



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Maestría en Energía y Ambiente

**ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE  
UNA CÉLULA DE COMBUSTIBLE VEGETAL MICROBIANA (PLANT-MICROBIAL FUEL  
CELL) POR FOTOSÍNTESIS DE LA PLANTA *PHASEOLUS VULGARIS* (FRIJOL)**

**Ing. Luis Antonio Alvarez Muñoz**

Asesorado por el M.A. Ing. Byron de Jesús López Maldonado

Guatemala, marzo de 2021



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE  
UNA CÉLULA DE COMBUSTIBLE VEGETAL MICROBIANA (PLANT-MICROBIAL FUEL  
CELL) POR FOTOSÍNTESIS DE LA PLANTA *PHASEOLUS VULGARIS* (FRIJOL)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ING. LUIS ANTONIO ALVAREZ MUÑOZ**

ASESORADO POR EL M.A. ING. BYRON DE JESÚS LÓPEZ MALDONADO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN ARTES EN ENERGÍA Y AMBIENTE**

GUATEMALA, MARZO 2021



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Pablo Christian de León
SECRETARIO	Mtro. Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez



## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE UNA CÉLULA DE COMBUSTIBLE VEGETAL MICROBIANA (PLANT-MICROBIAL FUEL CELL) POR FOTOSÍNTESIS DE LA PLANTA *PHASEOLUS VULGARIS* (FRIJOL)**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado de Ingeniería, con fecha 13 de marzo de 2019.



**Ing. Luis Antonio Alvarez Muñoz**



DTG. 077.2021.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE UNA CÉLULA DE COMBUSTIBLE VEGETAL MICROBIANA (PLANT-MICROBIAL FUEL CELL) POR FOTOSÍNTESIS DE LA PLANTA PHASEOLUS VULGARIS (FRIJOL)**, presentado por el Ingeniero **Luis Antonio Alvarez Muñoz**, estudiante de la **Maestría en Artes en Energía y Ambiente** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana



Guatemala, marzo de 2021.

AACE/asga





Guatemala, Febrero 2021

EEPFI-0239-2021

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **“ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE UNA CÉLULA DE COMBUSTIBLE VEGETAL MICROBIANA (PLANT-MICROBIAL FUEL CELL) POR FOTOSÍNTESIS DE LA PLANTA PHASEOLUS VULGARIS (FRIJOL)”** presentado por el Ingeniero **Luis Antonio Álvarez Muñoz** identifica con Carné **201314568** correspondiente al programa de **Maestría en Artes en Energía y Ambiente** apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*

**Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí**  
Director

**Escuela de Estudios de Postgrado**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Universidad de San Carlos de Guatemala**







Guatemala, Febrero 2021

EEPI-0238-2021

Como Coordinador de la **Maestría en Artes Energía y Ambiente** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE UNA CÉLULA DE COMBUSTIBLE VEGETAL MICROBIANA (PLANT-MICROBIAL FUEL CELL) POR FOTOSÍNTESIS DE LA PLANTA PHASEOLUS VULGARIS (FRIJOL)”** presentado por el Ingeniero Luis Antonio Alvarez Muñoz quien se identifica con Carné **201314568**.

Atentamente,

*“Id y Enseñad a Todos”*

**Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque**  
**Coordinador de Maestría**  
**Escuela de Estudios de Postgrado**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Universidad de San Carlos de Guatemala**





Guatemala, Febrero 2021

EEPMI-0240-2021

En mi calidad como Asesor del Ingeniero Luis Antonio Álvarez Muñoz quien se identifica con número de carné 201314568 procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE UNA CÉLULA DE COMBUSTIBLE VEGETAL MICROBIANA (PLANT-MICROBIAL FUEL CELL) POR FOTOSÍNTESIS DE LA PLANTA PHASEOLUS VULGARIS (FRIJOL)”** quien se encuentra en el programa de **Maestría en Artes en Energía y Ambiente** en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,



“Id y Enseñad a Todos”

Byron de Jesús López Maldonado  
Ingeniero. Químico  
Colegiado 1066

**MSc. Byron de Jesús López Maldonado**  
**Asesor**



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por darme la vida y permitirme culminar mis estudios de maestría.
<b>Mis padres</b>	Verónica Muñoz y Gustavo Álvarez, por su amor, apoyo y sacrificio incondicional que siempre me brindan.
<b>Mi hermana</b>	Verónica Álvarez, por su amor, apoyo y sacrificio incondicional que siempre me brinda.
<b>Mis abuelos</b>	María del Carmen Sánchez y Gonzalo Muñoz, por su amor y apoyo.
<b>Mis tíos</b>	María del Carmen y Brenda Muñoz, Genaro Molina y Luis Méndez, por su cariño.
<b>Mis primos</b>	Por su cariño.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por formarme como profesional al servicio de las personas y permitirme alcanzar mis metas.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por instruirme en mi carrera profesional con los altos estándares que esta demanda.
<b>Escuela de Estudios de Postgrado</b>	Por brindarme los conocimientos requeridos para desarrollarme correctamente como Maestro en Artes en Energía y Ambiente.
<b>Mi asesor</b>	M.A. Ing. Byron López, por asesorar y apoyar la realización y culminación de esta investigación.
<b>Catedráticos</b>	Por compartir sus conocimientos y experiencias en la enseñanza de esta profesión, especialmente al M.A. Ing. José Rosal por el apoyo, comentarios y dedicación que permitieron culminar esta investigación.
<b>Mis compañeros</b>	Por brindarme su amistad, confianza y apoyo durante nuestra formación.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XV
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO.....	XXV
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Células de combustible vegetal microbianas por fotosíntesis de plantas.....	1
1.1.1. Fotosíntesis.....	1
1.1.2. Concepto de células de combustible vegetal microbianas (P-MFC).....	2
1.1.3. Elementos básicos.....	4
1.2. Cultivo de <i>Phaseolus vulgaris</i> (frijol).....	8
1.2.1. Características de <i>Phaseolus vulgaris</i> .....	8
1.2.2. Etapas y requerimientos del cultivo.....	8
1.2.3. Cultivo de frijol en Guatemala.....	12
1.3. Generación de energía eléctrica.....	13
1.3.1. Concepto de potencia y energía eléctrica.....	13
1.3.2. Equipos de medición de potencia y energía eléctrica.....	14
1.3.3. Definición de autoproducción de energía.....	16

1.4.	Contaminación ambiental por cultivos alimenticios.....	18
1.4.1.	Reducción y emisión de gases contaminantes.....	18
1.4.2.	Contaminación del agua.....	20
1.4.3.	Matriz de Leopold.....	21
1.4.4.	Impacto de las células de combustible vegetal microbianas en el ambiente.....	22
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	25
2.1.	Diseño y construcción del sistema de generación de electricidad a pequeña escala.....	25
2.1.1.	Célula de combustible vegetal microbiana.....	25
2.1.2.	Instalación eléctrica e instrumento de medición.....	30
2.1.3.	Producción de electricidad.....	35
2.2.	Sistema de autoproducción de energía eléctrica.....	48
2.2.1.	Estimación de la generación de energía eléctrica....	48
2.2.2.	Componentes del sistema.....	52
2.2.3.	Proceso de dimensionamiento del sistema.....	55
2.3.	Beneficios del sistema de generación de electricidad.....	63
2.3.1.	Beneficio económico.....	63
2.3.1.1.	Presupuesto de costos del sistema.....	63
2.3.1.2.	Viabilidad económica.....	65
2.3.2.	Beneficio ambiental.....	76
2.3.2.1.	Identificación del impacto ambiental.....	77
2.3.2.2.	Dióxido de carbono equivalente.....	81
3.	RESULTADOS.....	83
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	91

CONCLUSIONES.....	955
RECOMENDACIONES.....	97
REFERENCIAS.....	99
APÉNDICES.....	103



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Resumen simple de 5 pasos de la operación de una P-MFC.....	3
2.	Configuración de P-MFC sin membrana de una sola cámara.....	7
3.	Densidad de siembra comercial para cultivo de frijol.....	11
4.	Circuitos para la medición de corriente y voltaje en terminales.....	16
5.	Instalación de ánodo.....	28
6.	Instalación de cátodo.....	29
7.	Distanciamientos implementados en la siembra.....	29
8.	Siembra de granos por postura.....	30
9.	Diagrama eléctrico de conexión de células.....	31
10.	Instalación eléctrica de conductores.....	33
11.	Caja de conexiones y de medición.....	33
12.	Conexiones eléctricas realizadas.....	34
13.	Punto e instrumento de medición.....	34
14.	Curva de potencia promedio diaria.....	43
15.	Curva de energía eléctrica promedio semanal.....	44
16.	Prueba a escala en fase vegetativa, semanas iniciales (24/06/2019)...	45
17.	Prueba a escala en fase reproductiva, floración y llenado de vainas (18/08/2019).....	46
18.	Prueba a escala en etapa reproductiva, maduración (4/09/2019).....	46
19.	Curva de días de cultivo medidos vrs energía eléctrica promedio producida por día.....	47
20.	Diagrama esquemático del sistema de autoproducción.....	54
21.	Tabla de conductores de cobre.....	62

22.	TIR analizada para el sistema de autoproducción de energía.....	76
23.	Curva de producción de potencia eléctrica promedio diario.....	85
24.	Curva de producción de energía eléctrica promedio semanal.....	85
25.	Diagrama esquemático simplificado del sistema de autoproducción de energía.....	86
26.	Costos del sistema de la prueba a pequeña escala.....	87
27.	Inversión inicial proyectada para un sistema de autoproducción de 1 hectárea.....	88

## TABLAS

I.	Etapas del desarrollo del cultivo.....	9
II.	Datos obtenidos de las mediciones.....	36
III.	Datos calculados operacionales.....	38
IV.	Potencia promedio horaria calculada.....	41
V.	Energía eléctrica promedio semanal calculada.....	44
VI.	Presupuesto de costos del sistema de generación de electricidad a pequeña escala.....	64
VII.	Presupuesto de costos del sistema de autoproducción.....	66
VIII.	Gastos del sistema de autoproducción anuales.....	69
IX.	Precios históricos del frijol a nivel nacional.....	71
X.	Precios estimados de la venta del frijol a nivel nacional.....	72
XI.	Flujo de caja para el sistema de autoproducción.....	73
XII.	VAN y TIR resultantes del análisis financiero del proyecto.....	75
XIII.	Matriz de impactos ambientales de la prueba a escala.....	79
XIV.	Impactos ambientales identificados para la prueba a escala.....	80
XV.	Producción de electricidad obtenida de la prueba a escala de laboratorio.....	83
XVI.	Tasas de producción de electricidad por área cultivada.....	84

XVII.	Inversión inicial por una hectárea del sistema de autoproducción.....	88
XVIII.	VAN y TIR para el sistema de autoproducción en una hectárea de cultivo .....	89
XIX.	Factores ambientales y acciones perjudiciales de la prueba a escala de laboratorio.....	90
XX.	Dióxido de carbono equivalente.....	90



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>A</b>	Amperio
<b>r<sup>2</sup></b>	Coefficiente de determinación
<b>CV</b>	Coefficiente de variación
<b>CO<sub>2eq</sub></b>	Dióxido de carbono equivalente
<b>E</b>	Energía eléctrica
<b>kg</b>	Kilogramos
<b>m</b>	Metro
<b>m<sup>2</sup></b>	Metro cuadrado
<b>μW</b>	Microwatt
<b>μWh</b>	Microwatt hora
<b>mA</b>	Miliamperio
<b>mV</b>	Milivoltio
<b>Ω</b>	Ohmios
<b>S</b>	Potencia aparente (corriente alterna)
<b>P</b>	Potencia eléctrica
<b>Q</b>	Quetzales moneda
<b>t</b>	Tiempo
<b>V</b>	Voltio



## GLOSARIO

<b>Autoproducer</b>	Es un consumidor de energía eléctrica que produce su propia energía por medio de un sistema de generación en las mismas instalaciones donde lo consume, puede estar o no conectado a una red eléctrica.
<b>AWG</b>	American Wire Gauge, escala de calibres americano para alambre y cables.
<b>Biocombustible</b>	Es un combustible producido de materias orgánicas de origen vegetal o animal.
<b>CNEE</b>	Comisión Nacional de Energía Eléctrica, es el ente regulador del mercado eléctrico en Guatemala sus funciones las define la <i>Ley general de electricidad</i> (Decreto 93-96).
<b>EEGSA</b>	Empresa Eléctrica de Guatemala, S.A, es una empresa de distribución de energía eléctrica.
<b>Exudados</b>	Son compuestos de carbono que se liberan pasivamente por las raíces de las plantas, específicamente en la superficie de las raíces, siendo de alto o bajo peso molecular.

