás utilizando para ello un vaso plástico, los electrodos serán dos (2) placas ubicadas en posición horizontal, una de aluminio y otra de cobre, cada una de  $31 \text{ cm}^2$  (figura 3.19) y sembrando una planta de bambú de manera que sus raíces queden ubicadas entre los electrodos, la disposición serían: 3 cm de tierra abonada y sobre ella la placa de aluminio (Cátodo), luego 3 cm de tierra abonada donde se siembra las raíces del bambú y sobre ella la placa de cobre (Ánodo), por último se termina de sembrar el bambú con 3 cm de tierra abonada dejando 1 cm hasta el borde superior del vaso (figura 3.20). Estas veinte (20) celdas se conectan en serie para poder sumar las diferencias de potencial que cada una puede aportar (figura 3.21) y mediante un circuito sencillo demostrar que de esta manera es posible captar los electrones producidos a nivel de las raíces y almacenarlos.



**Figura 3.19. Medidas de las placas utilizadas en el prototipo como ánodo**



**Figura 3.20. Medidas de la celda utilizada, y disposición de sus elementos**



**Figura 3.21. Conexión de las 20 celdas construidas**

### 3.4 Validación del prototipo.

Para validar el prototipo fue necesario la realización de varias pruebas de estudio, estas fueron: medición de la capacitancia en condiciones de sustrato húmedo y seco, variación del voltaje

para diferentes condiciones de humedad, variación del voltaje según la hora del día, corriente que es capaz de entregar, capacidad para alimentar determinada carga y cargar una batería.

### 3.4.1 Medición de la capacitancia en condiciones de sustrato húmedo o seco.

Para esta prueba se dejó secar el sustrato de las plantas durante cinco (5) días, de manera que no se encontrara humedad alguna en el sustrato y poder medir la capacitancia de cada planta cuando el suelo es totalmente seco, luego se colocaron 40 ml de agua diariamente durante 5 días y se procedió a medir la capacitancia de cada planta bajo condiciones de suelo húmedo, estas medidas fueron tomadas con un capacímetro digital.

**Tabla 3.1. Capacitancia medida en sustrato seco y sustrato húmedo**

Planta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>S. Seco</b>	1,10 pF	1,25 pF	0,90 pF	0,95 pF	1,45 pF	0,92 pF	0,90 pF	1,10 pF	0,95 pF	1,10 pF
<b>S. Húmedo</b>	3,40 pF	6,00 pF	4,50 pF	5,00 pF	2,85 pF	5,40 pF	4,80 pF	6,20 pF	4,55 pF	6,20 pF
Planta	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<b>S. Seco</b>	1,70 pF	0,80 pF	0,60 pF	1,10 pF	1,10 pF	0,80 pF	1,83 pF	0,80 pF	0,60 pF	0,90 pF
<b>S. Húmedo</b>	9,80 pF	4,25 pF	3,50 pF	3,70 pF	5,20 pF	3,60 pF	8,70 pF	4,00 pF	2,90 pF	4,60 pF

#### 3.4.1.1 Análisis de la capacitancia en condiciones de sustrato húmedo o seco.

Estudiando los valores de capacitancia para suelo húmedo y seco obtenemos que para suelo seco la configuración armada deba tener de 1,83 pF a 5,48 pF, mientras que con el suelo húmedo su valor estará entre 9,14 pF y 27,41 pF.

Estos valores se obtienen utilizando la fórmula:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (2.7)$$

Donde  $\epsilon_0$  es la permitividad del vacío que equivale a  $8,85 \times 10^{-12}$  F/m,  $\epsilon_r$  es la constante dieléctrica del medio que en nuestro caso varía de 2 a 6 para suelo seco y de 10 a 30 para suelo húmedo,  $A$  es el área eficaz de las placas que mide  $0,0031 \text{ m}^2$  y  $d$  es la distancia entre las placas que mide  $0,03 \text{ m}$ .

Las mediciones obtenidas para la capacitancia con suelo seco varían entre 0,60 pF y 1,83 pF, y para suelo húmedo se obtuvieron medidas entre 2,85 pF y 9,80 pF tal como se observa en la tabla 3.1, siendo estos resultados bastante aceptables y cercanos a los valores teóricos obtenidos, cabe destacar que según [35] el valor de la constante dieléctrica se puede ver afectada por impurezas en el material así como variaciones en las condiciones climáticas que lo rodean, es por ello que se observan variaciones en cada una de las medidas obtenidas aunque no difieren mucho de su valor teórico.

### 3.4.2 Variación del voltaje para diferentes condiciones de humedad.

Para realizar esta prueba se dejó secar el sustrato durante cinco (5) días, y así poder comenzar las mediciones bajo ningún tipo de humedad, luego fue necesario ir colocando 20 ml de agua dulce gradualmente hasta saturar las plantas con 120 ml, se procedió a tomar medida de la diferencia de potencial generada por cada planta cada vez que se agregaba agua al recipiente donde se encontraban, estas medidas de voltaje fueron tomadas con un multímetro digital.

**Tabla 3.2. Diferencia de Potencial vs Humedad**

ml	mV P1	mV P2	mV P3	mV P4	mV P5	mV P6	mV P7	mV P8	mV P9	mV P10
0	269	332	256	287	331	387	268	259	312	261
20	238	364	332	306	321	411	374	296	353	260
40	287	388	406	363	342	435	404	335	387	288
60	293	381	387	380	317	441	400	330	407	309
80	298	373	416	390	356	450	415	330	418	311
100	303	373	422	399	345	450	422	330	420	311
120	341	388	407	411	284	444	422	317	373	327
ml	mV P11	mV P12	mV P13	mV P14	mV P15	mV P16	mV P17	mV P18	mV P19	mV P20
0	392	375	346	133	267	272	430	293	264	334
20	393	362	386	189	30	333	425	267	182	362
40	461	384	401	191	318	375	385	328	255	398
60	438	382	428	210	319	430	375	335	277	393
80	432	385	430	210	323	437	413	326	274	381
100	397	397	435	200	324	416	350	338	282	375
120	347	437	450	165	336	393	306	352	297	390

### 3.4.2.1 Análisis de la variación del voltaje para diferentes condiciones de humedad.

Con los resultados obtenidos en la tabla 3.2 se construyeron los siguientes gráficos:

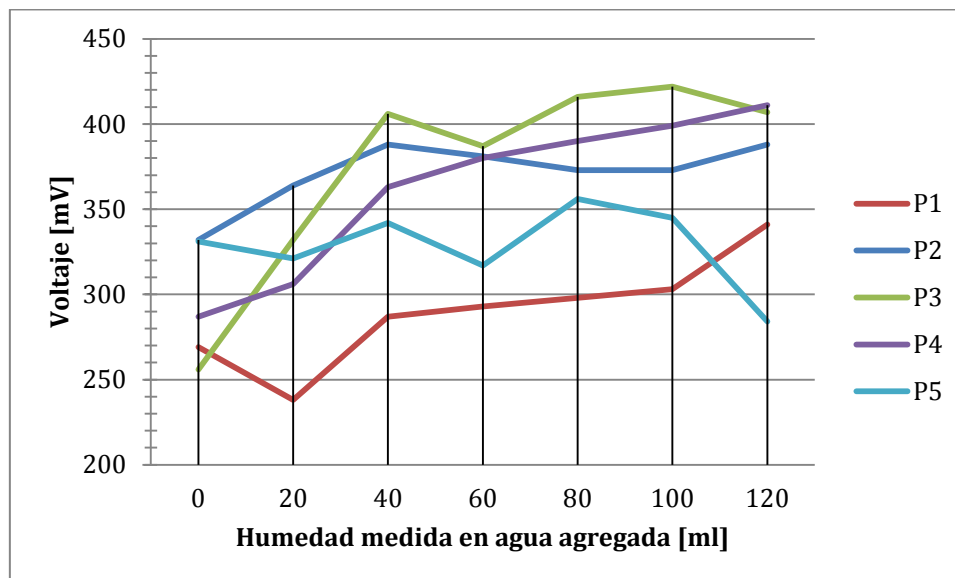


Gráfico 3.1. Voltaje vs Humedad, plantas P1, P2, P3, P4 y P5

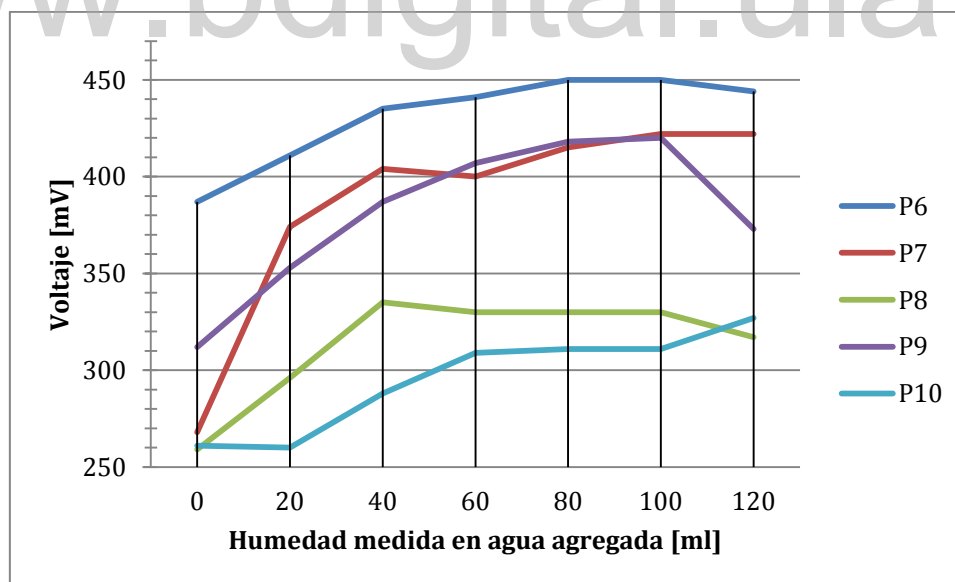
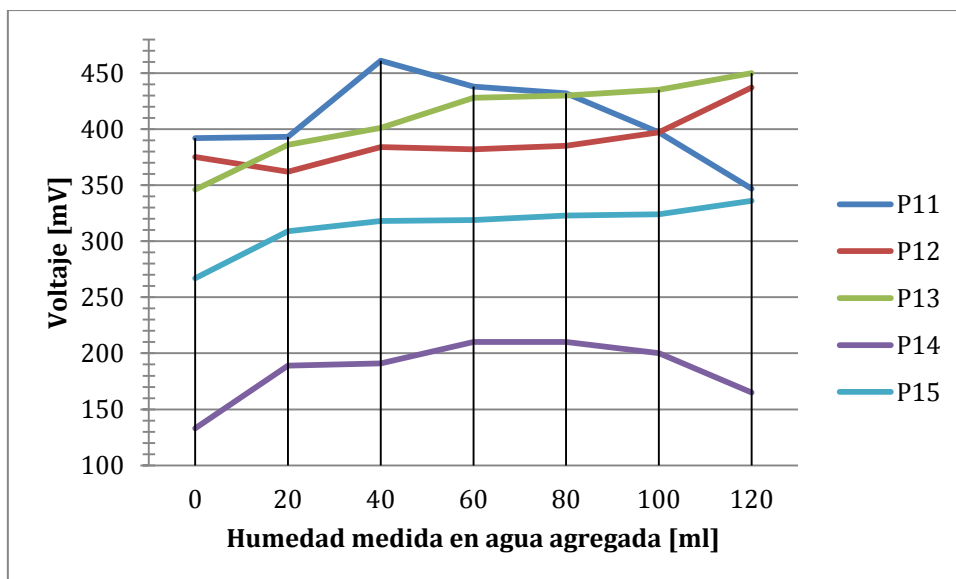
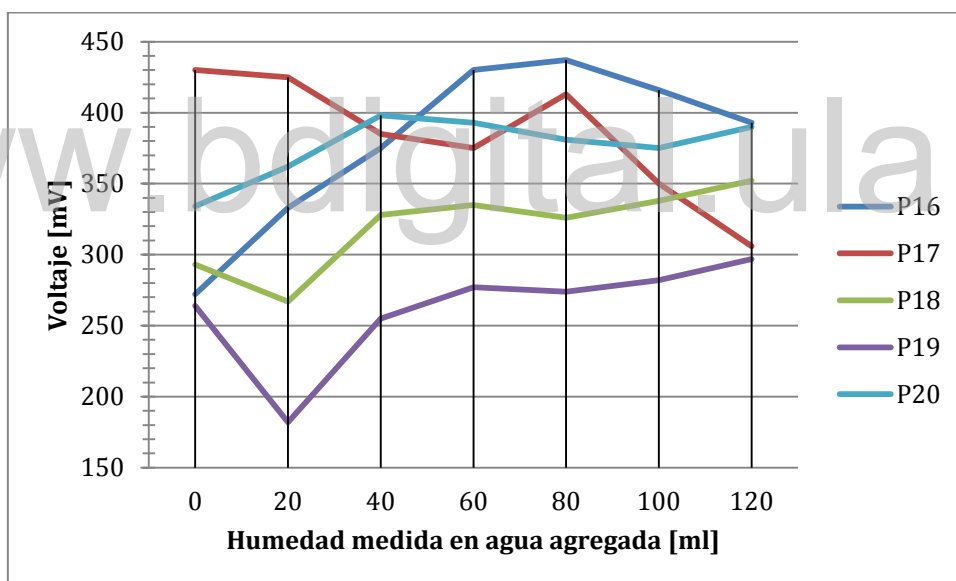


Gráfico 3.2. Voltaje vs Humedad, plantas P6, P7, P8, P9 y P10





**Gráfico 3.3. Voltaje vs Humedad, plantas P11, P12, P13, P14 y P15**



**Gráfico 3.4 Voltaje vs Humedad, plantas P16, P17, P18, P19 y P20**

Al estudiar cada una de los gráficos se puede observar que el voltaje obtenido mejora conforme el sustrato en el que se encuentra la planta está más húmedo, por lo que un suelo suficientemente húmedo representa condiciones óptimas para la captura de electrones, sin embargo en algunos casos como los de las plantas P3, P5, P8, P9, P11, P14, P16 y P17 se

puede observar que si el sustrato se satura de agua el prototipo no es eficaz y el voltaje que se pueda obtener disminuye.

### 3.4.3 Variación del voltaje según la hora del día.

Esta prueba consistió en tomar medida de la diferencia de potencial que es capaz de entregar cada planta en diferentes horas del día (mañana, tarde y noche) bajo las mismas condiciones de humedad siempre, las horas que se escogieron para realizar las medidas fueron: 8 am, 12 m, 4 pm y 8 pm. Diariamente se le colocaba 40 ml de agua dulce a las 7 am, y luego se tomaban las medidas a las horas ya estipuladas, este proceso se realizó rigurosamente durante diez (10) días continuos.

**Tabla 3.3. Diferencia de Potencial en diferentes horas del día, Día 1**

Día	Hora	mV P1	mV P2	mV P3	mV P4	mV P5	mV P6	mV P7	mV P8	mV P9	mV P10
1	08:00 a.m.	269	360	402	351	378	428	412	314	278	301
	12:00 p.m.	329	376	427	370	393	401	437	325	259	314
	04:00 p.m.	340	383	431	372	390	370	330	315	260	315
	08:00 p.m.	348	391	447	396	389	345	424	303	278	316
Día	Hora	mV P11	mV P12	mV P13	mV P14	mV P15	mV P16	mV P17	mV P18	mV P19	mV P20
1	08:00 a.m.	427	357	397	150	275	385	280	351	294	308
	12:00 p.m.	432	377	420	163	306	405	296	360	251	324
	04:00 p.m.	430	380	406	163	310	410	311	357	232	333
	08:00 p.m.	424	389	395	166	334	418	343	348	210	360

**Tabla 3.4. Diferencia de Potencial en diferentes horas del día, Día 2**

Día	Hora	mV P1	mV P2	mV P3	mV P4	mV P5	mV P6	mV P7	mV P8	mV P9	mV P10
2	08:00 a.m.	305	377	482	425	294	328	421	334	334	323
	12:00 p.m.	301	384	467	421	298	312	451	334	335	336
	04:00 p.m.	307	393	453	406	336	311	441	343	297	361
	08:00 p.m.	300	378	476	430	248	306	469	353	343	432
Día	Hora	mV P11	mV P12	mV P13	mV P14	mV P15	mV P16	mV P17	mV P18	mV P19	mV P20
2	08:00 a.m.	334	392	368	204	356	412	415	367	228	344
	12:00 p.m.	329	402	420	196	355	440	387	387	185	381
	04:00 p.m.	332	403	415	201	351	452	380	332	180	344
	08:00 p.m.	218	455	454	222	337	505	275	377	194	444

Tabla 3.5. Diferencia de Potencial en diferentes horas del día, Día 3

Día	Hora	mV P1	mV P2	mV P3	mV P4	mV P5	mV P6	mV P7	mV P8	mV P9	mV P10
3	08:00 a.m.	275	375	504	437	346	355	443	352	317	405
	12:00 p.m.	335	385	482	451	215	307	450	361	308	429
	04:00 p.m.	235	342	445	357	240	288	450	336	280	430
	08:00 p.m.	260	361	466	395	239	285	255	245	330	425
Día	Hora	mV P11	mV P12	mV P13	mV P14	mV P15	mV P16	mV P17	mV P18	mV P19	mV P20
3	08:00 a.m.	400	360	351	229	359	412	481	358	184	333
	12:00 p.m.	379	455	458	206	373	486	270	371	284	420
	04:00 p.m.	236	444	425	237	369	455	314	367	188	387
	08:00 p.m.	244	436	424	215	328	441	297	356	195	444

Tabla 3.6. Diferencia de Potencial en diferentes horas del día, Día 4

Día	Hora	mV P1	mV P2	mV P3	mV P4	mV P5	mV P6	mV P7	mV P8	mV P9	mV P10
4	08:00 a.m.	259	361	493	437	349	297	453	350	243	423
	12:00 p.m.	233	404	488	446	238	320	461	355	300	438
	04:00 p.m.	252	400	482	449	280	298	460	359	281	417
	08:00 p.m.	246	359	470	385	251	275	434	345	321	427
Día	Hora	mV P11	mV P12	mV P13	mV P14	mV P15	mV P16	mV P17	mV P18	mV P19	mV P20
4	08:00 a.m.	313	393	368	220	366	449	367	390	226	369
	12:00 p.m.	403	430	424	218	345	472	293	401	236	419
	04:00 p.m.	407	428	426	221	353	470	311	399	236	427
	08:00 p.m.	258	429	416	216	331	448	301	375	200	442

Tabla 3.7. Diferencia de Potencial en diferentes horas del día, Día 5

Día	Hora	mV P1	mV P2	mV P3	mV P4	mV P5	mV P6	mV P7	mV P8	mV P9	mV P10
5	08:00 a.m.	293	361	476	401	203	280	400	221	302	401
	12:00 p.m.	340	375	490	420	222	269	403	324	286	400
	04:00 p.m.	320	394	484	444	250	300	472	366	320	436
	08:00 p.m.	300	402	476	438	253	307	463	361	333	441
Día	Hora	mV P11	mV P12	mV P13	mV P14	mV P15	mV P16	mV P17	mV P18	mV P19	mV P20
5	08:00 a.m.	277	435	404	214	343	460	272	360	237	388
	12:00 p.m.	306	455	437	217	385	474	243	364	282	403
	04:00 p.m.	373	460	453	188	354	500	292	380	255	445
	08:00 p.m.	220	454	456	216	342	498	266	378	212	442

Tabla 3.8. Diferencia de Potencial en diferentes horas del día, Día 6

Día	Hora	mV P1	mV P2	mV P3	mV P4	mV P5	mV P6	mV P7	mV P8	mV P9	mV P10
6	08:00 a.m.	316	384	458	327	210	222	323	230	352	347
	12:00 p.m.	299	430	455	413	220	290	388	305	309	372
	04:00 p.m.	345	390	440	375	215	350	335	320	280	325
	08:00 p.m.	353	397	456	393	262	325	400	305	275	320
Día	Hora	mV P11	mV P12	mV P13	mV P14	mV P15	mV P16	mV P17	mV P18	mV P19	mV P20
6	08:00 a.m.	194	447	465	200	334	505	226	364	228	409
	12:00 p.m.	369	467	489	214	309	534	281	368	258	418
	04:00 p.m.	425	397	426	206	315	480	309	355	229	383
	08:00 p.m.	420	390	415	200	309	460	301	343	215	380

Tabla 3.9. Diferencia de Potencial en diferentes horas del día, Día 7

Día	Hora	mV P1	mV P2	mV P3	mV P4	mV P5	mV P6	mV P7	mV P8	mV P9	mV P10
7	08:00 a.m.	350	391	453	390	260	310	395	300	268	311
	12:00 p.m.	365	400	460	420	300	321	402	333	295	340
	04:00 p.m.	360	392	455	415	293	317	400	325	290	329
	08:00 p.m.	341	385	444	382	250	300	382	299	260	301
Día	Hora	mV P11	mV P12	mV P13	mV P14	mV P15	mV P16	mV P17	mV P18	mV P19	mV P20
7	08:00 a.m.	406	387	411	202	301	440	300	331	210	370
	12:00 p.m.	431	405	423	220	323	460	341	340	240	389
	04:00 p.m.	420	400	413	217	315	453	331	340	232	383
	08:00 p.m.	403	381	400	200	297	431	291	315	205	362

Tabla 3.10. Diferencia de Potencial en diferentes horas del día, Día 8

Día	Hora	mV P1	mV P2	mV P3	mV P4	mV P5	mV P6	mV P7	mV P8	mV P9	mV P10
8	08:00 a.m.	345	388	442	380	259	302	391	305	265	309
	12:00 p.m.	370	410	463	426	310	327	405	323	311	351
	04:00 p.m.	368	400	450	417	305	318	401	320	302	345
	08:00 p.m.	350	393	448	405	295	315	395	310	295	315
Día	Hora	mV P11	mV P12	mV P13	mV P14	mV P15	mV P16	mV P17	mV P18	mV P19	mV P20
8	08:00 a.m.	401	387	411	206	300	439	299	321	211	360
	12:00 p.m.	428	410	417	225	333	450	329	350	225	392
	04:00 p.m.	430	408	421	220	324	451	333	345	230	380
	08:00 p.m.	417	396	408	210	315	428	315	316	218	371

**Tabla 3.11. Diferencia de Potencial en diferentes horas del día, Día 9**

Día	Hora	mV P1	mV P2	mV P3	mV P4	mV P5	mV P6	mV P7	mV P8	mV P9	mV P10
9	08:00 a.m.	348	385	450	398	300	308	400	312	300	310
	12:00 p.m.	360	417	471	409	321	333	427	331	396	347
	04:00 p.m.	357	411	467	405	309	326	417	328	338	339
	08:00 p.m.	347	401	453	380	301	310	401	300	315	317
Día	Hora	mV P11	mV P12	mV P13	mV P14	mV P15	mV P16	mV P17	mV P18	mV P19	mV P20
9	08:00 a.m.	415	411	405	209	319	415	310	316	215	417
	12:00 p.m.	435	458	420	218	339	437	331	340	225	409
	04:00 p.m.	430	463	416	220	333	435	333	335	220	400
	08:00 p.m.	421	428	401	213	311	420	308	320	210	389

**Tabla 3.12. Diferencia de Potencial en diferentes horas del día, Día 10**

Día	Hora	mV P1	mV P2	mV P3	mV P4	mV P5	mV P6	mV P7	mV P8	mV P9	mV P10
10	08:00 a.m.	338	397	441	375	297	305	397	295	305	320
	12:00 p.m.	365	421	458	401	319	329	409	321	330	351
	04:00 p.m.	360	416	450	397	323	327	405	315	321	341
	08:00 p.m.	341	400	438	385	307	311	390	303	307	318
Día	Hora	mV P11	mV P12	mV P13	mV P14	mV P15	mV P16	mV P17	mV P18	mV P19	mV P20
10	08:00 a.m.	420	410	395	206	301	411	300	318	206	413
	12:00 p.m.	435	440	418	217	324	428	338	330	214	419
	04:00 p.m.	425	431	420	215	327	420	327	321	217	421
	08:00 p.m.	411	419	403	200	306	400	308	309	207	401

### 3.4.3.1 Análisis de la variación del voltaje según la hora del día.

Una vez que se tomaron las medidas necesarias durante diez (10) días se utilizaron para la construcción de los siguientes gráficos:

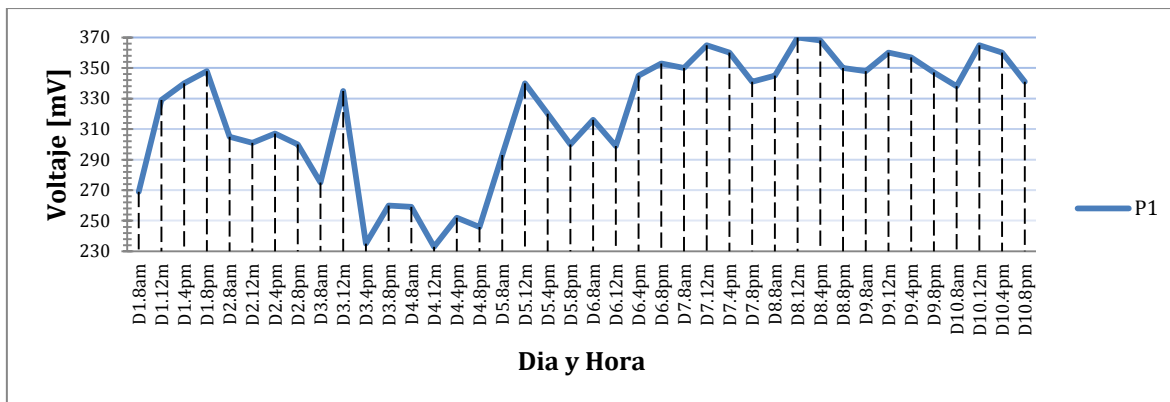


Gráfico 3.5 Variación del voltaje en diferentes horas del día, planta 1

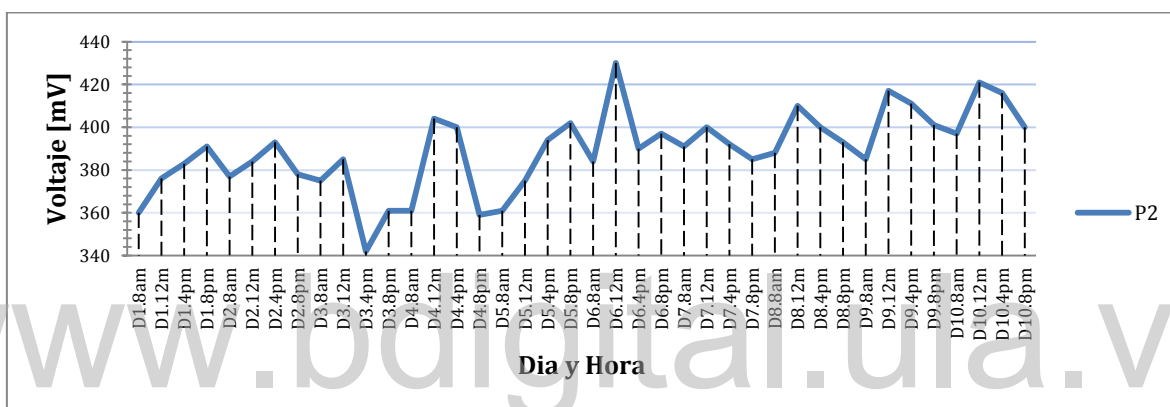


Gráfico 3.6. Variación del voltaje en diferentes horas del día, planta 2

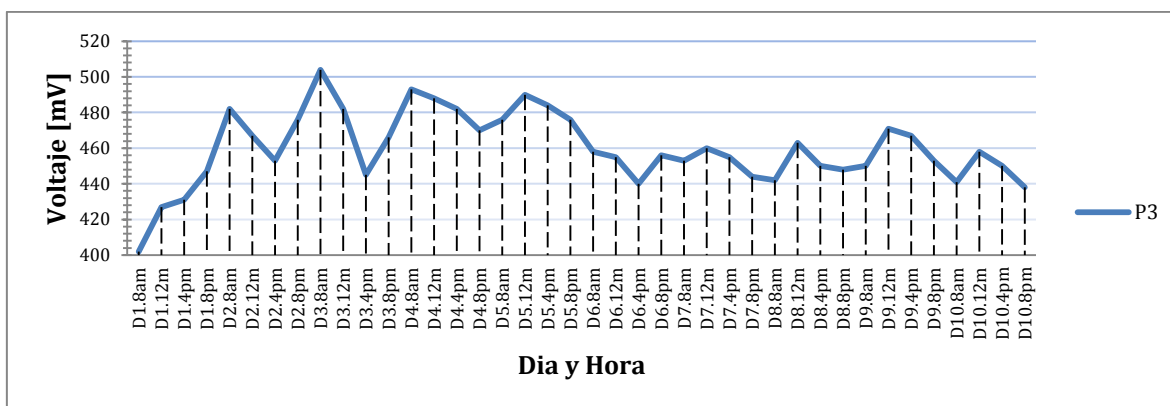


Gráfico 3.7. Variación del voltaje en diferentes horas del día, planta 3

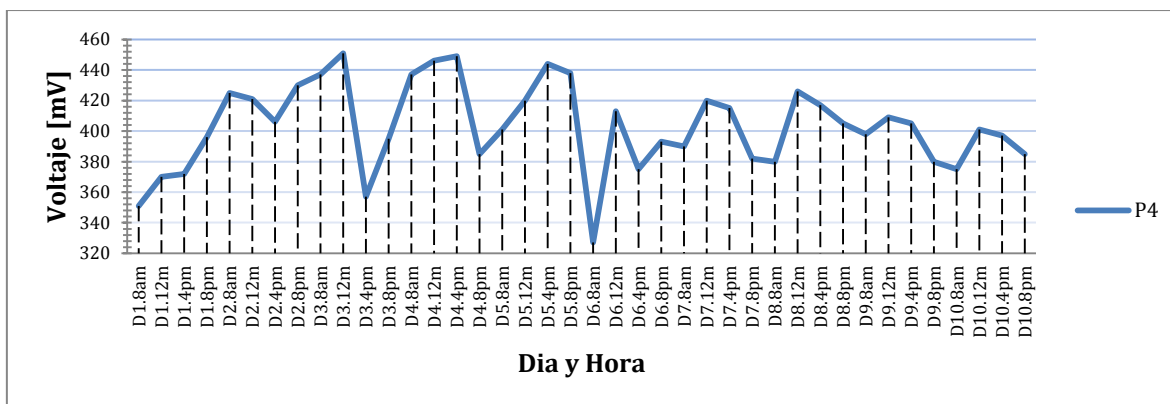


Gráfico 3.8. Variación del voltaje en diferentes horas del día, planta 4

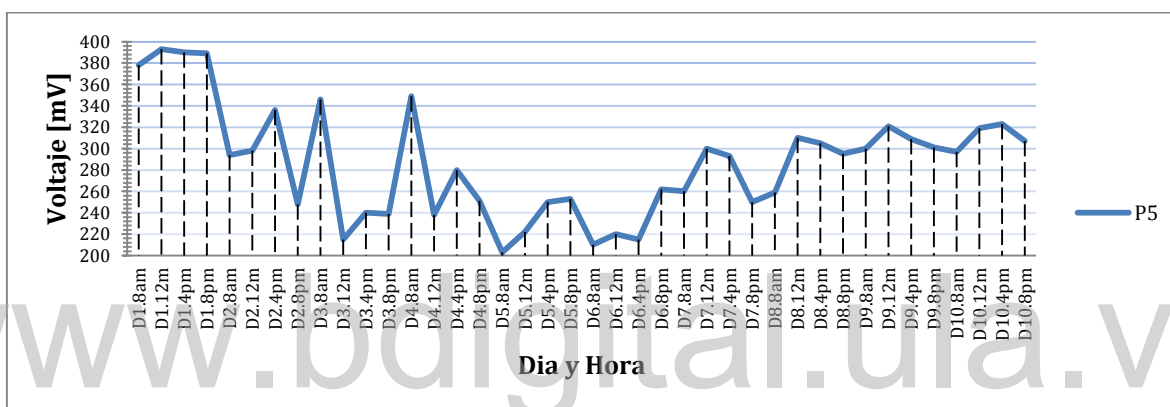


Gráfico 3.9. Variación del voltaje en diferentes horas del día, planta 5

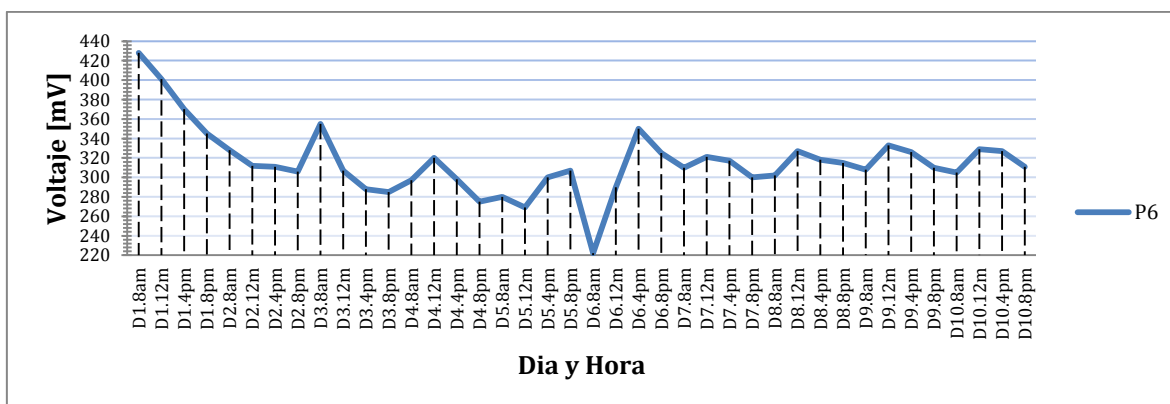


Gráfico 3.10. Variación del voltaje en diferentes horas del día, planta 6

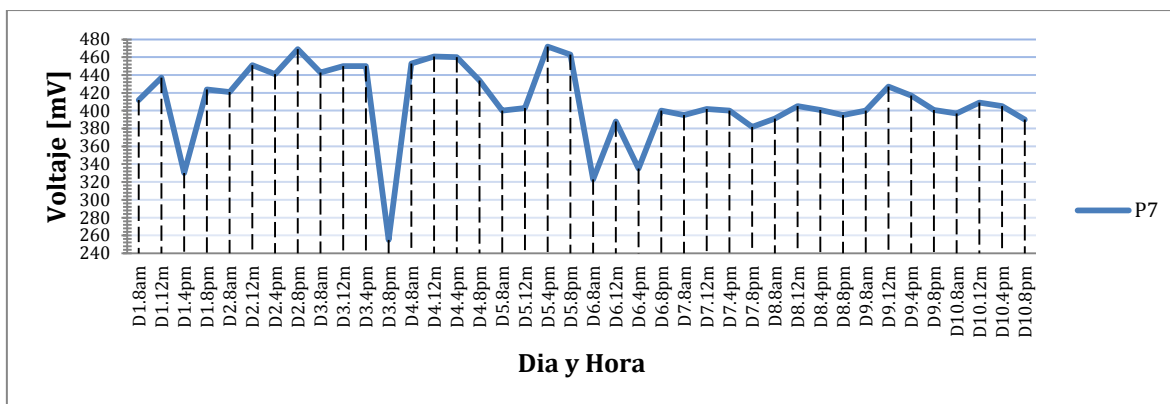


Gráfico 3.11. Variación del voltaje en diferentes horas del día, planta 7

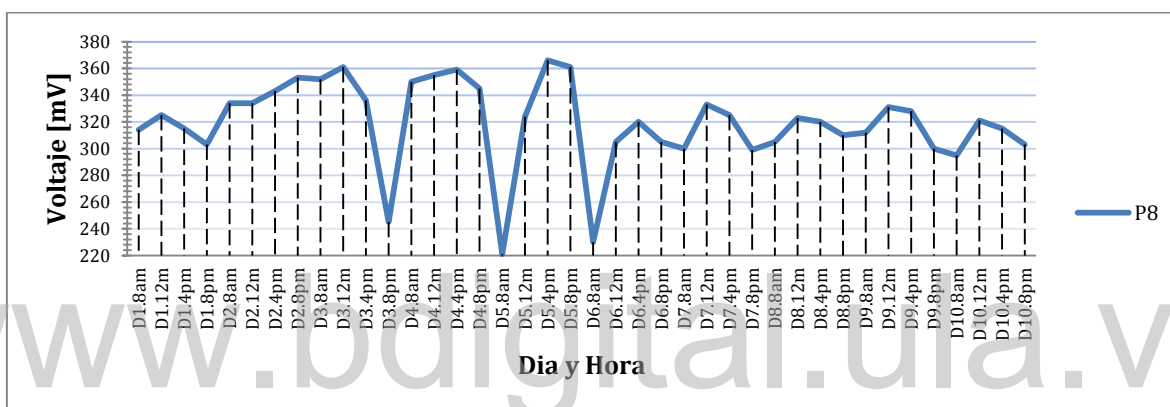


Gráfico 3.12. Variación del voltaje en diferentes horas del día, planta 8

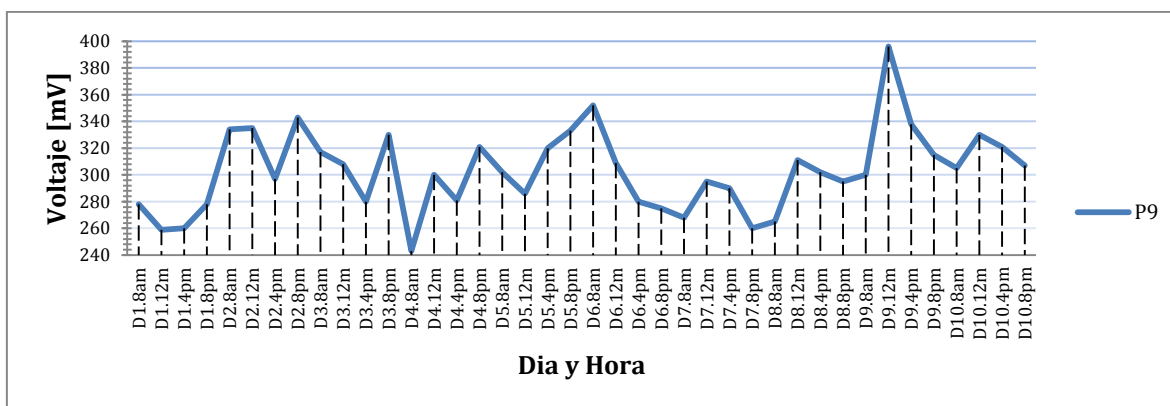


Gráfico 3.13. Variación del voltaje en diferentes horas del día, planta 9



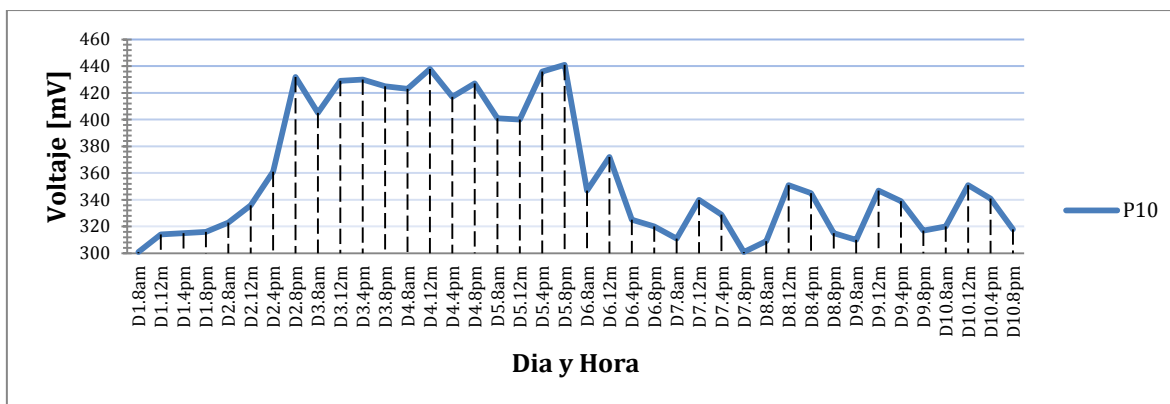


Gráfico 3.14. Variación del voltaje en diferentes horas del día, planta 10

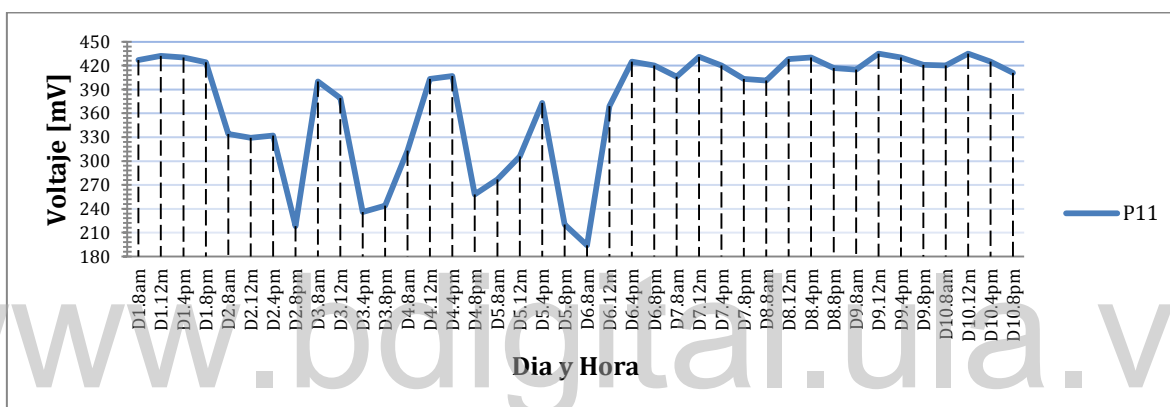


Gráfico 3.15. Variación del voltaje en diferentes horas del día, planta 11

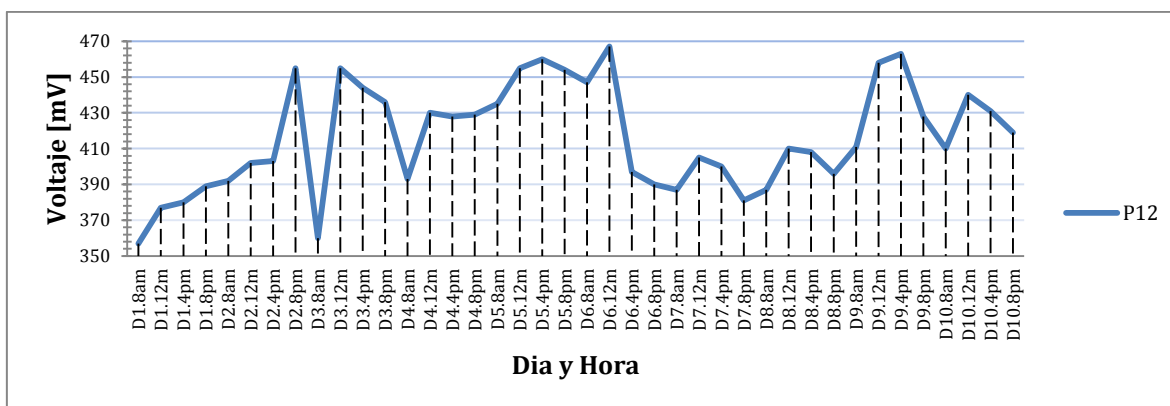


Gráfico 3.16. Variación del voltaje en diferentes horas del día, planta 12

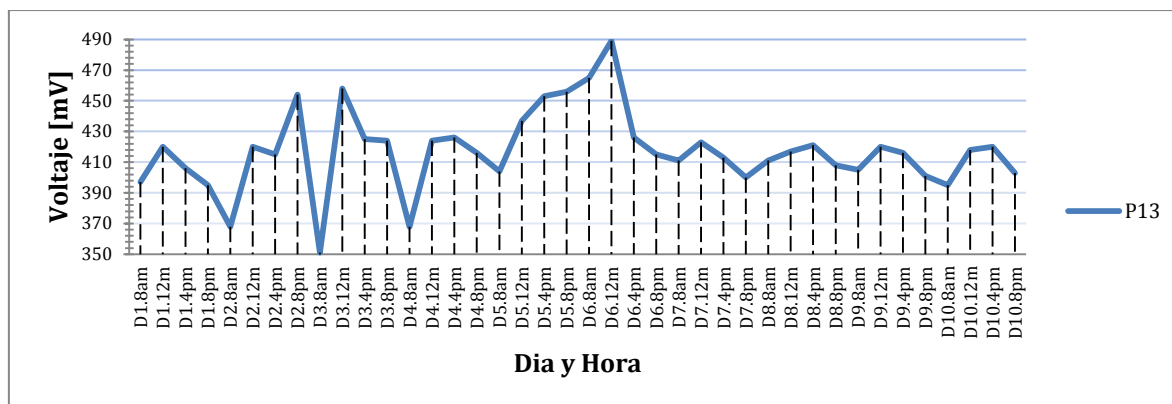


Gráfico 3.17. Variación del voltaje en diferentes horas del día, planta 13

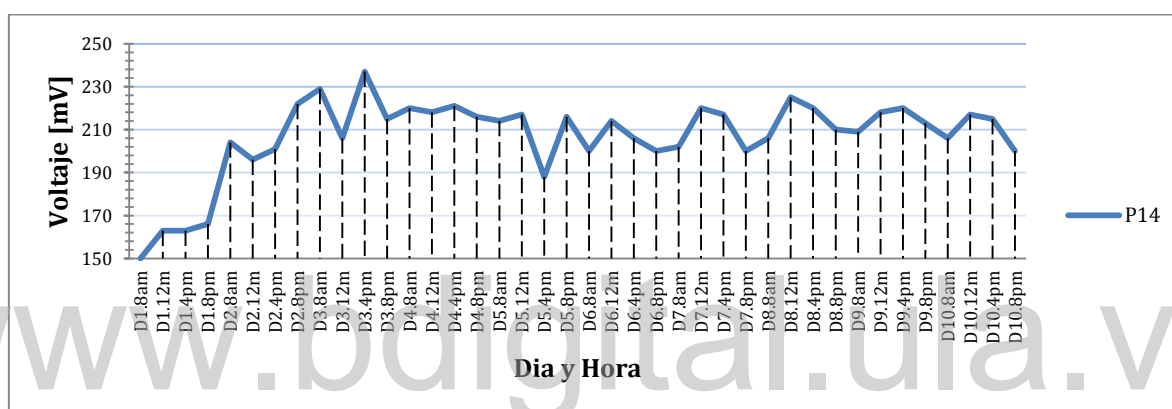


Gráfico 3.18. Variación del voltaje en diferentes horas del día, planta 14

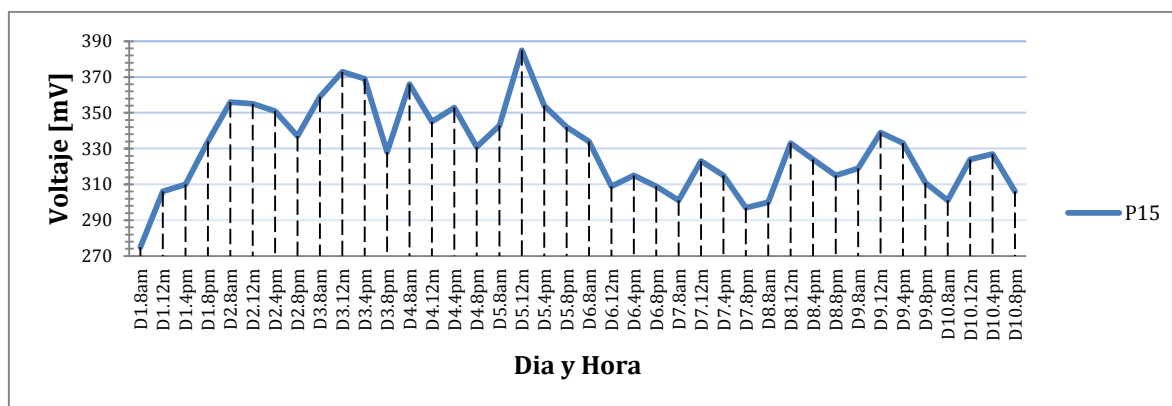