<b>INE</b>	Instituto Nacional de Estadística, entidad estatal que recolecta datos estadísticos de distintos tópicos del país.
<b>MAGA</b>	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.
<b>P-MFC</b>	<i>Plant-microbial fuel cell</i> (célula de combustible vegetal microbiana), esta célula produce electricidad gracias al desarrollo de la planta al recolectar los electrones libres presentes.
<b>Rizodeposición</b>	Liberación de toda forma de carbono a partir de las raíces, los productos liberados se categorizan en exudados (de relevancia para la investigación) y secreciones.
<b>Rizosfera</b>	Volumen de suelo que está influenciado por la actividad propia del sistema de raíz de la planta.
<b>THHN</b>	Thermoplastic High Heat Nylon, cable conductor con aislamiento de PVC y cubierta de Nylon.
<b>UAEE</b>	Usuario autoprodutor con excedentes de energía, es el usuario del sistema de distribución que inyecta energía eléctrica a dicho sistema producida por fuentes de energía renovable dentro de las instalaciones de consumo, no recibe remuneración monetaria.

## RESUMEN

La investigación realizada tuvo por objetivo evaluar la viabilidad de la generación de electricidad que presentó una célula de combustible vegetal microbiana por la fotosíntesis de la planta *Phaseolus vulgaris* (frijol) en un metro cuadrado de superficie de cultivo, mediante la determinación de la potencia y energía eléctrica producidas, así como el análisis financiero de una proyección de esta producción para un cultivo de una hectárea de superficie.

El estudio se realizó en el área del municipio de Villa Nueva, Guatemala, empleando una variedad de frijol criollo de grano en coloración negra. Se efectuó una prueba a escala de laboratorio de un metro cuadrado de superficie diseñándose esta en forma modular por medio de contenedores plásticos con electrodos de malla galvanizada construyendo una célula por contenedor, conectándose entre sí con una configuración establecida. Se recolectaron los datos de voltaje y corriente en periodos de 30 minutos, estos fueron procesados mediante un análisis estadístico que generó valores mínimos, máximos, promedios y tasas de producción para variables de potencia y energía eléctrica.

Se generó un proceso que estableció los componentes y dimensionamiento de estos, para ser integrados en un sistema de autoproducción por medio de esta fuente de energía, al tomar en cuenta un área superficial de una hectárea y con el respectivo dimensionamiento del equipo se proyectó un análisis de la viabilidad económica mediante VAN y TIR, así también se identificó el aspecto ambiental a través de la cuantificación del dióxido de carbono equivalente evitado y la identificación de impactos ambientales negativos por la matriz de Leopold.

Los resultados de la investigación realizada determinaron que la potencia y energía eléctrica promedio obtenida de la prueba son de 2.3786 [ $\mu$ W] y 16.4044 [ $\mu$ Wh], respectivamente. Los modelos obtenidos mediante regresión polinomial para las curvas de producción de potencia promedio diaria y energía promedio semanal se determinaron como funciones cuadráticas.

Los componentes resultantes requeridos en un sistema de autoproducción de energía eléctrica se dividieron en generación, transformación, almacenamiento, protecciones y distribución a la carga, para este sistema con la delimitación de área de cultivo en una hectárea se cuantificó una inversión de Q 399,171.27, el 79 % correspondiente a la componente eléctrica; el análisis financiero calculó un valor actual neto de Q 6,831.53 y una tasa interna de retorno de 4 % para un tiempo de 20 años.

La investigación realizada demuestra que una célula de combustible vegetal microbiana por la fotosíntesis de la planta *Phaseolus vulgaris* permite obtener potencia y energía eléctrica en la escala de los microwatts y microwatts hora, con curvas de producción promedio con máximos esperados al medio día (potencia promedio diaria) y cercanos al tercer día (energía promedio semanal). La viabilidad económica indica que es un proyecto a largo plazo, en donde se evitó la emisión de dióxido de carbono equivalente para la prueba de laboratorio en el orden de los microkilogramos identificándose un impacto negativo en el agua y el suelo en esta.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La generación de energía eléctrica por medio de una célula de combustible vegetal microbiana (P-MFC) por fotosíntesis de plantas es una de las investigaciones que cobra fuerza en los países de innovación energética como Países Bajos, Estados Unidos y España donde estudios acerca de la utilización de distintos tipos de plantas por medio de estas células a pequeña escala generan electricidad para consumo propio; la utilización de plantas cultivables como la *Phaseolus vulgaris* en células P-MFC brindan dos productos: el primero es su función como fuente de alimento y el segundo como fuente de energía eléctrica.

En Guatemala, estudios sobre este tema no se realizaron para esta planta en específico utilizando la tecnología antes mencionada, a pesar de que el cultivo de la *Phaseolus vulgaris* para 2015 presento una superficie cultivada de 360,300 manzanas (2,518,122,288 m<sup>2</sup>), en el país (Dirección de Planeamiento, 2015).

La aplicación de plantas de cultivo como fuente energética plantea un debate sobre la amenaza al suministro de alimento que brindan dichas plantas, esto condiciona la utilización de estas y los estudios que se requieren para implementarlas, sobre todo en el tema de los biocombustibles dado que la demanda de fuentes de energía se hace presente en estos últimos años, centrandose a estas como fuentes alternativas. Lo anterior genera en las personas la opción a cultivos para producción energética o cultivos para alimentación, considerando desde el punto económico a una elección basada en el ingreso que producen. La utilización de la tecnología de células de

combustible vegetal microbiana presenta la utilización plantas de cultivo, para tener ambos escenarios sin afectarse entre sí, teniendo que desarrollar la implementación adecuada de estas, requiriendo una inversión para llevarse a cabo.

Dentro de los efectos que se generan por el problema de no existencia de un estudio en Guatemala de la generación de energía eléctrica mediante un P-MFC por fotosíntesis de la planta *Phaseolus vulgaris* (frijol) se menciona la búsqueda de fuentes de energía tradicional como alternativa para uso diario dentro de estos se puede mencionar el uso: leña, candelas y combustibles (derivados de petróleo) para iluminación; el uso de leña para consumo en actividades de cocción de alimentos así también como de iluminación; la implementación de métodos alternativos para la preservación de alimentos.

Las fuentes antes mencionadas al realizarse sin el cuidado adecuado con prácticas sostenibles pueden desencadenar actividades que causen serios daños al ambiente, así como la contaminación del entorno que rodea al punto de consumo. Es de resaltar que en Guatemala la fuente energética de mayor consumo es la leña con 55.96 % seguido de los derivados del petróleo con un 35.53 % para el año 2017 (Dirección General de Energía, 2018) . Lo que evidencia dicha búsqueda en dos fuentes tradicionales, principalmente una autóctona como lo es la leña.

En cuanto al desarrollo económico la carencia de energía eléctrica limita las actividades económicas a técnicas artesanales y/o manuales, con maquinaria y fuentes de energía como la fuerza bruta, animal o medios de la naturaleza; esto reduce la cantidad de bienes producidos decreciendo el ingreso obtenido de la venta de estos, impactando en bajos ingresos

económicos dado la poca variedad de actividades productivas económicamente hablando.

Una de las actividades que surge para brindar sustento es la agricultura en especial la de frijol, este cultivo puede presentar una mejor producción y con ello aumentar el ingreso económico a las personas, al implementar tecnología y maquinaria agrícola adecuada, pero esta requiere de energía eléctrica en cierta parte, por lo que la baja cobertura en estos limita dicha tecnología y el alza en producción e ingresos mencionada.

Esto llevó a plantear la pregunta principal de este estudio:

¿Qué viabilidad presentó la generación de energía eléctrica mediante una célula de combustible vegetal microbiana por la fotosíntesis de la planta *Phaseolus vulgaris* (frijol) de un metro cuadrado de superficie?

Para responder a esta interrogante se debió contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Qué potencia y energía eléctrica se pudo obtener de una célula de combustible vegetal microbiana por la fotosíntesis de la planta *Phaseolus vulgaris* (frijol) de un metro cuadrado de superficie?
- ¿Cómo se pudo escalar la generación de electricidad producida mediante una célula de combustible vegetal microbiana por fotosíntesis de la planta *Phaseolus vulgaris* (frijol) de un metro cuadrado de superficie a una fuente de autoproducción de energía eléctrica?

- ¿Qué beneficio económico se obtuvo de la generación de energía eléctrica mediante una célula de combustible vegetal microbiana por la fotosíntesis de la planta *Phaseolus vulgaris* (frijol)?
- ¿Cuál es el beneficio ambiental que se produjo por la generación de energía eléctrica mediante una célula de combustible vegetal microbiana por la fotosíntesis de la planta *Phaseolus vulgaris* (frijol)?

# OBJETIVOS

## General

Evaluar la viabilidad de la generación de energía eléctrica mediante una célula de combustible vegetal microbiana por la fotosíntesis de la planta *Phaseolus vulgaris* (frijol) de un metro cuadrado de superficie.

## Específicos

- Determinar la potencia y energía eléctrica obtenida de la célula de combustible vegetal microbiana por la fotosíntesis de la planta *Phaseolus vulgaris* (frijol) de un metro cuadrado de superficie.
- Establecer el proceso que permita a la generación de electricidad mediante una célula de combustible vegetal microbiana por fotosíntesis de la planta *Phaseolus vulgaris* (frijol) convertirse en una fuente para la autoproducción de energía eléctrica.
- Cuantificar el beneficio económico obtenido de la generación de energía eléctrica mediante una célula de combustible vegetal microbiana por la fotosíntesis de la planta *Phaseolus vulgaris* (frijol).
- Identificar el beneficio ambiental producido por la generación de energía eléctrica mediante una célula de combustible vegetal microbiana por la fotosíntesis de la planta *Phaseolus vulgaris* (frijol).



## INTRODUCCIÓN

En Guatemala, estudios sobre la generación de energía eléctrica por medio de una célula de combustible vegetal microbiana, por fotosíntesis de plantas en específico la planta *Phaseolus vulgaris* no se habían realizado. La falta de este tipo de estudio lleva a la búsqueda de fuentes de energía tradicional para abastecimiento de esta, requiriéndose en el consumo diario de personas que no tienen acceso al suministro de energía eléctrica, el uso de estas fuentes sin las practicas sostenibles adecuadas desencadenan problemas de contaminación del entorno y limitan la actividad económica de las personas, para la implementación de tecnología que proporcione mejoras en las actividades productivas de estas.

La utilización de plantas cultivables como la *Phaseolus vulgaris* en las células antes mencionadas permitió que este cultivo continuara con su función de suministro de alimento, mediante el grano obtenido y además suministrara, como segunda función, la generación de energía eléctrica en el desarrollo de este. Con lo antes mencionado se evitó el uso de fuentes de energía tradicionales para consumo diario, dado que esta proveyó de energía eléctrica y con ello mejorará la producción del cultivo, con el acceso a nuevas tecnologías aplicadas a este.

La investigación brindó una evaluación de la viabilidad que presenta generar energía eléctrica por medio de la célula de combustible vegetal microbiana por fotosíntesis de la planta *Phaseolus vulgaris* (frijol), a escala de laboratorio con una superficie cultivada de un metro cuadrado. Dicho estudio presentó a esta tecnología aplicada a plantas de suministros de alimento

existentes en el país, como una fuente de energía alternativa, permitiendo combinar dos actividades económicas sin afectarse entre sí, la investigación obtuvo un procedimiento para convertir este experimento en una fuente para la autoproducción de energía eléctrica, para el consumo de esta en la tecnificación del cultivo y labores diarias de los agricultores.

El método que se utilizó en la investigación se dividió en 5 fases las cuales iniciaron con la revisión bibliográfica del tema y los antecedentes de esta tecnología aplicados a plantas, se prosiguió con el diseño del sistema de generación a pequeña escala en la superficie a cultivar de un metro cuadrado. Se dio paso a la construcción de dicho sistema según el diseño que se obtuvo, así como la implementación de los materiales específicos que esta tecnología requirió, se recabaron todos los datos que generó el sistema a pequeña escala y con esto se estableció un procedimiento para escalar esta tecnología a una fuente para la autoproducción de energía eléctrica.