Gráfico 3.19. Variación del voltaje en diferentes horas del día, planta 15

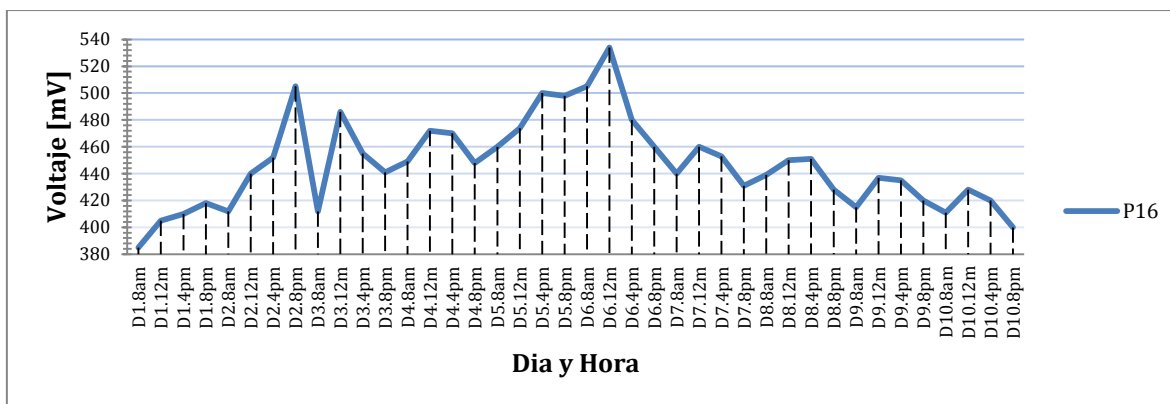


Gráfico 3.20. Variación del voltaje en diferentes horas del día, planta 16

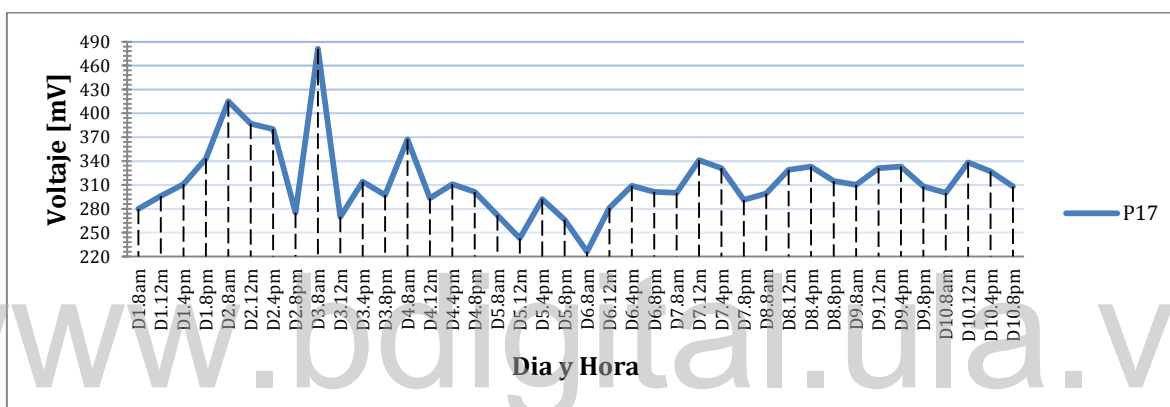


Gráfico 3.21. Variación del voltaje en diferentes horas del día, planta 17

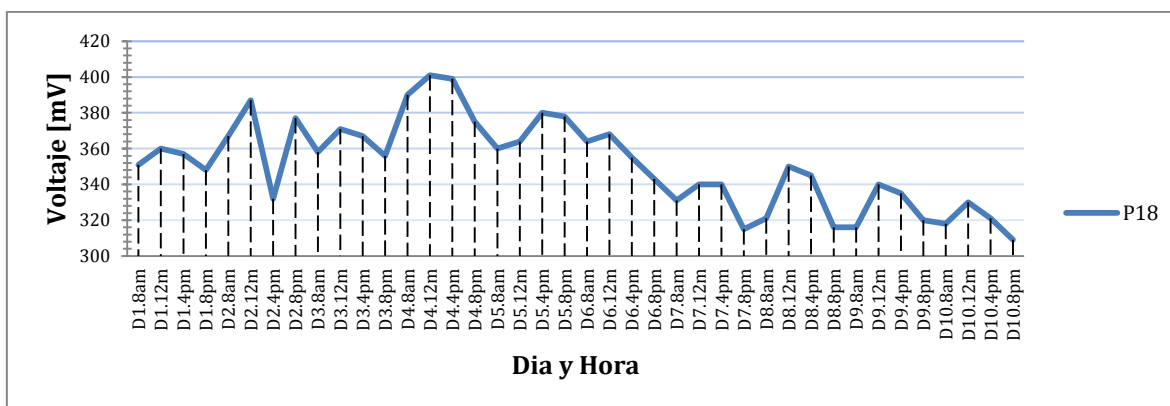
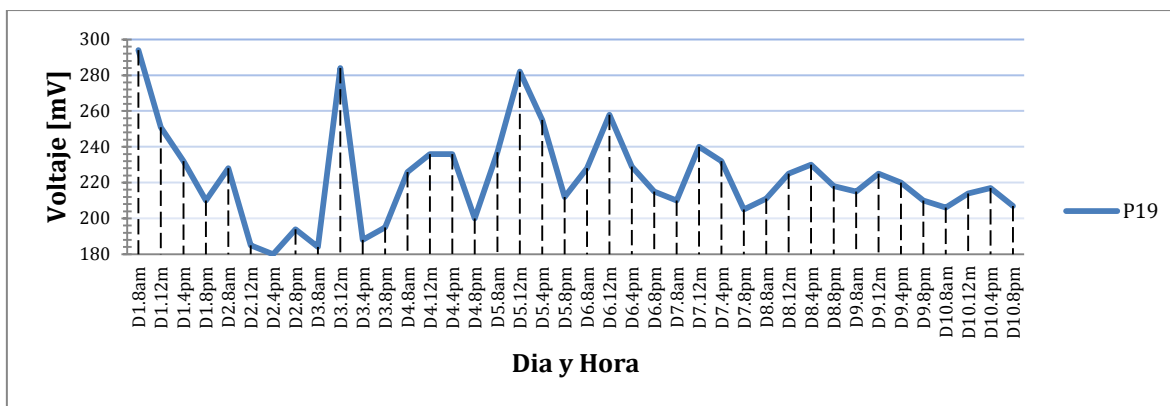
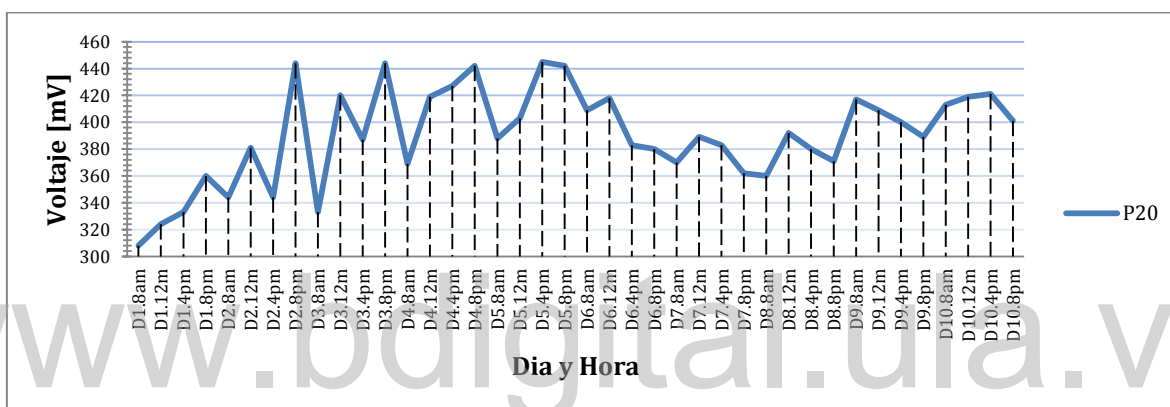


Gráfico 3.22. Variación del voltaje en diferentes horas del día, planta 18



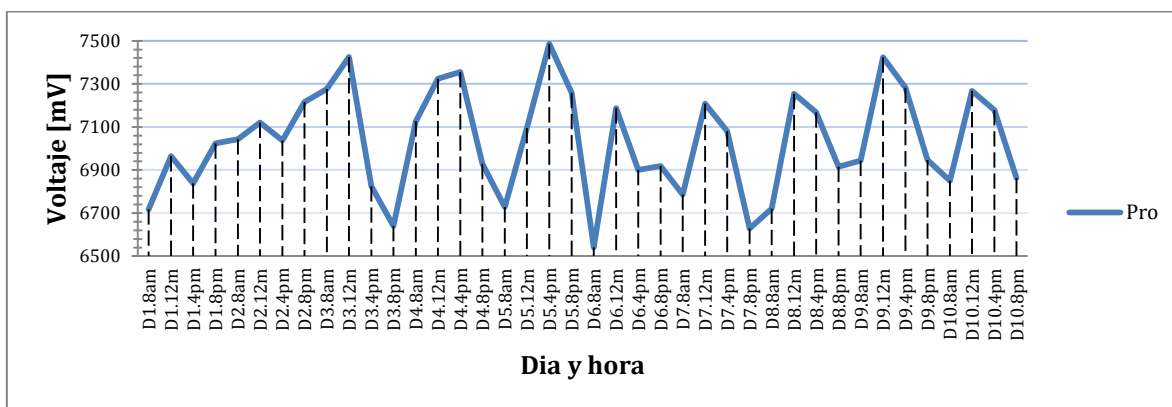
**Gráfico 3.23. Variación del voltaje en diferentes horas del día, planta 19**



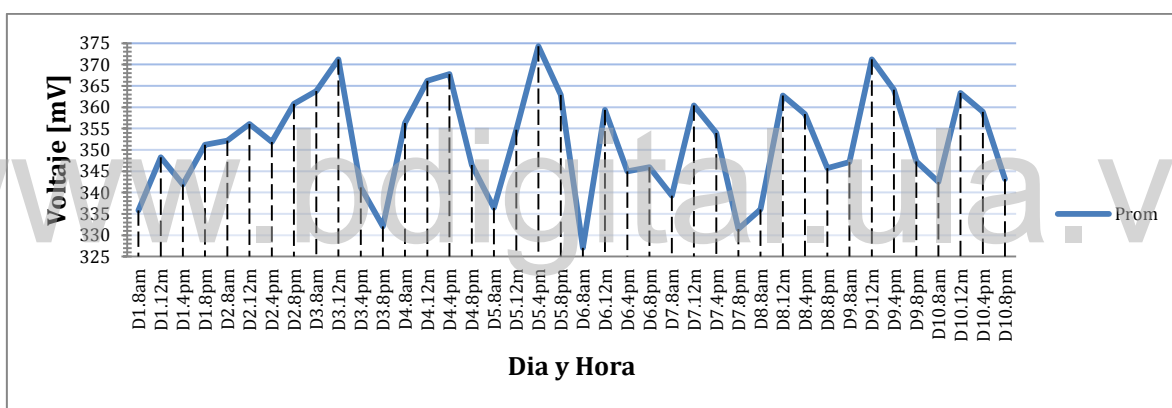
**Gráfico 3.24. Variación del voltaje en diferentes horas del día, planta 20**

En estos gráficos se puede apreciar que entre las 12 del mediodía y las 4 de la tarde existe la tendencia de aumento en el voltaje que es capaz de entregar cada planta, confirmando la teoría de [12, 13] que establece que las plantas presentan mayor fotosíntesis en presencia de luz solar y por ende producen más material orgánico que es aprovechado a nivel de las raíces para la producción de electrones, mientras que entre las 8 de la noche y las 8 de la mañana la tendencia apunta a una disminución de electrones captados, esto se debe a que durante ese intervalo de tiempo la temperatura generalmente disminuye y según [35] estas condiciones afectan la permitividad y conductividad del sustrato, dificultando así el movimiento de electrones desde su producción en las raíces junto a las rizobacterias hasta las placas utilizadas como ánodo en este prototipo.

En los siguientes gráficos se puede apreciar de manera más clara el comportamiento general del prototipo en diferentes horas del día, así como el comportamiento promedio de una planta:



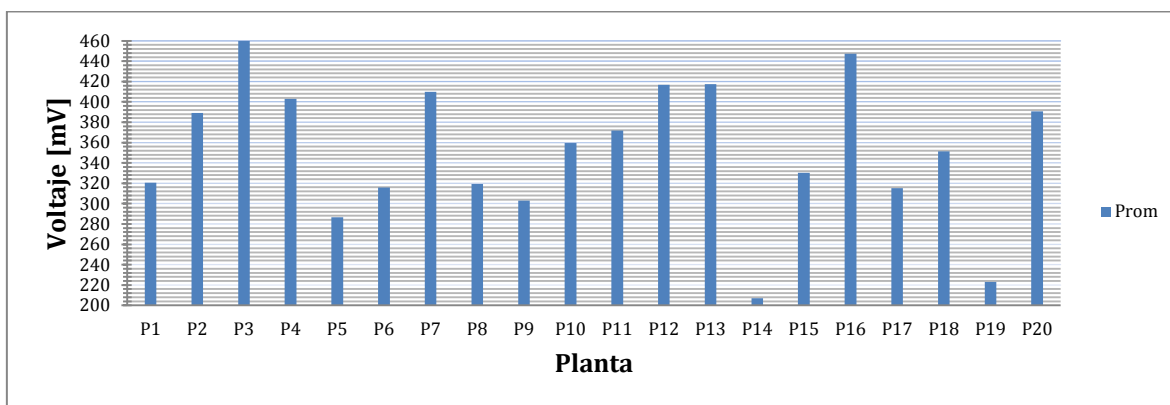
**Gráfico 3.25. Variación del voltaje en diferentes horas del día, Prototipo**



**Gráfico 3.26. Promedio de la variación del voltaje en diferentes horas del día para una planta**

En estos gráficos se puede corroborar que las plantas son capaces de entregar mayor voltaje en horas cercanas al mediodía, debido a que es en ese momento cuando tienen mayor presencia de luz solar y la temperatura del ambiente es la más indicada para su proceso fotosintético, mientras que cerca de las 8 de la noche se obtiene una disminución considerable en el voltaje que se obtiene mediante el prototipo ya que a esta hora no hay presencia de luz solar y la temperatura del ambiente se hace más fría, siendo estas condiciones desfavorables para el proceso fotosintético de la planta y por ende desfavorables para la producción y captura de electrones.

También se obtuvo el valor promedio de voltaje que cada planta entrego durante los diez (10) días de mediciones, y se puede observar en la siguiente gráfica:



**Gráfico 3.27. Voltaje promedio entregado por cada planta**

Aunque las veinte (20) celdas fueron armadas de la misma manera y bajo el mismo diseño, se puede observar una variación en el voltaje que se obtiene de cada una de ellas como lo muestra la gráfica 3.27, esto se debe a que cada planta presenta un desarrollo radicular diferente y es allí donde se producen los electrones que se captan en cada celda, por lo que la planta 3 es quien aporó en promedio el mayor voltaje al prototipo (459,8 mV) y la planta 14 la que menos aportó (207 mV), siendo estas las que mayor y menor desarrollo radicular presentan.

#### 3.4.4 Cálculo de la corriente máxima entregada mediante resistencias.

Esta prueba se le realizó directamente al prototipo en conjunto y no a cada celda por separado, se midió el voltaje entregado, el valor real de la carga conectada, se calculó el valor teórico de la corriente que debería entregar y se midió la corriente que el prototipo entrega para cada carga.

**Tabla 3.13. Corriente entregada por el prototipo para diferentes cargas**

<b>V. med. (V)</b>	5,3	5,3	5,3	5,4	5,35	5,3	5,5
<b>R. med. (<math>\Omega</math>)</b>	3	101	1500	4650	10000	55000	90000
<b>I. teo. (mA)</b>	1766	52,475	3,533	1,161	0,535	0,096	0,061
<b>I. med. (mA)</b>	0,03	0,029	0,031	0,026	0,024	0,025	0,027

### 3.4.4.1 Análisis de la corriente máxima entregada mediante resistencias.

Una vez que se midió el voltaje que alimentaba la carga y el valor de la carga, se procedió a calcular mediante la ley de ohm el valor teórico de la corriente que debería circular por dicha carga, de allí se obtuvo la gráfica 3.28:

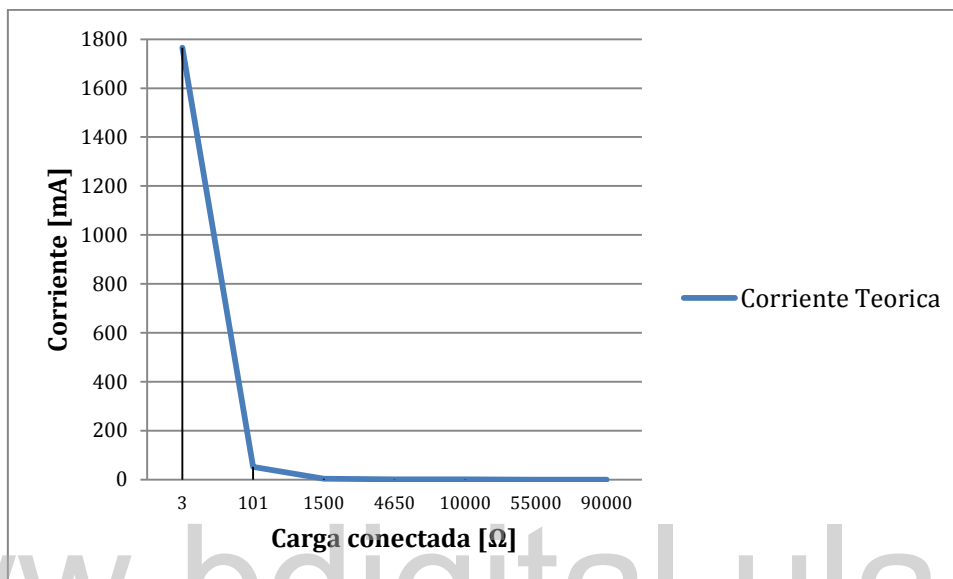


Gráfico 3.28. Corriente vs Carga, valor teórico

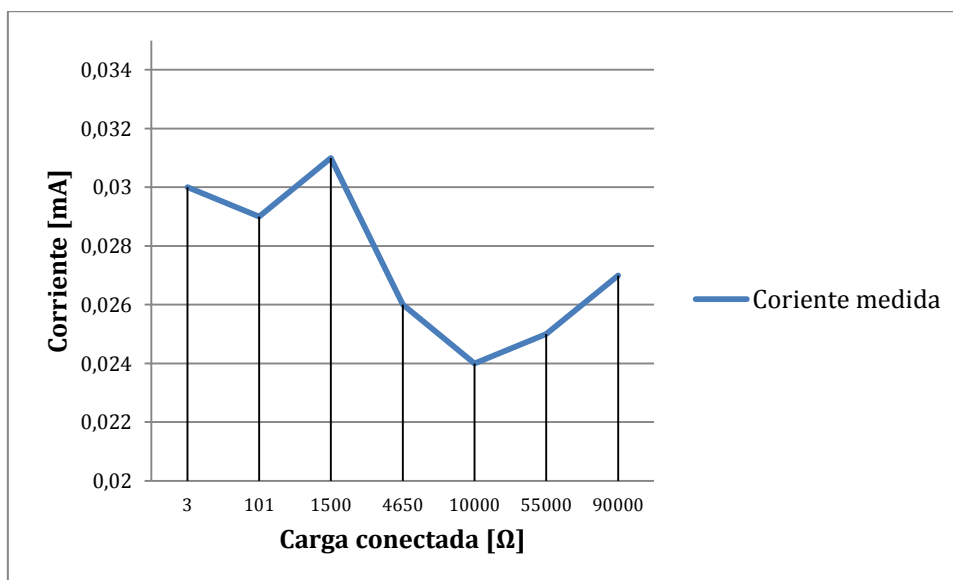


Gráfico 3.29. Corriente vs Carga, valor medido

El gráfico 3.28 sirve de referencia para saber el comportamiento ideal del prototipo, sin embargo al tomar la medida de la corriente que es capaz de entregar nos encontramos con valores muy bajos, como se muestran en la gráfica 3.29.

En ella se puede observar que el prototipo no es capaz de entregar corriente por encima de 31  $\mu\text{A}$ , lo que representa un problema ya que esto se traduce en que el tiempo para almacenar determinada carga eléctrica será bastante prolongado, este resultado se debe a que el sustrato no fue tratado en ningún sentido, y como se expone en [7] si se desea aumentar la producción de corriente entregada es necesario llevar un riguroso tratamiento al suelo en el cual se encuentra la planta utilizada.

### 3.4.5 Cálculo de la resistencia interna mediante capacitores.

Debido a que al intentar medir la resistencia interna del prototipo directamente se hace casi imposible, pues el multímetro no realiza ninguna lectura, se procedió a conectar directamente un capacitor en los bornes del prototipo, y mediante las ecuaciones de carga de un capacitor calcular la resistencia interna una vez medidos el voltaje en bornes del prototipo, el voltaje final del capacitor y el tiempo que tardó en cargarse.

**Tabla 3.14. Cálculo de la resistencia interna**

$\mu\text{F}$ Teórico	$\mu\text{F}$ Medido	E (V)	Vc (V)	t (s)	R int (K $\Omega$ )
0,1	0,12	6,9	6,8	2,29	5400
1	1,11	6,9	6,8	3,33	786
10	11,4	6,9	6,8	20,28	479
100	103,5	6,9	6	71,38	350
1000	1027	6,9	5,5	472,89	296

#### 3.4.5.1 Análisis de la resistencia interna mediante capacitores.

Se pudo calcular la resistencia interna del prototipo con este método, ya que al no tener una resistencia física conectada en el circuito y solo conectar el capacitor directamente al prototipo al momento de la carga, mediante la ecuación de diferencia de potencial de carga de un capacitor se pudo asumir el valor de la resistencia interna despejándolo de dicha ecuación.



Con estos resultados se puede observar que la resistencia interna del prototipo varía conforme aumenta el valor de la capacitancia conectada de manera exponencial como se observa en la gráfica 3.30.

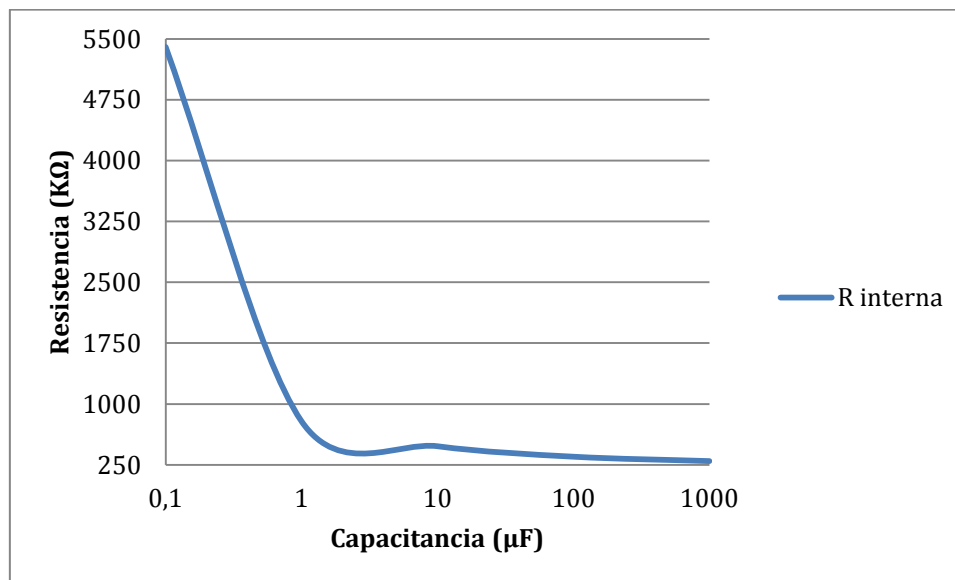


Gráfico 3.30. Resistencia interna del prototipo en función de la Capacitancia conectada

#### 3.4.6 Cálculo de la corriente máxima entregada mediante capacitores.

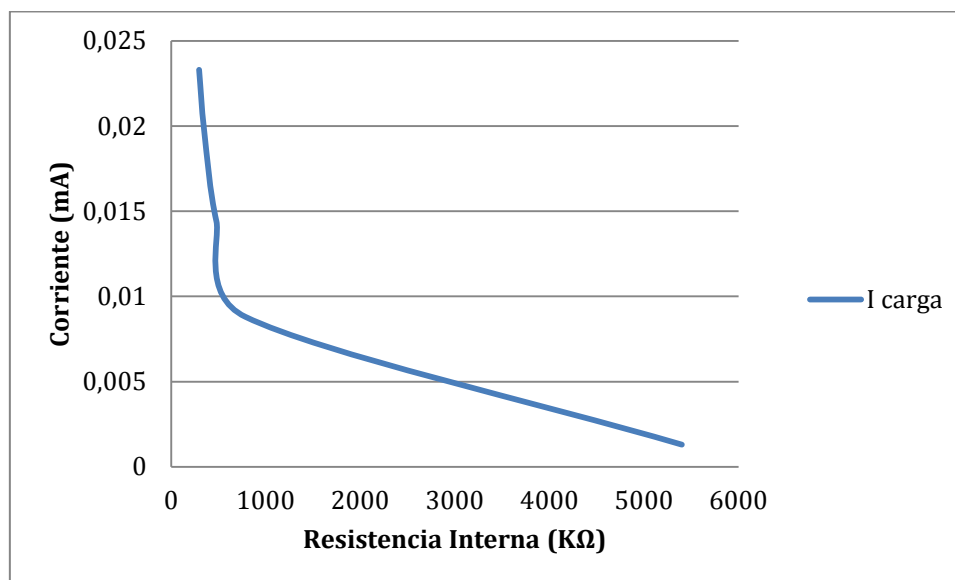
Para calcular la corriente máxima entregada por el prototipo se aprovecharon los datos obtenidos en la prueba realizada anteriormente, una vez calculada la resistencia interna del prototipo se utilizó la ecuación de la intensidad de corriente en un capacitor cuando se está cargando justo en el instante  $t=0$  que es cuando se presenta la máxima corriente aportada ya que luego de ese instante la corriente tiende a valer cero (0) con el transcurso del tiempo.

Tabla 3.15. Calculo de la corriente máxima

E (V)	R int (KΩ)	I (mA)
6,9	5400	0,0013
6,9	786	0,0088
6,9	479	0,0144
6,9	350	0,0197
6,9	296	0,0233

### 3.4.6.1 Análisis de la corriente máxima entregada mediante capacitores.

Con los resultados obtenidos en la tabla 3.15 se logró construir la siguiente gráfica:



**Gráfico 3.31. Corriente máxima entregada en función de la Resistencia interna**

En este gráfico se puede observar que la corriente máxima no excede de los 0,031 mA, y coincide con los resultados obtenidos al calcularla mediante resistencias, siendo de esta manera 0,031 mA la corriente máxima que el prototipo es capaz de entregar, por encima de este valor se estaría saturando la capacidad del prototipo.

Siendo 0,031 mA la corriente máxima entregada, y asumiendo la variación de voltaje del prototipo entre 6,5 V y 7,5 V, podemos decir que la resistencia interna mínima tendrá una variación de 209 kΩ y 241 kΩ.