En la fase final se identificó el beneficio económico y ambiental de este sistema. Los recursos necesarios para este estudio fueron proporcionados por el investigador, estudiante de maestría, tomando en cuenta los costos de material, mediciones, movilización y asesoría, por lo tanto, la cantidad aportada por el estudiante cubrió estos costos lo que convirtió en factible la realización de esta.

En el capítulo 1, se hizo una revisión bibliográfica sobre los fundamentos de la célula de combustible vegetal microbiana por fotosíntesis de plantas, sobre el cultivo de la *Phaseolus vulgaris* (frijol), los sistemas de autoproducción de energía y el impacto ambiental de los cultivos alimenticios.

En el capítulo 2, se diseñó el sistema de generación de electricidad a pequeña escala con los componentes que lo integran, así también se implementó el diseño, mediante la construcción de este.

En el capítulo 3, se estableció el proceso de autoproducción de energía eléctrica, los componentes que este requiere, así también su respectivo dimensionamiento todo esto a partir de los datos que se obtuvieron de la implementación del sistema de generación de electricidad, a pequeña escala.

En el capítulo 4, se identificaron los beneficios económico y ambiental que presentó la implementación del sistema de generación de electricidad. Los resultados obtenidos en la investigación se presentan en el capítulo 5. Por último, en el capítulo 6, se discutieron los resultados obtenidos.

La investigación realizada concluyó que la célula de combustible vegetal microbiana a escala de laboratorio presentó una generación de energía y potencia eléctrica en el orden de los microwatts hora y microwatts, se diseñó y construyó con materiales presentes en el mercado, el beneficio ambiental de esta prueba resultó en la determinación de los kilogramos de  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ; además, de haber identificado los factores impactados negativamente y componentes perjudiciales de esta prueba. El sistema de autoproducción de energía eléctrica propuesto se dividió en etapas de generación, almacenamiento, transformación, protecciones y distribución a la carga, haciendo posible un análisis financiero que permitió concluir que este proyecto presenta una viabilidad económica a largo plazo.



## RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

La investigación realizada es de tipo cuantitativa descriptiva, especificando las variables que permitieron analizar la viabilidad que presentó la obtención de energía eléctrica por medio de una célula de combustible vegetal microbiana por medio de la fotosíntesis de la *Phaseolus vulgaris* (frijol).

Los cultivos como fuente de energía se utilizan en la actualidad como el grupo de los biocombustibles que proporcionan energía mediante su transformación por procesos de tipo térmico o químico obteniendo un combustible energético, las células de combustible vegetal microbiana obtienen la electricidad a partir del desarrollo del cultivo por medio de la recolección de electrones en la raíz del mismo, estas investigaciones se han estado realizando en cultivos como la *Oryza sativa* (arroz), *Echinochloa glabrescens* (hierba de gallo), también en plantas como la *Spartina anglica* (pasto de cordón común) y *Arundinella* (hierba de río), esto en países investigadores entre los cuales se encuentran Países bajos y Estados Unidos.

El cultivo de frijol en Guatemala representa un grano básico en el suministro de alimento, presentando una superficie cultivada de 149,500 hectáreas esto para el año agrícola 2017-2018, según INE. La producción de este grano tiene a su mayor exponente en el departamento de Petén para el año 2016, según el MARN. Existen distintas regiones en donde se cultiva frijol en el país, por lo que esta investigación se desarrolló en la región del trópico de Guatemala, en específico en el municipio de Villa Nueva, Guatemala. Las variedades cultivables son diverso motivo por el cual se seleccionó una variedad acorde a la región siendo frijol criollo grano en coloración negra.

El sistema de cultivo que se implementó en la investigación tanto en el diseño como en la construcción de este fue modular, de seis contenedores plásticos, determinándose un número de 12 plantas de frijol en total. Se emplearon electrodos de malla galvanizada con dimensiones de 2.5 cm de cuadrícula, esto para permitir el adecuado crecimiento de las raíces en la producción de energía; además, se construyó individualmente en cada contenedor una célula de combustible vegetal microbiana que conecta a todas estas por medio de una caja de conexiones con una configuración establecida, mediante cables recubiertos con conductor de cobre, generando una sola terminal utilizada para las mediciones requeridas del estudio.

Las mediciones realizadas se obtuvieron por medio de un voltímetro y amperímetro los cuales se encuentran integrados en un solo instrumento de medición con rangos de escala del valor de milivoltios y miliamperios, estos fueron tomados en intervalos de 30 minutos a lo largo del lapso de medición establecido para un día, se implementó un circuito de medición por medio de una resistencia de 1,004 ohms. La toma de mediciones se realizó por medio de los circuitos de instrumento en paralelo a la carga para la obtención de voltaje e instrumento en serie a la carga para medición de corriente, se llevó el registro de estos para su análisis.

Con las mediciones realizadas se efectuó el análisis estadístico correspondiente en las variables analizadas de potencia y energía eléctricas, estas obtenidas de las variables medidas de voltaje y corriente. Las series temporales obtenidas de las variables analizadas permitieron generar los parámetros estadísticos de media, desviación estándar, valor mínimo y valor máximo, así como la obtención de la curva de producción media diaria de potencia eléctrica y la curva de producción media semanal de energía eléctrica,

estos parámetros fueron determinados mediante el software estadístico R y *WPS Spreadsheets*.

El proceso de estimación del escalamiento de la investigación se efectuó a partir de los resultados del análisis estadístico, donde se obtuvo como parámetros fundamentales la tasa de potencia y energía eléctricas por área de superficie cultivada, tomando como medida estándar un metro cuadrado y proyectándose a una hectárea de área cultivada. Se realizó la estimación del equipo necesario para un sistema de autoproducción con una célula de combustible vegetal microbiana por la fotosíntesis del frijol como fuente de energía eléctrica, obteniendo un procedimiento secuencial de pasos para dimensionar los componentes de dicho sistema según el área a cultivar.

Se tomo como base el presupuesto de los costos de la investigación realizada a pequeña escala y los precios actuales del mercado, para estimar una proyección del costo del sistema de autoproducción en un área de cultivo de una hectárea, con los componentes determinados en el estudio. El beneficio económico del escalamiento a una hectárea se analizó mediante un flujo de caja donde se determinó el VAN y la TIR de este; además, se utilizó la tarifa del kWh del pliego tarifario de la CNEE correspondiente al trimestre agosto-octubre 2019 de la empresa EEGSA, con esto se ejecutó una comparación entre el sistema de autoproducción y el suministro por distribuidora de energía eléctrica, lo que determinó el beneficio económico.



# 1. MARCO TEÓRICO

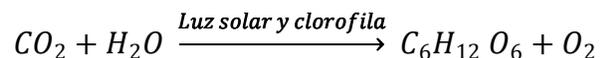
## 1.1. Células de combustible vegetal microbianas por fotosíntesis de plantas

A continuación, se introducen los fundamentos, conceptos y elementos básicos por los cuales las células de combustible vegetal microbianas por fotosíntesis de plantas pueden funcionar.

### 1.1.1. Fotosíntesis

“La fotosíntesis es un proceso fisicoquímico por el cual plantas, utilizan la energía de la luz solar para sintetizar compuestos orgánicos” (Pérez-Urria, 2009, p.1). Esta se realiza en los cloroplastos por medio de pigmentos que son capaces de captar y absorber la energía procedente de la luz del sol, siendo los pigmentos: clorofila, xantofila y carotenoides (Ocampo, 2014).

La fotosíntesis requiere de elementos como: energía solar, dióxido de carbono el cual es captado por las estomas de las hojas, clorofila, agua y sales minerales captadas de las raíces de la planta con ello se produce la reacción que a continuación se presenta (Ocampo, 2014).



Este proceso consta de dos fases, la fase luminosa y la fase oscura. La fase luminosa es donde se transforma la energía luminosa (luz solar) en

química, en esta la energía solar descompone el agua en Oxígeno e Hidrogeno, liberando el Oxígeno y produciendo dos moléculas ATP y NADPH<sub>2</sub>. La fase oscura no interviene la luz solar, aquí las dos moléculas anteriormente generadas participan en la reducción de dióxido de carbono por medio del Ciclo de Calvin que en forma simplificada obtiene como uno de sus productos resultantes la glucosa (Ocampo, 2014).

### **1.1.2. Concepto de células de combustible vegetal microbianas (P-MFC)**

Una célula de combustible vegetal microbiana es una célula biológica que convierte la energía procedente de la luz solar en bioelectricidad con la ayuda de los microbios presentes en la región de la rizosfera de la planta (Nitorisavut y Regmi, 2017).

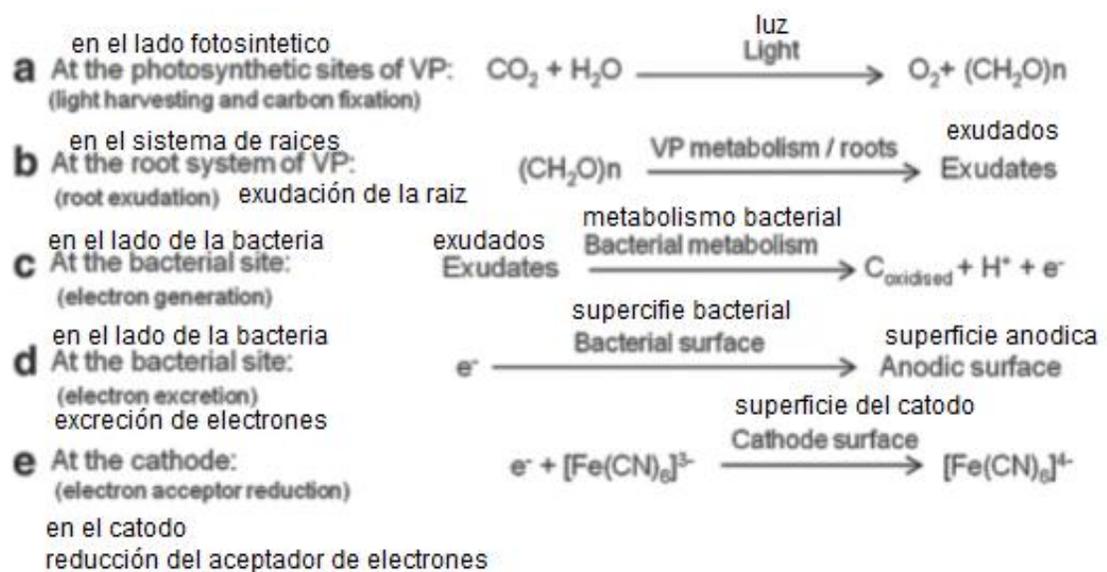
La rizosfera es la parte del suelo inmediata a las raíces de las plantas, en ella se lleva a cabo una serie de reacciones químicas y físicas que afectan la estructura del suelo, presenta microorganismos en gran cantidad dado que estos obtienen energía de los carbohidratos presentes en la región. Los microorganismos presentes, bacterias, poseen un potencial para fitoestimulación del suelo y control de patógenos de las plantas (Martín, Martínez-Granero y Rivilla, s.f.).

Las poblaciones de microbios presentes en el suelo alrededor de la rizosfera descomponen los compuestos orgánicos, exudados de la raíz por la fotosíntesis, para producir electrones libres los cuales son atrapados por la (P-MFC) en el ánodo. Cuando estos electrones captados pasan por una carga alcanzando el cátodo se completa el circuito y se produce electricidad, a la cual

se le denomina bioelectricidad, por lo cual se genera electricidad por un gradiente redox entre dos electrodos (Nitorisavut y Regmi, 2017).

La descripción realizada con anterioridad se puede resumir en forma simplificada en 5 pasos: fotosíntesis de la planta, generación exudados en la raíz, la acción de la población de microorganismos en la rizosfera para producir los electrones a partir de los exudados, captación de estos electrones libres y generación de electricidad mediante un circuito con carga por donde fluye corriente (Bombelli, Rajaraman, Covshoff, McCormick, Yunus, Hibberd, Fisher y Howe, 2012).

Figura 1. **Resumen simple de 5 pasos de la operación de una P-MFC**



Fuente: Bombelli *et al.* (2012). *Comparación de la salida (producción) de potencia por el arroz (Oryza sativa) y una maleza asociada (Echinochloa glabrescens) en sistemas bio-fotovoltaicos de plantas vasculares (VP-BPV).*

La P-MFC se divide en dos estructuras: de biocontrol que es la planta la cual recibe la señal externa de entrada (luz solar) y la de bioprocesamiento, proceso biológico, que es la formada por las poblaciones de microbios que toman los recursos exudados por la raíz para producir salidas en forma de voltajes (Nitorisravut y Regmi, 2017).

### **1.1.3. Elementos básicos**

Los elementos básicos de una célula de combustible vegetal microbiana son los siguientes:

Luz: este elemento es primordial para la fotosíntesis, que obtiene como resultado la generación de biomasa y bioelectricidad, brindando las mejores condiciones para la colonia microbiana alojada en la rizosfera, permitiendo la optimización en la actividad fotosintética maximizando con ello los exudados de la raíz, lo que beneficia la producción de electrones. Con esto se debe identificar la intensidad de luz óptima para una fotosíntesis eficiente (Nitorisravut y Regmi, 2017).

Planta: los efectos más importantes de la planta en las P-MFC son la rizodeposición y la vía fotosintética, estos impactan en el rendimiento del sistema; otros factores que afectan son los materiales de los electrodos y el soporte o medio de crecimiento de la planta. Para lograr estabilidad en un sistema este exige la longevidad y vitalidad de las plantas para enfrentar las condiciones ambientales adversas (Nitorisravut y Regmi, 2017).

La utilización de cultivos económicos se ve condicionada por la corta duración de estos, posibilidad de deterioro de las plantas disminuyendo así el rendimiento de los frutos y además son fácilmente propensos a factores

abióticos y bióticos; bajo condiciones de invernadero, las plantas están bien adaptadas escapando del efecto adverso de enfermedades y plagas lo que permite una ventaja en cosechar el alimento y la bioelectricidad (Nitisoravut y Regmi, 2017).

Suelo y microbios (rizodeposición): la potencia eléctrica de salida en una P-MFC es una función de: la cantidad de exudados de la raíz, la morfología de la raíz, eficiencia fotosintética y relación planta microbio; por esto se debe elegir una planta que presente una buena rizodeposición. El rendimiento de la P-MFC depende los exudados y de la naturaleza de la descomposición microbiana. Los factores que afectan la rizodeposición de las plantas se encuentran: edad de la planta (cuanto más vieja es la planta la rizodeposición decrece), los microorganismos, el contenido de nitrógeno en el suelo, concentración atmosférica de dióxido de carbono, intensidad de luz, el pH del suelo, la anoxia y la defoliación (Nitisoravut y Regmi, 2017).

Los exudados que son los más responsables de la donación de electrones son los carbohidratos, los ácidos carboxílicos y los aminoácidos, estos son altamente degradables por los microorganismos. En el suelo también los elementos inorgánicos pueden generar electrones por respiración anaeróbica o procesos químicos, las reacciones que generan energía eléctrica son: la oxidación química de los reductores producidos por los microbios, la oxidación microbiana del azufre a sulfato, la oxidación de amoníaco para nitrato por bacterias oxidantes y la conversión de bacterias autoportantes de carbonato en carbono orgánico (Deng, Chen y Zhao, 2012).

Los tipos de substratos afectan el tiempo para obtener una corriente estable. En cuanto al suelo las propiedades fisicoquímicas y biológicas afectan el rendimiento energético de la célula, en el suelo agrícola frente al suelo

forestal, existe mayor rendimiento del sistema con suelo agrícola, además este presenta relaciones de carbono / nitrógeno más bajas que mejoran el rendimiento, mientras que el suelo forestal tiene una comunidad bacteriana más diversa y un mayor grado de no electrógenos lo que disminuye la producción de electricidad. El suelo con su mundo microbiano juega un papel fundamental en la producción de electricidad (Nitorisavut y Regmi, 2017).

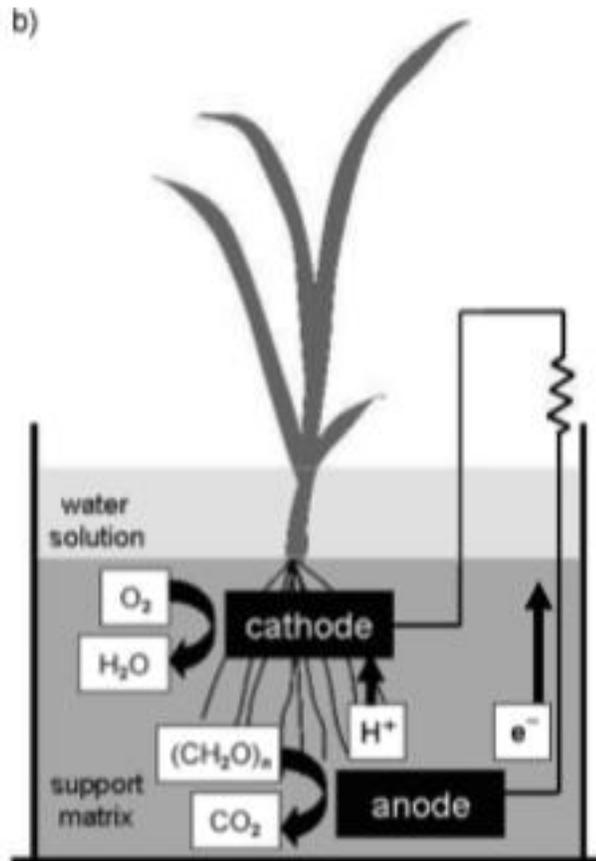
Electrodos: uno de los materiales más utilizados en los electrodos es el fieltro de grafito, en este el uso de gránulos de grafito de menor tamaño como ánodo logran una mayor potencia de salida, debido a una mayor área de superficie efectiva esto aumenta el contacto entre los microorganismos y el grafito que tiene como resultado una menor resistencia interna y una mayor densidad de potencia (Deng *et al.*, 2012).

Los factores para considerar en el modelado de una P-MFC son: la profundidad de las regiones del ánodo, el tamaño de los electrodos y la posición relativa del ánodo-cátodo. Una colocación del ánodo de 5 cm en el suelo desde la superficie obtuvo el mayor rendimiento en comparación a una distancia de 2 cm, con esto la identificación de la zona anódica adecuada es esencial para generar condiciones anoxizas y el aprovechamiento del carbón liberado. Un punto importante es que el ánodo es el factor limitante hasta que la comunidad microbiana se haya aclimatado, por su parte la eficiencia también se ve limitada por el rendimiento del cátodo (Nitorisavut y Regmi, 2017).

Configuración: las P-MFC pueden funcionar sin la utilización de una membrana de intercambio de protones, requiriendo del ánodo y el cátodo solamente (Nitorisavut y Regmi, 2017). El principio de las células con una sola cámara es que conforme se avanza en profundidad del sedimento la concentración de oxígeno disminuye por esta razón no se requiere la

membrana antes mencionada (Deng *et al.*, 2012). Una de las configuraciones que presentan el posible diseño a utilizar es aquella en que teniendo en cuenta el oxígeno liberado de las raíces se puede utilizar como un aceptador de electrones por lo que el cátodo se instalara en la rizosfera para este propósito mientras el ánodo está ubicado debajo de la raíz con esto se puede controlar la concentración de oxígeno en el suelo (Deng *et al.*, 2012).

Figura 2. Configuración de P-MFC sin membrana de una sola cámara



Fuente: Deng *et al.* (2012). *Energía de plantas y microorganismos: progreso en las células de combustible vegetal microbianas.*

## **1.2. Cultivo de *Phaseolus vulgaris* (frijol)**

En este apartado se expondrá la información principal sobre el cultivo de *Phaseolus vulgaris* comúnmente denominado frijol resaltando sus características, etapas, requerimientos y su desarrollo en el país.

### **1.2.1. Características de *Phaseolus vulgaris***

La *Phaseolus vulgaris* L., es una especie termófila, lo que indica que no soporta temperaturas bajas, es dicotiledónea anual y pertenece a la familia de las fabáceas. Se le denomina comúnmente frijol (Villatoro, Castillo y Franco, 2011). Su cultivo obtiene semillas las cuales son comercializadas como granos con alto grado de proteína (aproximadamente 22 %) (Cabrera y Reyes, 2008).

El frijol es una leguminosa estas poseen la cualidad de realizar actividad simbiótica (por medio de su raíz) con bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico (*Rhizobium phaseoli*) y con esto contribuyen a la mejora de fertilidad del suelo (Villatoro, *et al.*, 2011). El tallo del frijol es identificado como el eje central de la planta y se forma por sucesiones de nudos y entrenudos, es herbáceo, puede ser erecto, semipostrado o postrado según la variedad (Cabrera y Reyes, 2008).

### **1.2.2. Etapas y requerimientos del cultivo**

Las etapas en que se desarrolla el cultivo son diez, las cuales se dividen en desarrollo vegetativo (cinco etapas) y desarrollo reproductivo (cinco etapas), estas constan de intervalos de días, las variedades actuales tienen un cultivo total de 62 a 77 días después de la siembra (ASOPROL, 2009).

Tabla I. **Etapas del desarrollo del cultivo**

<b>Fase</b>	<b>Etapas</b>	<b>Días después de siembra</b>
<b>Vegetativa</b>	Germinación	0-5
	Emergencia	5-7
	Hojas primarias	7-11
	Primera hoja trifoliada	11-16
	Tercera hoja trifoliada	16-23
<b>Reproductiva</b>	Prefloración	23-32
	Floración	32-36
	Formación de vainas	36-44
	Llenado de vainas	44-62
	Maduración	62-77

Fuente: ASOPROL. (2009). *Guía técnica para el cultivo de frijol, en los municipios de Santa Lucía, Teustepe y San Lorenzo del departamento de Boaco, Nicaragua.*

Los requerimientos del cultivo comienzan con la selección del terreno para siembra, las plantas de frijol son susceptibles a condiciones extremas por lo que se debe seleccionar un suelo de textura ligera, bien drenado y pH óptimo el cual fluctúa entre 6.5 - 7.5, puede desarrollarse con un pH entre 4.5 - 5.5. Dado que la selección de suelo es importante otro aspecto a considerar es que este sea libre del paso de personas y animales, es importante que se realice un

muestreo del suelo a sembrar para que pueda ser analizado y diseñar con ello un plan de fertilización adecuado (Villatoro *et al.*, 2011).

La variedad de frijol a sembrar es un aspecto para tomar en cuenta dado que de esta depende la producción a tener, la propagación de enfermedades y de malezas; la buena selección de la semilla depende de: si la variedad está bien adaptada a las condiciones del lugar, está libre de contaminantes como hongos o bacterias y conocer el origen de la semilla (Villatoro *et al.*, 2011).

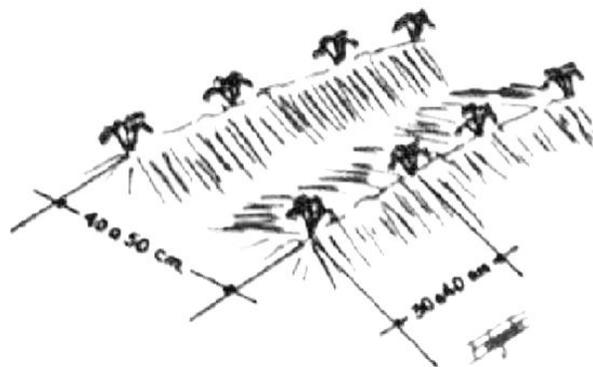
La selección de la variedad de la semilla está en función de la región a sembrar, en nuestro caso la región del trópico donde se presentan las variedades ICTA ligero y criollo vaina morada (MFEWS-MAGA, s.f.). De las dos variedades el ICTA ligero presenta un tiempo de floración de 29-30 días y un periodo para cosecha de 64-70; la altitud a la que se adapta este cultivo se determina en un rango de 50 -1200 metros respecto del nivel del mar (Villatoro *et al.*, 2011).

El cultivo en la región del trópico presenta un calendario estacional, en especial para la variedad ICTA ligero, este se encuentra comprendido en dos periodos o cosechas: el primer periodo comienza con la siembra en la tercera semana de mayo finalizando con la cosecha la tercera semana de agosto y el segundo periodo comienza con la siembra en la tercera semana de agosto finalizando con la cosecha la tercera semana de noviembre, lo que indica que este se desarrolla en un intervalo de 13 semanas (MFEWS-MAGA, s.f.).

En la siembra las características son: la profundidad y la densidad. La profundidad en la siembra indica que para el frijol se debe tener suficientemente húmeda la tierra para realizar esta tarea y el valor de profundidad para siembra de la semilla debe estar comprendido entre 2-4 centímetros. La densidad del

cultivo para una siembra comercial indica que debe presentar distanciamientos de 40 – 50 centímetros entre surcos y de 30 – 40 centímetros entre posturas, conteniendo cada postura 3 granos, con ello se obtendrá entre 200,000 a 250,000 plantas por hectárea (Villatoro *et al.*, 2011).