### 3.4.7 Capacidad para alimentar carga de manera continua.

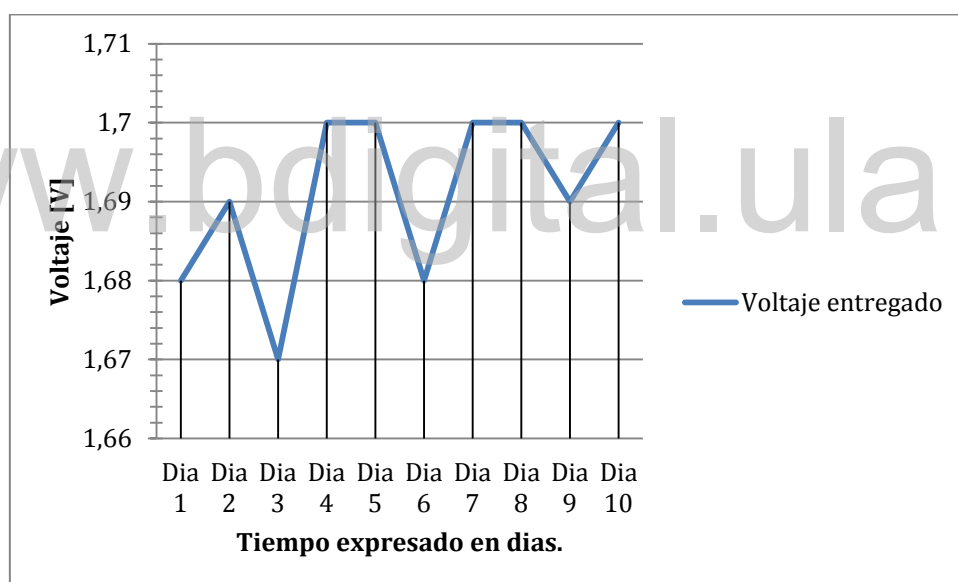
Para esta prueba se conectó un led rojo al prototipo mediante una resistencia de  $2,2\Omega$  teniendo en cuenta las capacidades de alimentación del mismo, se mantuvo conectado durante diez (10) días continuos, cada día se midió el voltaje en los terminales del led y la corriente que circulaba a través de él, con la finalidad de estudiar si la alimentación se mantenía constante, las medidas fueron tomadas con un multímetro digital, siempre a medio día (12m).

**Tabla 3.16. Capacidad de alimentación continua**

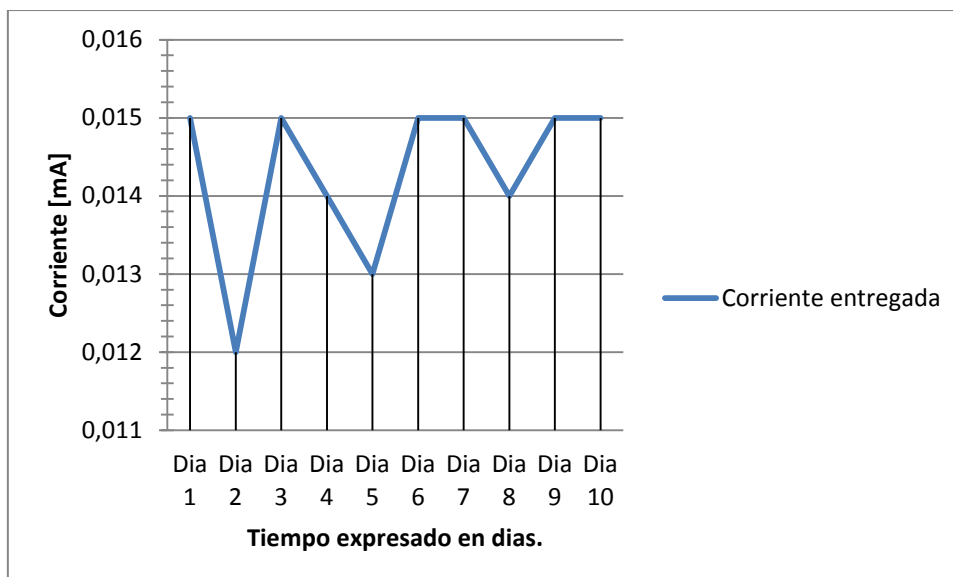
	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
<b>Voltaje (V)</b>	1,68	1,69	1,67	1,7	1,7	1,68	1,7	1,7	1,69	1,7
<b>Corriente (mA)</b>	0,015	0,012	0,015	0,014	0,013	0,015	0,015	0,014	0,015	0,015

### 3.4.7.1 Análisis de la capacidad para alimentar carga de manera continua.

Al realizar esta prueba se pudo observar que el led se mantuvo encendido durante los diez (10) días de su realización y en ningún momento se interrumpió la entrega de energía por parte del prototipo, también se pudo observar que aunque se mantenía encendido su potencia era muy poca y esto se debe a la poca capacidad que posee el prototipo para suministrar corriente aun cuando el voltaje es óptimo. A partir de la tabla 3.16 se generaron las siguientes gráficas:



**Gráfico 3.32. Voltaje de alimentación de un led rojo durante diez (10) días continuos**



**Gráfico 3.33. Corriente suministrada a un led rojo durante diez (10) días continuos**

En las gráficas se observa el comportamiento del prototipo para alimentar un led rojo de manera continua y su capacidad de alimentación hacia el mismo, también se logra reafirmar los resultados obtenidos en las pruebas anteriores.

### 3.4.8 Capacidad para cargar una batería de litio.

Para la realización de esta prueba se tomó en cuenta que el prototipo presenta una resistencia interna bastante alta, motivo por el cual la batería se conectó directamente a los bornes del mismo sin ningún tipo de circuito previo y se evaluó su comportamiento de carga, obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 3.17. Capacidad para cargar una batería**

Tiempo [s]	0	5	86400	172800	259200	345600	432000	518400	604800	691200
Vbateria [V]	0	2,69	2,77	2,87	2,94	2,99	3,04	3,1	3,12	3,14
Tiempo [s]	777600	864000	950400	1036800	1123200	1209600	1296000	1382400	1468800	1555200
Vbateria [V]	3,16	3,18	3,19	3,2	3,21	3,22	3,22	3,23	3,23	3,23
Tiempo [s]	1641600	1728000	1814400	1900800	1987200	2073600	2160000	2246400	2332800	2419200
Vbateria [V]	3,24	3,24	3,24	3,24	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25

### 3.4.8.1 Análisis de la capacidad para cargar una batería de litio.

Con los resultados obtenidos se construyó la siguiente gráfica:

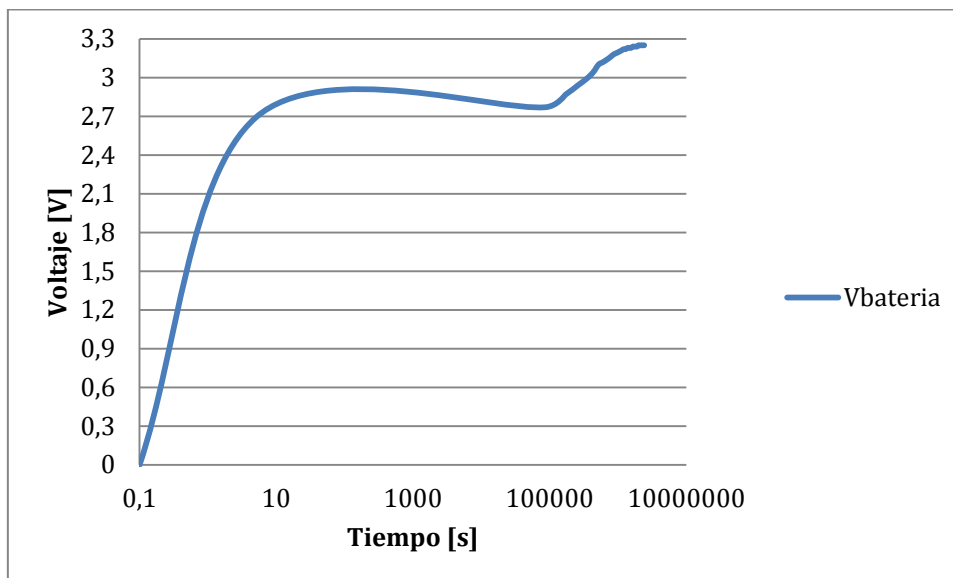


Gráfico 3.34. Voltaje de carga de una batería de litio en función del tiempo

Se puede observar que el prototipo logra cargar una batería de 3,7 V, aunque no lo hace de manera rápida, ya que en 28 días logró cargarla hasta 3,25 V. Este comportamiento coincide en su totalidad con todas las pruebas realizadas anteriormente, y se debe a la capacidad del prototipo para entregar corriente como se especificó anteriormente.

### 3.4.9 Desempeño eléctrico.

Se utilizaron las fórmulas 2.2 y 2.3 de desempeño eléctrico de una MFC, en la cual se usaron como datos la corriente máxima, el área del ánodo, volumen existente entre los electrodos y se asumió un valor medio de voltaje teniendo en cuenta que según los datos obtenidos el prototipo entrega entre 6,5 V a 7,5 V.

Tabla 3.18. Desempeño eléctrico del prototipo

Corriente [mA]	Voltaje [V]	Área [m <sup>2</sup> ]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	PA [W/m <sup>2</sup> ]	PV [W/m <sup>3</sup> ]
0,031	7	0,0031	0,000093	0,07	2,33

### 3.4.10 Diseño de un circuito con fines demostrativos.

Con el fin de demostrar el funcionamiento del prototipo de manera rápida y sencilla se diseñó un circuito que fuera capaz de mostrar el flujo continuo de corriente, esto se hizo estableciendo una conexión entre el prototipo y un led rojo mediante una resistencia, teniendo en cuenta que el brillo del led depende en gran parte de la corriente que circula por él y que la corriente proporcionada por el prototipo no supera los  $31 \mu\text{A}$ , se decidió utilizar una resistencia de  $2,2 \Omega$  ya que es el valor comercial más bajo con el cual se disponía, esto con el fin de permitir el mayor paso de corriente posible desde el prototipo por el led rojo.

En esa misma línea, se diseñó otro circuito con el cual se pudiese observar sin complicación alguna que el prototipo tiene la capacidad de capturar los electrones que se obtienen derivados del proceso fotosintético y entregarlos a un dispositivo de almacenaje de energía tan básico como un capacitor.

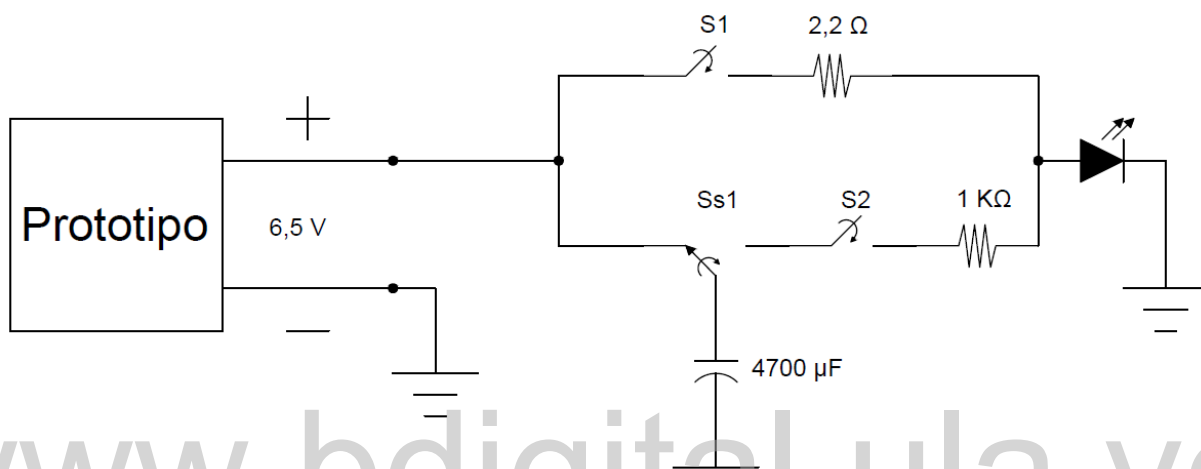
El valor de este capacitor se estimó mediante el tiempo de descarga que se escogió para demostrar su funcionamiento y de la resistencia conectada para limitar la corriente hacia el led, el circuito de descarga cuenta con un (01) capacitor conectado a un (01) led rojo mediante una (01) resistencia de descarga, asumiendo el voltaje del led en  $1,2 \text{ V}$ , y el voltaje inicial del capacitor en  $6,5 \text{ V}$  lo ideal es hacer circular alrededor de  $5 \text{ mA}$  por este circuito, distribuyendo el voltaje entre los elementos conectados, la resistencia debe exigir  $5,3 \text{ V}$ , mediante ley de ohm se determina que con una (01) resistencia de  $1 \text{ K}\Omega$  se logra hacer circular  $5,3 \text{ mA}$  por el circuito.