Figura 3. **Densidad de siembra comercial para cultivo de frijol**



Fuente: Villatoro *et al.* (2011). *Producción de frijol, Phaseolus vulgaris L.*

La fertilización del cultivo ayuda a las plantas a resistir más las enfermedades, resistir el ataque de insectos, tolerar la sequía, resistir al viento y aumento de producción. La fertilización química se puede realizar con la aplicación de N y fósforo con una dosis 40-40-0 kg por hectárea utilizando un fertilizante de fórmula 20-20-0, aplicando debajo o a la par de la semilla durante la siembra o 8 días después de esta; se puede realizar una fertilización orgánica evitando el uso de químicos estos deben de aplicarse en el momento de la siembra posicionándose debajo de ella (Villatoro *et al.*, 2011).

Las malezas en el cultivo se presentan a lo largo de este por lo que desde la siembra hasta la cosecha se debe estar libre de estas pero el periodo crítico

es durante los primeros 35 a 40 días, dado que estas malezas compiten por luz, agua y nutrimentos; su control se puede realizar de manera cultural, manual, mecánico o químico (Villatoro *et al.*, 2011).

### **1.2.3. Cultivo de frijol en Guatemala**

En el país se estimó la producción de frijol en 5,460,400 quintales de frijol en grano, esto en el año agrícola 2016/2017 aunado a ello se presentó un área cosechada de 362,000 manzanas. Con respecto al año 2015/2016 se produjo 5,319,400 quintales de frijol en grano con un área cosechada de 361,900 manzanas (MAGA, 2017). La producción nacional por departamentos se encuentra distribuida en su mayoría en 10 departamentos, de estos los tres primeros son: Petén (27 %), Jutiapa (13 %) y Chiquimula (10 %). La superficie cosechada se distribuye en especial en 7 departamentos (69.3 % de la superficie total antes mencionada) de los cuales los tres primeros son: Petén (17 %), Jutiapa (13.5 %) y Quiché (9.9 %) (MAGA, 2016).

La situación nacional de la producción del grano para el periodo de un año presenta una disminución en las cosechas, específicamente en el intervalo comprendido de mediados de mayo a mediados de agosto. Una escasez se establece en el periodo comprendido de junio a julio, ocurriendo que el mercado de frijol en estas fechas utilice las reservas almacenadas para abastecer la demanda, generando en estos periodos una vulnerabilidad del país en temas de abastecimiento de frijol. En 2017 se contabilizaron cifras con respecto a importación de aproximadamente 14.9 miles de toneladas métricas con un valor de 11.1 millones de dólares mientras que la exportación del grano alcanzo para ese año 97 toneladas métricas con un valor de 108.4 miles de dólares, estos datos para el frijol negro solamente (MAGA, 2017).

### **1.3. Generación de energía eléctrica**

A continuación, se describen los temas de potencia y energía eléctrica pertinentes para esta investigación siendo estos: conceptos, equipos de medición y la definición de autoproducción de energía.

#### **1.3.1. Concepto de potencia y energía eléctrica**

En el campo de la electricidad la tasa con que se efectúa un trabajo eléctrico se denomina potencia, y que la capacidad para realizar un trabajo eléctrico se denomina energía eléctrica. La potencia es la tasa con que se efectúa un trabajo lo que es distinto a la energía, ya que ella es una capacidad para realizar ese trabajo (Boylestad, 2004).

Las ecuaciones que se utilizan para calcular la potencia y energía eléctrica dependen de variables que se utilizan en el campo de la electricidad como lo son el voltaje (V), la corriente (I) y el tiempo (t), a continuación, se presentan dichas ecuaciones donde la potencia se representa por la letra P y la energía con la letra E.

$$P = V * I$$

$$E = P * t$$

La potencia eléctrica como se mostró en las ecuaciones anteriores requiere del voltaje y corriente que pueden ser de dos tipos: corriente directa y corriente alterna, indicando la existencia de potencia eléctrica en ambos tipos de corriente, en esta investigación se trabajara con corriente directa, por esta razón la potencia eléctrica se calculara por la ecuación antes mencionada, en

forma simple la corriente directa en un conductor es un flujo de cargas eléctricas que se desplazan en un solo sentido a través de este (Diccionario de la Lengua Española, s.f.).

Otro concepto requerido cuando se habla de energía dentro de un ámbito de generación de electricidad es la energía primaria que se refiere a las distintas fuentes de energía tal y como se obtienen de la naturaleza, en forma directa o por un proceso de extracción, dentro de estas se encuentra la biomasa como fuente de energía. La energía secundaria, donde se clasifica la electricidad, se conceptualiza como los productos obtenidos de los centros de transformación destinados a los diversos sectores donde serán consumidos (Dirección General de Energía, 2018).

### **1.3.2. Equipos de medición de potencia y energía eléctrica**

Para la medición de potencia y energía eléctrica se debe de conocer primero los instrumentos de medición de corriente y voltaje. Los amperímetros y voltímetros son los instrumentos de medición que permiten determinar el valor de corriente en amperios y una diferencia de potencial en voltios respectivamente en un circuito analizado (Young y Freedman, 2013).

El mecanismo utilizado antes de la medición digital era el galvanómetro de d'Arsonval, en el cual dentro de un campo magnético generado por un imán permanente se coloca una bobina móvil de alambre de calibre reducido, la cual se une a un resorte el cual contra resta el movimiento de la bobina. El funcionamiento de este ocurre cuando existe la circulación de una corriente por la bobina en este momento el campo magnético ejerce un torque sobre la bobina, proporcional a la corriente que por ella circula, haciendo que esta gire

por lo tanto el resorte ejerce un torque restaurador proporcional al desplazamiento angular producido (Young y Freedman, 2013).

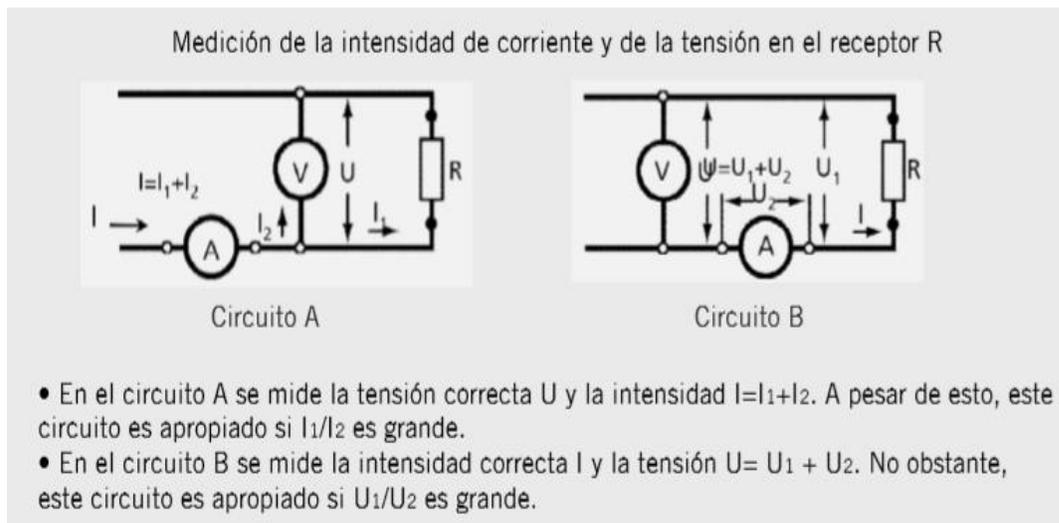
Los amperímetros miden intensidad de corriente que fluye por una línea mientras los voltímetros miden la diferencia de potencial existente en las terminales o puntos de medición. La característica principal de un amperímetro es que posee una resistencia interna pequeña provocando un mínimo voltaje y para un voltímetro presenta una resistencia interna de magnitud elevada esto indica que este debe absorber una corriente de baja intensidad (Ternium, s.f.).

El amperímetro y voltímetro se pueden usar simultáneamente para obtener las mediciones de corriente y voltaje respectivamente esto se logra por la aplicación de ambos medidores en los puntos a medir, que ejecuta un orden determinado por un circuito de medición específico, este también se utiliza para la colocación de los amperímetros y voltímetros de un vatímetro (medidor de potencia). De los circuitos presentados a continuación, el circuito donde se conecta el amperímetro en serie con la fuente y el voltímetro en paralelo con la carga (circuito A) es el preferible por la consideración de los errores de medida en los voltajes esto se debe a que la resistencia interna de este por lo regular se conoce (Ternium, s.f.).

La medición de potencia se puede realizar con los instrumentos antes mencionados o con el vatímetro que mide la potencia eléctrica en función de los niveles de corriente y voltaje que circulan por una resistencia, estos poseen cuatro terminales dos para corriente y dos para voltaje. Los vatímetros cuentan con dos bobinas, una bobina de corriente y otra bobina de potencial las cuales se conectan entre sí y las terminales como el circuito A descrito con anterioridad (Boylestad, 2004).

La medición de energía eléctrica se realiza mediante el medidor de kilowatts-hora el cual es un instrumento utilizado para medir la energía suministrada al usuario residencial los cuales cuantifican la energía consumida, en el país de forma mensual, mediante un mecanismo de engranajes y discos o de forma digital (Boylestad, 2004) . Estos medidores se les denomina comúnmente contadores. Energía puede ser calculada por medio de la obtención de la potencia eléctrica en un cierto periodo de tiempo según la ecuación antes presentada, esta es otra forma de medición de forma indirecta.

Figura 4. **Circuitos para la medición de corriente y voltaje en terminales**



Fuente: Ternium. (s.f). *Instrumentos de medición eléctrica*.

### 1.3.3. Definición de autoproducción de energía

La autoproducción de energía en este caso eléctrica en Guatemala se aplica con el concepto de “Usuario autoprodutor con excedentes de energía

(UAEE) (...)Usuario del Sistema de Distribución que inyecta energía eléctrica a este, producida... Con fuentes de energía renovable, ubicada dentro de sus instalaciones de consumo, no recibe remuneración por dichos excedentes” (CNEE, 2014, p.7).

Dentro de esta definición dada por la CNEE se desglosan otros términos que permiten una adecuada interpretación de autoproducción de energía eléctrica, dentro de los cuales se define la energía entregada a un UAEE como “La energía que la red del Distribuidor entrega o suministra a un UAEE durante el periodo de facturación” (CNEE, 2014, p.6), con esto se tiene la parte brindada por la distribuidora mientras que la parte brindada por el usuario se denomina energía inyectada por un UAEE la cual se define como “la energía que el UAEE suministra a la red del distribuidor durante el periodo de facturación” (CNEE,2014, p.6), por lo que al hablar de estos dos tipos de energía entregada e inyectada surge el concepto de energía neta que es “la energía que resulta de la diferencia entre la energía entregada por el distribuidor a un UAEE y la energía inyectada por el UAEE, medidas durante el mismo periodo de facturación” (CNEE, 2014, p.6).

La energía neta en un UAEE se maneja, dado que en la operación de estos usuarios no se permite que ellos reciban una remuneración por la inyección a la red de los excedentes que presentan. En este sentido lo que se realiza es un crédito por la energía neta dependiendo de la facturación, por lo que el distribuidor obtendrá los registros de cada mes según la lectura del medidor analizado donde se presentaran dos casos: primero si la energía neta se identifica como consumo de energía, cobrara dicho monto al usuario según tarifa y el segundo es que si la energía neta se identifica como una inyección de energía del usuario a la red el distribuidor reconocerá este monto como un crédito o bono de la energía en favor del usuario, hasta que dicho crédito sea

consumido por el usuario, lo que si se cobra de manera fija a estos usuarios es el cargo fijo y los cargos por potencia aplicables (CNEE, 2014).

Con la aclaración de esta definición y su manejo se presentan las tecnologías que pueden utilizarse como fuentes de energía estas son renovables dado que la definición de UAEE especifica estas únicamente por lo que las tecnologías con recursos renovables serán aquellas que generan energía eléctrica mediante las fuentes energéticas tales como: “Biomasa, eólica, geotérmica, hidráulica, solar y otras que determine posteriormente el Ministerio de Energía y Minas” (CNEE, 2014, p.7).

En nuestro caso la tecnología con recursos renovables a utilizar es la generada por la fuente energética de biomasa la cual se define como “Energía derivada de cualquier tipo de materia orgánica y biodegradable, de origen vegetal o animal, que puede usarse directamente como combustible o ser convertida en otras fuentes energéticas antes de la combustión” (CNEE, 2014, p.7).

#### **1.4. Contaminación ambiental por cultivos alimenticios**

En el siguiente apartado se presentan los temas de contaminación ambiental para los cultivos alimenticios y de las células de combustible vegetal microbianas, por último se aborda el tema de matriz de Leopold.

##### **1.4.1. Reducción y emisión de gases contaminantes**

Uno de los puntos en la contaminación es el cambio al ciclo del carbono, así también el incremento de liberación a la biosfera de gases contaminantes y

gases responsables del calentamiento global, entre ellos el incremento en la concentración de metano (De la Fuente y Suárez, 2008).

Las emisiones de gases contaminantes relacionadas con la agricultura provienen de actividades ejecutadas en áreas: quemas planificadas, suelos de cultivo, arrozales, tratamiento de estiércol y residuos agrícolas (Maqueda, Carbonell, Martínez, y Flórez, 2005).

Las emisiones del gas metano en la agricultura son producto de actividades como el tratamiento de estiércol, la quema de residuos de cultivo, esta no se aconseja dado los problemas con la fertilidad del suelo agudizándose en zonas con erosión, otra actividad como lo son los arrozales genera este gas como producto de la descomposición en ausencia de oxígeno efectuada por microorganismos presentes en el suelo junto con la materia orgánica que se encuentra debajo del agua que se utiliza para anegar el cultivo, este metano asciende a la atmósfera por tres mecanismos: burbujeo de las aguas que se anegan, difusión desde la superficie del agua anegada y mediante los tejidos de las plantas en crecimiento (Maqueda *et al.*, 2005).

En zonas donde se efectúa agricultura extensiva se aplica nitrógeno como fertilizante lo que desencadena una contaminación por nitratos y óxido nitroso, generando la emisión de este último a la atmósfera. Una forma de reducir esta contaminación es la rotación del cultivo lográndose mediante la introducción de plantas leguminosas, siendo en nuestro caso el frijol, esto se debe a que estas plantas fijan el nitrógeno atmosférico permitiendo que la plantas lo asimile y exude al suelo; otra técnica es la agricultura intensiva bajo plástico (Maqueda *et al.*, 2005).

Dentro de las emisiones generadas por la agricultura también se encuentra la de dióxido de carbono que se asocia a la quema de rastrojos, aplicar abonos orgánicos e inorgánicos, respiración de vegetales, descomposición de materia orgánica, así como la emisión producida por los carburantes que son fuente de energía para la maquinaria agrícola (Maqueda *et al.*, 2005).

La reducción de gases contaminantes es el otro aspecto de la agricultura, si bien generan emisiones también las reducen en especial las reducción de dióxido de carbono, denominándose así a los cultivos como sumideros de carbono esto se debe a que extrae de la atmosfera este gas y lo almacena, este proceso lo realizan por la fotosíntesis que absorbe el dióxido de carbono presente, dentro de las actividades que cumplen con esta función se encuentran: manejo adecuado de tierras destinadas a la agricultura, forestación, manejo adecuado de pastos, reforestación, manejo adecuado de bosques y restablecer la vegetación (Maqueda *et al.*, 2005).

#### **1.4.2. Contaminación del agua**

La contaminación del agua por la agricultura se orienta en una parte al uso de fertilizantes fosforados y nitrogenados dado que producen un excedente de nutrientes en algunas áreas agrícolas, sucediendo que el incremento del flujo de fósforo a los océanos se atribuye al aporte excesivo en los suelos agrícolas como se mencionaba y las crecientes tasa de erosión, estos fertilizantes llegan al agua superficial por erosión, lavado o lixiviación (De la Fuente y Suárez, 2008).

La contaminación por fertilizantes nitrogenados es frecuente por el volumen de nitrógeno residual que no se asimila por las plantas en los cultivos,

el cual por medio de la lixiviación se conduce a la zona de saturación del agua donde se procede a acumular en forma de nitratos. Otro contaminante es también el estiércol de ganado usado como abono que contamina las aguas subterráneas en forma también de nitratos (Abarca y Mora, 2007).

Otra de las formas de contaminación del agua en la agricultura se centra en la aplicación de plaguicidas en el cultivo, estos reducen la aparición de plagas, enfermedades o malezas que provocan un daño al cultivo, en estos se indica que la molécula de ingrediente activo es degradada una vez que cumpla con su objetivo, esto ocurre por efecto de las condiciones del ambiente. La contaminación por plaguicidas se produce en su mayoría a cortas distancias alrededor de las fuentes de agua esto se da cuando se procede al desecho de envases vacíos, lavado de equipo o derrames accidentales. Este tipo de contaminación se presenta principalmente en zonas donde se realiza agricultura extensiva (Abarca y Mora, 2007).

### **1.4.3. Matriz de Leopold**

Esta matriz se clasifica en las matrices de causa-efecto que se proponen como métodos para la identificación de impactos, estas comúnmente consisten en cuadros de doble entrada en donde se encuentran acciones que pueden provocar alteraciones y los elementos del medio analizado que pueden ser alterados. En cuanto al impacto ambiental la matriz de Leopold fue el primer método que se estableció para dichas evaluaciones, este método se enfoca más en un sistema de información e identificación del impacto más que una evaluación como tal (Verd, 2000).

Para utilizar de forma eficaz esta matriz se requiere que se identifique las acciones que se encuentran implicadas en el proyecto, identificar las casillas

que generen una interacción importante es decir un impacto en el medio, pudiéndose indicar la duración de dicha interacción y, por último, se intenta evaluar cuantitativamente la magnitud de estos impactos con una escala de interpretación simple. Como resultado final esta matriz debe de presentarse con un informe del caso (Verd, 2000).

#### **1.4.4. Impacto de las células de combustible vegetal microbianas en el ambiente**

El objetivo principal de una P-MFC es la obtención de bioelectricidad, junto con estos estudios se ha demostrado que tiene aplicación en el manejo de aguas residuales en los casos donde esto sucedió se logró la eliminación de cromo (Cr VI) y de DQO, también aumento la degradación de Pireno y Benceno en aguas residuales (Nitorisravut y Regmi, 2017).

La ejecución de las P-MFC's en arrozales determino la disminución de la emisión de metano lográndose hasta un 50 % con base en controles de circuito abierto, esto en parte a la introducción del ánodo en el suelo de cultivo mediante la competencia de donantes de electrones libres (Deng *et al.*, 2012).

Dentro de los puntos a investigar para determinar el impacto de estas en el medio se centra en que los ácidos orgánicos mejoran la disponibilidad de nutrientes y compuestos fenólicos que se exudan por la raíz estos ayudan a la planta a contrarrestar la infección de patógenos en la raíz, así también la prevención de la degradación microbiana de los compuestos exudados que participan en la movilización del fósforo. Los flavonoides se identifican como moléculas para la señalización para la germinación de compuestos como esporas e hifas, por lo que al introducir un ánodo en todos los casos

mencionados existe la probabilidad de acelerar la degradación microbiana de estos dado que este actúa como un agente oxidante (Deng *et al.*, 2012).



## 2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

### 2.1. Diseño y construcción del sistema de generación de electricidad a pequeña escala

A continuación, se describe el diseño y construcción del sistema de generación de electricidad a pequeña escala objeto de análisis en esta investigación, así como la producción de electricidad de este sistema para el correspondiente periodo analizado.

#### 2.1.1. Célula de combustible vegetal microbiana

La célula de combustible vegetal microbiana se diseñó en pequeña escala para abarcar en su totalidad un metro cuadrado de superficie para el cultivo de la planta *Phaseolus vulgaris*. El dimensionamiento de los parámetros de esta requería como inicio el cálculo del número de plantas a cultivar, con esto se supuso un área teórica con dimensiones de 1 m<sup>2</sup> por lado generando un cuadrado. El número de plantas se determinó de la siguiente forma, tomando en cuenta los datos de distanciamiento de cultivo expuestos en el capítulo 1.

$$n = \frac{100cm}{\text{Distanciamiento\_entre\_surcos}_{[cm]}}$$

$$n = \frac{100cm}{40cm} = 2.5 \approx 3$$

$$m = \frac{100cm}{\text{Distancia entre posturas [cm]}}$$

$$m = \frac{100cm}{30cm} = 3.33 \approx 3$$

$$\text{Total de plantas} = n * m = 3 * 3 = 9$$

Por lo tanto, se determinó que el número de plantas para el diseño del experimento a escala era de 9 plantas distribuidas en un área en forma de cuadrado de 1 m por lado. En la construcción de esta se requirió de un soporte que permitiera cultivar el frijol por lo que se solucionó al implementar macetas plásticas de dimensiones de 28 cm ancho, 62 cm de largo y 25 cm de profundidad, esto generó que se aplicara una construcción modular para que al integrarse estos contenedores juntos sumasen el área de un metro cuadrado, integrándose el área por 6 contenedores. Esto obligó a cambiar el número de plantas a utilizar dado que el área total obtenida de los módulos resultó en 1.0416 m<sup>2</sup> esta se ajustó de la siguiente manera.

$$\text{Área de contenedor} = 0.28m * 0.62m = 0.1736m^2$$

$$\text{Exceso} = 1.0416m^2 - 1m^2 = 0.0416m^2$$

$$\text{Ajuste} \rightarrow \frac{\text{Exceso}}{\text{Lado fijo contenedor (ancho)}} = \frac{0.0416m^2}{0.28m} = 0.1485m$$

$$\text{Area}_{\text{no}_{\text{utilizable}}} = 0.28m * 0.1485m \approx 0.041m^2$$

El área no utilizable se aplicó al último contenedor por lo tanto los electrodos instalados en esta área no fueron conectados al resto de los módulos quedando aislados. El número de plantas para la construcción se determinó dado que al estar integrado el sistema en módulos permitía que los bordes de los contenedores sirvieran de barreras entre los electrodos y plantas de las células de combustible esto permitió que se pudiesen plantar 2 plantas en un mismo contenedor separadas por el distanciamiento de posturas de 30 cm y en el centro de la distancia del ancho del contenedor generando una distancia entre surcos de 30 cm mínima.

El número de plantas cultivadas fue de 12 dados los 6 contenedores aislando 1 de estas plantas de la integración debido al excedente de área por lo tanto en la prueba a escala se analizaron 11 plantas para la producción de electricidad. Las dimensiones de la célula de combustible vegetal microbiana en cuanto a los electrodos fueron:

- 8 cm de separación entre el fondo del contenedor y el ánodo
- 4 cm de separación entre ánodo y cátodo
- 4 cm de separación entre el cátodo y la superficie

Los electrodos empleados (ánodo y cátodo) son de malla metálica galvanizada con dimensiones de cuadrantes de 2.5 cm por lado, con cable de cobre recubierto THHN calibre 14 AWG unidos a los electrodos mediante soldadura con estaño.

En cuanto al cultivo se implementó el uso de tierra abonada comercializada en los alrededores del proyecto (Villa Nueva, Guatemala), junto con frijoles de coloración de grano negro procedentes del departamento de Chimaltenango. Para su siembra se siguieron los lineamientos expuestos en el marco teórico determinándose los siguientes parámetros:

- 3 cm de profundidad de siembra de los granos
- 3 granos por postura
- 30 cm de distanciamiento entre posturas

Lo anteriormente descrito se presenta en forma visual mediante las siguientes figuras.

**Figura 5. Instalación de ánodo**



Fuente: elaboración propia.

Figura 6. **Instalación de cátodo**



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Distanciamientos implementados en la siembra**



Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Siembra de granos por postura**



Fuente: elaboración propia.

El proceso de construcción de la célula de combustible vegetal microbiana se detalla visualmente en la secuencia de figuras anterior con ello se culminó esta parte, es de resaltar que la construcción de un invernadero para protección del cultivo de las condiciones climáticas no fue requerida dado que en el lugar de instalación de la prueba se contó con una instalación metálica (pérgola) que cumplió con la función de invernadero.