Por ultimo mediante la ecuación de descarga de un capacitor y tomando en cuenta los siguientes valores: tiempo de descarga de 30 segundos, resistencia de  $1 \text{ K}\Omega$ , voltaje inicial en  $6,5 \text{ V}$  y voltaje final en  $0,01 \text{ V}$ , se procede a calcular el valor del capacitor necesario, dando como resultado  $4631 \mu\text{F}$ , por lo que se escogió un capacitor de  $4700 \mu\text{F}$  que es el valor comercial que más se acerca.

Este capacitor se conecta de manera directa al prototipo para el momento de cargarse, y se separa del circuito de descarga mediante un interruptor de dos estados, al momento de la carga se toma en cuenta el valor de la resistencia interna del prototipo, que para un voltaje de

alimentación de 6,5 V esta se establece cercana a los 209 K $\Omega$  y mediante la ecuación de carga de un capacitor con voltaje inicial de 0 V se pudo calcular que el tiempo de carga estimado será de 6362 segundos, equivalentes a 1 hora con 46 minutos.

Ambos circuitos son conectados en paralelo al prototipo, pero se separan mediante switches que permiten escoger el circuito a conectar al momento de demostrar el funcionamiento del prototipo tal como se muestra en la figura 3.22.



**Figura 3.22. Esquema del circuito demostrativo**

## CONCLUSIONES

Se construyeron celdas de combustible microbiológica, con sustrato orgánico a escala de laboratorio, las cuales son de solo una cámara ya que el ánodo y el cátodo se encuentran juntos y son utilizadas como biopilas, aprovechando la glucosa generada por las plantas como combustible y los biocatalizadores naturales del propio sustrato. La operación de estas celdas confirmó la viabilidad de generar electricidad a partir de compuestos orgánicos reducidos, derivados del proceso fotosintético de las plantas.

Se confirmó la influencia del área foliar en la cantidad de producción de energía eléctrica, esto se comprobó al detallar el desarrollo radicular de las plantas usadas y observar de acuerdo a los resultados obtenidos mayor generación de energía eléctrica en aquellas celdas cuyas plantas presentaban mayor desarrollo radicular.

Se evaluó la influencia de la radiación solar recibida por las plantas, la cual presentó evidencia estadística suficiente para decir que esta radiación influye en la producción de energía eléctrica. Siendo la hora del medio día el momento en el cual se recibe mayor radiación solar, y a su vez en el 100% de las mediciones realizadas fue a esa hora cuando el prototipo presentó sus mayores valores en cuanto a diferencia de potencial.

A la par de la radiación solar se pudo observar cambios significativos en la producción de energía eléctrica producto de los cambios de temperatura, y se establece una correlación ya que si la temperatura es baja, como en horas de la noche y principio de la mañana, el voltaje obtenido será más bajo que el que se puede observar en horas del mediodía y final de la tarde cuando la temperatura es más elevada.

En cuanto a la humedad existente en las celdas se pudo observar que debe ser una medida específica para mantener estable la producción de energía eléctrica, ya que si la humedad es poca el sustrato se seca y el flujo de electrones hacia las placas se dificulta, por lo tanto la



diferencia de potencial disminuye, mientras que si la humedad es elevada se produce un efecto drenaje mediante el cual los electrones y bacterias se drenan junto con el agua y la diferencia de potencial disminuye.

Se determinaron y comprobaron efectos capacitivos en el comportamiento del prototipo debido a su forma estructural.

La integración de los componentes técnicos, biológicos y químicos en estas celdas hace de este tipo de sistemas muy difíciles de estandarizar y debe contemplarse como una tecnología apropiada acorde a ciertos objetivos planteados.

Resumiendo lo planteado, es viable obtener electricidad a partir de compuestos orgánicos generados por las plantas teniendo en cuenta condiciones de temperatura, presencia de luz solar y humedad adecuadas, así como un buen desarrollo radicular, en esta investigación se logró obtener por medio del prototipo diseñado voltajes entre 6,5 y 7,5 V gracias a las condiciones antes mencionadas y a la estructura capacitiva pensada para este fin, sin embargo al no desarrollar ningún tipo de tratamiento al suelo o sustrato se dificultó la obtención óptima de corriente y por lo tanto un desempeño eléctrico bajo, reflejado en los tiempos que se tarda para almacenar en capacitores o baterías los electrones captados por el prototipo.

## RECOMENDACIONES

El valor de este trabajo es la propuesta de innovación que se plantea y la exploración de la misma, y se demanda que toda la experiencia sea reproducida, procurando un mejor monitoreo de las variables del sistema, a la vez que se aseguran condiciones de operaciones deseadas. El error sistemático o aleatorio durante la marcha experimental puede reducirse mediante una planificación detallada.

De esta manera se recomienda:

- Buscar información de acceso restringido a través de diferentes bibliotecas universitarias ya que presenta ciertas ventajas como búsqueda avanzada de artículos, información reciente y archivos anexos.
- Futuras investigaciones deben poder establecer condiciones estándar de operación de la celda o indicadores normalizados para la evaluación y desempeño de las mismas, evitando así obtener resultados afectados por variables externas.
- Evaluar la construcción de este tipo de celdas a partir de materiales económicos, con diseños asequibles, de manera que se pueda incentivar la apropiación de esta tecnología a grandes escalas.

Con el fin de obtener mayor cantidad de energía eléctrica se recomienda:

- Ampliar el número de plantas por superficie, ya que producirán mayor material orgánico aprovechable para la producción de energía eléctrica.
- Llevar el trabajo a mayor escala.
- Utilizar plantas con mayor área foliar.
- Evaluar la influencia del pH del sustrato en la producción de energía eléctrica.
- Evaluar la energía eléctrica que generan las plantas en todo su ciclo fenológico.

## REFERENCIAS

[1] L. Vargas, J. Haas, F. Barría y L. Reyes, GENERACIÓN de Energía Eléctrica con Fuentes Renovables. Santiago, Chile. Universidad de Chile, 2010.

[2] C. Garzón, “Evaluación de alternativas de generación de electricidad desde el punto de vista de su impacto ambiental, para sectores no conectados a redes eléctricas”, Trabajo de Diplomado, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba, 2010.

[3] J. Schallenberg, G. Piernavieja, C. Rodríguez, P. Unamunzaga, R. García, M. Díaz, D. Cabrera, G. Martel, J. Pardilla y V. Subiela, Energías renovables y eficiencia energética. Canarias: Instituto Tecnológico de Canarias, 2008.

[4] S. Delgado, “Diseño de un sistema de alimentación eléctrica para las cargas críticas de una vivienda multifamiliar basado en energía solar”, Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo, Zulia, 2010.

[5] D. Strick, “Producción de electricidad verde con plantas vivas y bacterias en una celda de combustible”, Revista Internacional de Investigación Energética, no 32, pp 870-876, 2008.

[6] D Strick, “Células solares microbianas: aplicación de organismos fotosintéticos y electroquímicamente activos”, Trends in Biotechnology, Vol 29, no 1, pp 41-49, enero, 2011.

[7] M. Helder, “Nuevo medio de crecimiento de plantas para aumentar la potencia de salida de la célula de combustible vegetal microbiana”, Bioresource Technology, no 104, pp 417-423, 2012.

[8] N. Padilla, “Implementación de un sistema de energía renovable alternativo para la electrificación del Comando de la Guardia Nacional “Escuadrón Montado Guatopo”, ubicado en el Parque Nacional Guatopo del estado Miranda”, Trabajo fin de Master, Ingeniería ambiental, Universidad de Carabobo, Naguanagua, Estado Carabobo, 2017.

- [9] V. Álvarez, (2015, octubre 17) Las energías renovables en Venezuela [Online] Disponible: <https://www.evwind.com>
- [10] A. López, (2016, julio 29) El abandono de los proyectos de energías renovables en Venezuela, [Online] Disponible: <https://www.aporrea.org>
- [11] C. Zambrano, “Diseño de un sistema complementario de generación de electricidad a partir de la energía solar en la estación “La Aguada” del Sistema Teleférico de Mérida, Estado Mérida”, Proyecto especial de grado, Universidad Nacional Experimental de Táchira, San Cristóbal, Estado Táchira, 2011.
- [12] M. Madigan, J. Martinko y J. Parker, Brock Biología de los Microorganismos, 10a Ed. Pearson Prentice Hall.
- [13] E. Solomon, L. Berg y D. Martin, Biología, 9a Ed. Cengage Learning.
- [14] W. Alegría, Texto básico para profesional en Ingeniería Forestal en el área de Fisiología Vegetal, Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, 2016.
- [15] J. Lynch y J. Whipps, “Substrate flow in the rhizosphere”, Plant and Soil, vol 129, pp 1-10, diciembre 1990.
- [16] R. Pinton, Z. Varanini y P. Nannipieri, The Rhizosphere: Biochemistry and Organic Substances at the Soil Interface, New York: Marcel Dekker Inc, 2001.
- [17] H. Bais, T. Weir, J. Perry, S. Gilroy y J. Vivanco, The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. Annual Review of Plant Biology, 2006.
- [18] D. Revelo, N. Hurtado y J. Ruiz, “Celdas de combustible microbianas (CCMs) un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica”, Información Tecnológica, vol 24, no 6, pp 17-28, 2013.
- [19] Min, Booki., S. Cheng y B. E. Logan, Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells, Water Research: 39 (9), 1675 – 1686 (2005).

[20] Du, Z., H. Li y T. Gu, A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy, *Biotechnology Advances*: 25 (5), 464-482 (2007).

[21] Li, W-W., G. P. Shen, X. W. Liu y H. Q. Yu, Recent advances in the separators for microbial fuel cells, *Bioresource Technology*: 102 (1), 244-252 (2011).

[22] Rismani-Yazdy, H. y otros cinco autores, Effect of external resistance on bacterial diversity and metabolism in cellulose-fed microbial fuel cells, *Bioresource Technology*: 102 (1), 278-283 (2011).

[23] Borole, A. P., C. Y. Hamilton, T. Vishnivetskaya, D. Leak y C. Andras, Improving power production in acetate-fed microbial fuel cells via enrichment of exoelectrogenic organisms inflow-through systems, *Biochemical Engineering Journal*: 48 (1), 71-80 (2009).

[24] Wang, C., W. Chen y R. Huang, Influence of growth curve phase on electricity performance of microbial fuel cell by *Escherichia coli*, *International Journal of Hydrogen Energy*: 35 (13), 7217-7223 (2010).

[25] Luo, Y., R. Zhang, G. Liu, J. Li, M. Li y C. Zhang, Electricity generation from indole and microbial community analysis in the microbial fuel cell, *Journal of Hazardous Materials*: 176 (1-3), 759-764 (2010).

[26] Hoyos B. A., A. I. Restrepo y C. M. Mesa, Ánodos de Pt-Ru y Pt-Ir para celdas de combustible alimentadas con metano y propano directo, *Información Tecnológica*: 18 (4), 41-46 (2007).

[27] Hou, B., Y. Hu y J. Sun, Performance and microbial diversity of microbial fuel cells coupled with different cathode types during simultaneous azo dye decolorization and electricity generation, *Bioresource Technology*: 111, 105-110 (2012).

[28] Fuentes-Albarrán, C., A. Del Razo, K. Juárez y A. Alvarez-Gallegos, Influence of NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and O<sub>2</sub> on power generation from microbial fuel cells with non-catalyzed carbon electrodes and natural inocula, *Solar Energy*: 86 (4), 1099-1107 (2012).

[29] Ramírez, N., A. Regueiro, O. Arias y R. Contreras, Espectroscopia de impedancia electroquímica, herramienta eficaz para el diagnóstico rápido microbiológico, *Biología Aplicada*: 26 (1), 65-71 (2009).

[30] Sharma, Y. y B. Li, Optimizing energy harvest in wastewater treatment by combining anaerobic hydrogen producing biofermentor (HPB) and microbial fuel cell (MFC), *International Journal of Hydrogen Energy*: 35 (8), 3789-3797 (2010).

[31] Lefebvre, O., Z. Tan, S. Kharkwal y H. Y.Ng, Effect of increasing anodic NaCl concentration on microbial fuel cell performance, *Bioresourse Technology*: 112 (5), 336-340 (2012).

[32] Huang L., J. M. Regan y X. Quan, Electron transfer mechanism, new applications, and performance of biocathode microbial fuel cells, *Bioresourse Technology*: 102 (1), 316-323 (2011).

[33] W. H. Hayt y J. Buck, *Teoría Electromagnética*. 7<sup>a</sup> ed., México, McGraw-Hill, 2006, pp 114-167.

[34] R. A. Serway y J. W. Jewett, *FÍSICA para ciencias e ingeniería con Física Moderna*. 7<sup>a</sup> ed., vol 2, Mexico, CENGAGE Learning, 2009, pp 722-744

[35] *Características Eléctricas de la Superficie de la Tierra*, Rec. UIT-R P.527-3, 1992.