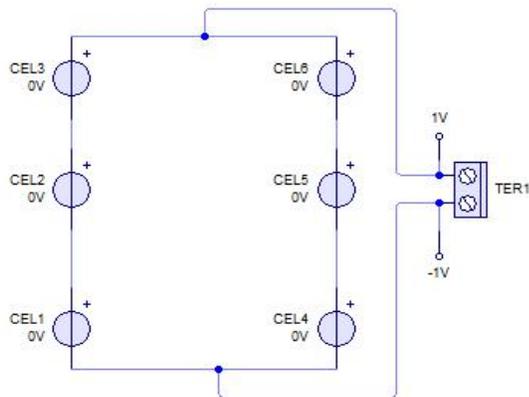
### **2.1.2. Instalación eléctrica e instrumento de medición**

La instalación eléctrica realizada en la célula de combustible vegetal microbiana se ejecutó en la conexión de los electrodos (ánodo y cátodo) con el punto de medición lo que presento la necesidad de generar una sola terminal para conectar a esta una carga para realizar la medición de voltaje y corriente que circularon por ella. Cada contenedor al terminar la parte anterior se

convirtió en una célula individual con una terminal positiva y negativa, esto para cada contenedor, exceptuando el ultimo contenedor que presento dos terminales por la separación expuesta en la sección anterior. Los electrodos abarcaron el área de cada contenedor colectando los electrones de dos plantas.

La instalación eléctrica se realizó mediante cables de cobre recubierto tipo THHN calibre 14 AWG, para reducir el número de terminales iniciales, seis terminales, a lo requerido para la medición, una terminal, se implementó un diagrama de conexión que dividió los seis contenedores en dos grupos iniciales de tres contenedores cada uno los cuales fueron conectados en serie y el resultando de estos dos grupos se conectó en paralelo de esta manera se obtuvo una sola terminal. Los materiales implementados para realizar los empalmes eléctricos fueron borneras de conexión con sujeción por tornillos. A continuación, se presenta el diagrama simplificado de la conexión.

Figura 9. **Diagrama eléctrico de conexión de células**



Fuente: elaboración propia.

El punto de medición se realizó mediante una carga resistiva de 1,004 [ $\Omega$ ] conectada a la terminal resultante del diagrama de conexión anterior, para realizar las mediciones se necesitó de una modificación en la línea negativa del punto de medición adicionando una bornera para realizar la medición de corriente dado que esta implica la instalación del aparato de medición en serie con la carga alimentada. Las mediciones se realizaron según lo expuesto en el marco teórico con los circuitos presentados en esa sección.

Dado los valores de corriente y voltaje que se encontraron en el orden de escala de los miliamperios [mA] para la corriente y milivoltios [mV] para el voltaje, se implementó un instrumento de medición sensible a dichos niveles que pudo detectar con gran exactitud el valor de estos datos, así como una confiable precisión en las mediciones realizadas. El instrumento empleado fue un multímetro digital marca Truper modelo MUT-39 mantenimiento industrial, este presenta rangos de medición siguientes:

- Tensión en corriente continua en un rango de escalas de (200 mV -1000 V) con una precisión de  $\pm (0.8 \% + 2)$ .
- Corriente continua en un rango de escalas de (2mA - 20 A) con una precisión de  $\pm (2 \% + 5)$ .

La instalación eléctrica se realizó únicamente con conductores gracias al recubrimiento del cable implementado y del espacio entre contenedores, no fue necesario instalar un entubado de PVC de protección, para las borneras donde se implementó el diagrama de conexión presentado se utilizó cajas de protección contra intemperie, modelo plexo cuadrada con dimensiones de 105 mm de largo, 105 mm de ancho y 55 mm de profundidad, se emplearon dos cajas una para las conexiones del diagrama y otra para el punto de medición. A continuación, se presenta visualmente la instalación e instrumentos empleados.

Figura 10. **Instalación eléctrica de conductores**



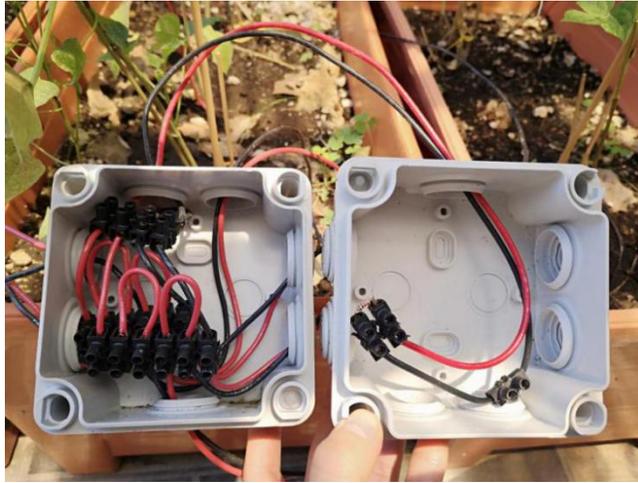
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Caja de conexiones y de medición**



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Conexiones eléctricas realizadas**



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Punto e instrumento de medición**



Fuente: elaboración propia.

### **2.1.3. Producción de electricidad**

Las mediciones realizadas en el punto de muestreo de las células de combustible vegetal microbiana fueron obtenidas durante un periodo de 5 semanas y dos días (8/08/2019 al 13/09/2019), tomando en cuenta una semana de 7 días, se menciona que 5 días no fueron medidos, estas semanas se situaron en la fase reproductiva del cultivo de frijol, es de mencionar que se cosecho en partes dado que el cultivo presento un gran grupo de vainas maduras; y por último el resto de vainas maduras, esto llevo a que se terminara el periodo de medición después de la primera cosecha dado que la gran mayoría de vainas obtenidas se cosecharon en esta, lo que llevo a un descenso altamente marcado de la generación de electricidad.

Las mediciones realizadas durante la prueba experimental se realizaron según los esquemas de medición expuestos en el marco teórico. Los intervalos de medición se llevaron a cabo en lapsos de 30 minutos durante cada día, es de resaltar que durante la gran mayoría de los días del periodo de medición se analizó un día desde las 7:00 horas hasta las 16:00 horas, dado la disponibilidad de medición y por el efecto de la radiación solar en la fotosíntesis de las plantas, existieron días donde este intervalo de horas no se cumplió y pocos casos donde se extendió que resalta que en promedio se realizaron aproximadamente 8 mediciones por día contabilizando un total de 304 mediciones para el periodo evaluado.

Las mediciones obtenidas se presentan en un formato de datos obtenidos especificado donde se encuentran las variables medidas de voltaje y corriente estos datos sirvieron para el cálculo de las variables de interés para este estudio, a continuación, se presenta una muestra de los datos obtenidos de las

mediciones correspondientes a un día en específico, todos los datos medidos obtenidos se presentan en el apartado de anexos.

Tabla II. **Datos obtenidos de las mediciones**

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Voltaje [mV]</b>	<b>Corriente [mA]</b>
8/8/2019	6:30	3.6	0.004
8/8/2019	7:00	2.7	0.004
8/8/2019	8:00	2.4	0.003
8/8/2019	8:30	2.7	0.003
8/8/2019	9:00	1.9	0.002
8/8/2019	9:30	2.1	0.003
8/8/2019	10:00	3.1	0.004
8/8/2019	10:30	2.5	0.003
8/8/2019	11:00	3.2	0.004
8/8/2019	11:30	3.9	0.005
8/8/2019	12:00	4.4	0.005
8/8/2019	12:30	4.1	0.005
8/8/2019	13:00	3.5	0.005
8/8/2019	13:30	3.4	0.004
8/8/2019	14:00	3.2	0.004
8/8/2019	14:30	3.1	0.003
8/8/2019	15:00	3.8	0.004
8/8/2019	15:30	6.2	0.008
8/8/2019	16:00	11.3	0.013

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos de las mediciones se procedió a obtener las variables a analizar siendo potencia y energía eléctrica, la primera se obtuvo para cada medición mientras que la segunda se calculó una para cada día. La determinación de estas variables objeto del estudio de esta investigación se realizó de la siguiente manera.

$$P = V * I = (3.6mV) * (0.004mA) = 0.0144 \text{ } [\mu W]$$

$$P_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} P_i}{n} = \frac{0.4102}{19} = 0.0216 \text{ } [\mu W]$$

$$E = P_{prom} * t = (0.02159 \mu W) * (9.5horas) = 0.2051 \text{ } [\mu Wh]$$

Donde:

- V: voltaje medido, [mV]
- I: corriente medida, [mA]
- P: potencia calculada [ $\mu W$ ]
- $P_{prom}$  : potencia promedio del día, [ $\mu W$ ]
- i: número de muestra actual en el calculo
- n: número de muestras por día
- t: horas del día

Con este procedimiento se calculó para todos los días del periodo de medición, a continuación, se presenta una muestra de un día en específico, todos los cálculos realizados para los datos medidos se presentan en el apartado de anexos.

Tabla III. Datos calculados operacionales

Fecha	Hora	Voltaje [mV]	Corriente [mA]	Potencia [ $\mu$ W]	Potencia promedio [ $\mu$ W]	Energía [ $\mu$ Wh]
8/8/2019	6:30	3.60	0.0040	0.0144	0.0216	0.2051
8/8/2019	7:00	2.70	0.0040	0.0108		
8/8/2019	8:00	2.40	0.0030	0.0072		
8/8/2019	8:30	2.70	0.0030	0.0081		
8/8/2019	9:00	1.90	0.0020	0.0038		
8/8/2019	9:30	2.10	0.0030	0.0063		
8/8/2019	10:00	3.10	0.0040	0.0124		
8/8/2019	10:30	2.50	0.0030	0.0075		
8/8/2019	11:00	3.20	0.0040	0.0128		
8/8/2019	11:30	3.90	0.0050	0.0195		
8/8/2019	12:00	4.40	0.0050	0.0220		
8/8/2019	12:30	4.10	0.0050	0.0205		
8/8/2019	13:00	3.50	0.0050	0.0175		
8/8/2019	13:30	3.40	0.0040	0.0136		
8/8/2019	14:00	3.20	0.0040	0.0128		
8/8/2019	14:30	3.10	0.0030	0.0093		
8/8/2019	15:00	3.80	0.0040	0.0152		
8/8/2019	15:30	6.20	0.0080	0.0496		
8/8/2019	16:00	11.30	0.0130	0.1469		

Fuente: elaboración propia.

Con la potencia eléctrica calculada de las 304 mediciones se obtuvo el valor promedio de la potencia eléctrica para la prueba a pequeña escala el cual se utilizó a su vez para estimar la tasa de producción de potencia eléctrica por área superficial de cultivo, para calcular este promedio se realizaron los siguientes cálculos.

$$P_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} P_i}{n} = \frac{723.0985 \mu W}{304} = 2.3786 \mu W$$

Donde:

- $P_i$ : potencia eléctrica para la medición  $i$
- $n$ : número total de mediciones
- $i$ : número de medición actual en el cálculo

Para esta potencia eléctrica promedio calculada se determinaron los valores de potencia eléctrica mínima y máxima obtenidos durante la prueba para dimensionar el rango entre el cual fluctuó la potencia; también, se determinó la desviación estándar para las potencias eléctricas calculadas, se obtuvo los siguientes datos.

$$Potencia_{max} = 8.2128 \mu W$$

$$Potencia_{min} = 0.0038 \mu W$$

$$Desviación\_estandar = 1.8574 \mu W$$

La otra variable de interés en esta investigación es la energía eléctrica, por lo que se procedió a calcular el promedio de la energía eléctrica para la prueba escala con los datos de energía eléctrica de los cálculos operacionales determinados con anterioridad, se determinó de la siguiente manera.

$$E_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} E_i}{n} = \frac{524.943}{32} = 16.4044 \mu Wh$$

Donde:

- $E_i$  : energía promedio por día
- $n$ : número de días analizados en la prueba
- $i$ : día de cálculo actual

Para la energía eléctrica promedio por día calculada se estimó el valor mínimo y máximo de esta, con el fin de obtener el rango en el cual fluctuó la energía para el periodo de prueba realizado; también, se determinó la desviación estándar de los valores de energía eléctrica promedio por día, presentándolos a continuación.

$$E_{prom\_min} = 0.0927 \mu Wh$$

$$E_{prom\_max} = 45.4820 \mu Wh$$

$$Desviación\_estandar_E = 13.2840 \mu Wh$$

El comportamiento de la potencia eléctrica presento variaciones al igual que la energía eléctrica, esto llevo a que se determinaran las curvas de dispersión de tiempo vrs potencia eléctrica para la producción de potencia eléctrica diaria y el tiempo vrs la energía promedio al día para una producción de energía eléctrica semanal. Para determinar estas curvas se requirió de los siguientes cálculos. Esta muestra de cálculo se realizó para las 6:30 horas de todos los días del periodo de duración de la prueba a escala, esto se realizó con todas las siguientes horas.

$$P_{prom\_hora} = \frac{\sum_i^n P_{hora\_i}}{n} = \frac{3.3326 \mu W}{3} = 1.1109 \mu W$$

Donde:

- $P_{\text{hora}_i}$ : potencia eléctrica de la hora analizada en el día  $i$
- $i$ : día del cálculo actual
- $n$ : total del número de días que presento esta hora en sus mediciones

A continuación, se presenta una tabla con los datos calculados para las horas del día tomando en cuenta que el día se analizó principalmente de las 7:00 horas a las 16:00 horas, se presentan horas fuera de este rango con fin de visualizar el comportamiento de todo el espectro horario.

Tabla IV. **Potencia promedio horaria calculada**

Hora	Potencia promedio hora [ $\mu$ W]	Número de mediciones
6:30	1.1109	3
7:00	2.2992	16
7:30	2.9507	18
8:00	2.1475	15
8:30	2.2097	19
9:00	2.7051	26
9:30	2.8961	21
10:00	2.4542	20
10:30	2.7151	15
11:00	2.1822	17
11:30	2.0852	11
12:00	2.2106	9
12:30	2.1660	12
13:00	1.8623	12

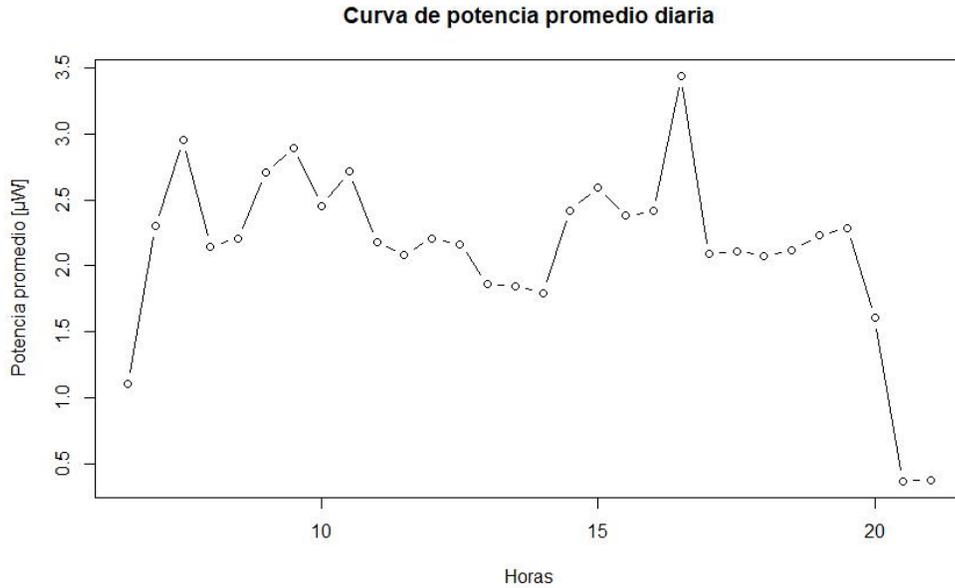
Continuación de la tabla IV.

13:30	1.8453	3
14:00	1.7968	9
14:30	2.4210	15
15:00	2.5956	15
15:30	2.3779	12
16:00	2.4178	12
16:30	3.4354	4
17:00	2.0884	3
17:30	2.1139	3
18:00	2.0773	3
18:30	2.1219	3
19:00	2.2321	2
19:30	2.2842	2
20:00	1.6047	2
20:30	0.3724	1
21:00	0.3762	1

Fuente: elaboración propia.

Los datos de potencia promedio diaria anteriormente presentados se exponen en forma gráfica en la siguiente figura, dado que fue analizada para determinación de parámetros en el siguiente capítulo.

Figura 14. **Curva de potencia promedio diaria**



Fuente: elaboración propia.

Para el caso de la energía eléctrica promedio semanal se presenta el comportamiento de esta en los días de una semana, donde se obtuvo el promedio de energía por día de la semana, así como la gráfica respectiva que permitió analizar las tendencias en el comportamiento de estas expuestas en el siguiente capítulo. Los cálculos realizados para esta determinación se efectuaron de la siguiente manera, para el día 1 (lunes).

$$E_{prom\_dia\_i} = \frac{\sum_{j=1}^n E_{prom\_dia\_j}}{numer\_de\_dias\_i} = \frac{59.30905 \mu Wh}{5} = 11.8618 \mu Wh$$

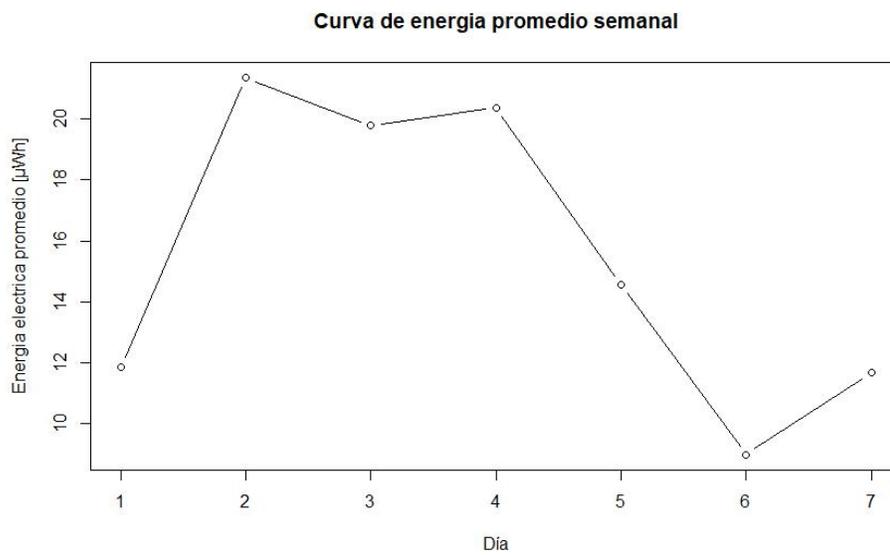
Este cálculo se realizó para el resto de los días de la semana obteniendo de esta manera la siguiente tabla.

Tabla V. **Energía eléctrica promedio semanal calculada**

Día	Energía promedio [ $\mu$ Wh]
1	11.8618
2	21.3581
3	19.7957
4	20.3718
5	14.5570
6	8.9860
7	11.6667

Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Curva de energía eléctrica promedio semanal**



Fuente: elaboración propia.

Por último, asociado a la producción de electricidad se presentan imágenes de la evolución del cultivo durante la prueba a escala que muestra las etapa inicial y la de reproducción la cual fue de interés en este estudio.

Figura 16. **Prueba a escala en fase vegetativa, semanas iniciales**  
**(24/06/2019)**



Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Prueba a escala en fase reproductiva, floración y llenado de vainas (18/08/2019)**



Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Prueba a escala en etapa reproductiva, maduración (4/09/2019)**

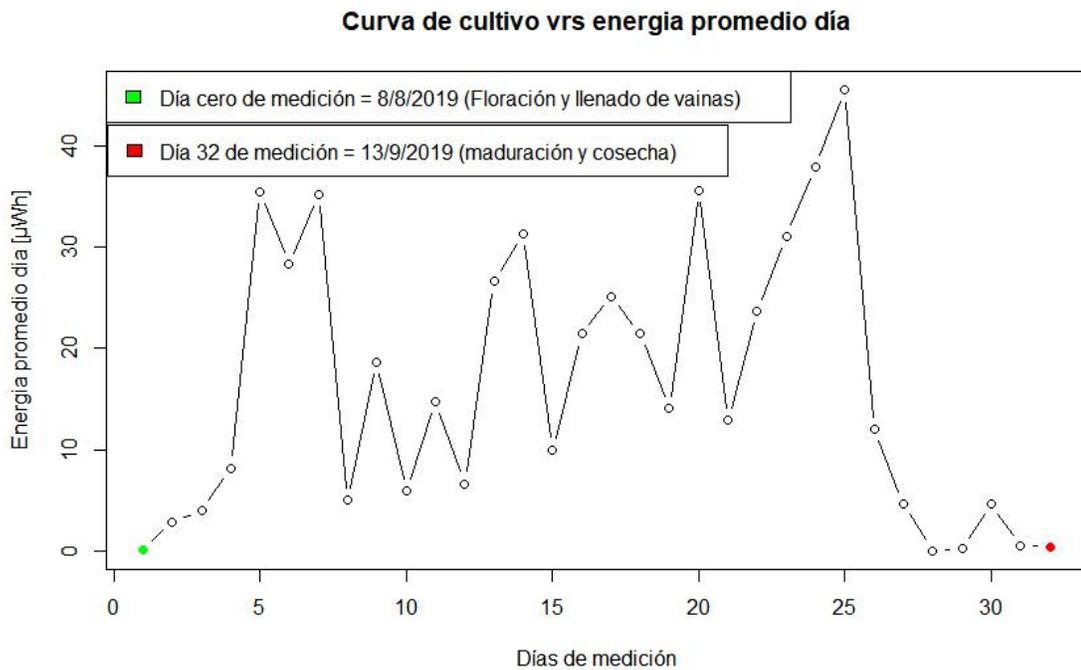


Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presenta la curva de los días de medición del cultivo de frijol contra la energía eléctrica promedio que cada día produjo, se considera los siguientes datos.

- Siembra: 12-14/06/2019
- Primer día medido: 08/08/2019
- Ultimo día medido: 13/09/2019
- 5 días no se efectuó medición

Figura 19. **Curva de días de cultivo medidos vrs energía eléctrica promedio producida por día**



Fuente: elaboración propia.

## 2.2. Sistema de autoproducción de energía eléctrica

En el siguiente apartado se describe los lineamientos principales del sistema de autoproducción de energía eléctrica propuesto en esta investigación. Se abordan los temas de estimación de generación de energía eléctrica, componentes del sistema y proceso de dimensionamiento de este.

### 2.2.1. Estimación de la generación de energía eléctrica

En la estimación de la generación de energía eléctrica por medio de una célula de combustible vegetal microbiana mediante la fotosíntesis del frijol se determinó las tasas de producción de electricidad por superficie cultivada siendo estas la tasa de potencia eléctrica promedio por metro cuadrado de superficie y la tasa de energía eléctrica promedio por metro cuadrado de superficie. Las tasas antes mencionadas fueron calculadas a partir de los promedios obtenidos en el capítulo anterior específicamente la potencia promedio y energía promedio para la prueba a escala, tomando en cuenta que la prueba realizada se desarrolló en un metro cuadrado de superficie cultivada, estas se calcularon de la siguiente forma.

$$Tasa_{-}P_{prom} = \frac{P_{prom}}{A} = \frac{2.3786\mu W}{1m^2} = 2.3786\mu W/m^2$$

$$Tasa_{-}E_{prom} = \frac{E_{prom}}{A} = \frac{16.4044\mu Wh}{1m^2} = 16.4044\mu Wh/m^2$$

Las tasas antes mencionadas permiten obtener una estimación de las capacidades producción en función de la superficie cultivada a disponer por lo que este parámetro es fundamental para el dimensionamiento de un sistema de

autoproducción dado que indica la potencia eléctrica promedio que se espera producir en un cultivo de frijol para determinada superficie al igual que la energía eléctrica promedio esperada.

Como se expuso en el capítulo anterior al presentar tanto la potencia eléctrica así como la energía eléctrica una variación estas se analizaron con más detenimiento al generar una curva de potencia eléctrica promedio diaria así también una curva de energía eléctrica promedio semanal, en este capítulo se analizaron estas en función de su comportamiento, esto mediante una regresión lineal aplicada a la curva de potencia eléctrica promedio diaria donde se generó la siguiente ecuación, además se determinó la calidad del modelo presentado mediante el coeficiente de determinación.

$$P_{prom\_hora} = -2.4940*(Hora) + 19.0840$$

$$r^2 = 0.1331$$

Con el modelo lineal obtenido se determinó un modelo polinomial de la potencia promedio diaria para representar en mayor porcentaje la modelación de los datos obtenidos, con esto se implementó una regresión polinomial para determinar una tendencia en la curva de potencia promedio diaria, de esta se obtuvo el siguiente modelo con el coeficiente de determinación indicado.

$$P_{prom\_hora} = -0.0181*(Hora^2) + 0.4437*(Hora) - 0.2070$$

$$r^2 = 0.3612$$

Para el caso de la curva de energía eléctrica promedio semanal se efectuó un modelado mediante una regresión lineal en este caso polinomial dado el comportamiento presentado por esta, se generó la siguiente ecuación además se estimó la calidad del modelo mediante el cálculo del coeficiente de determinación.

$$E_{prom\_diaria} = -0.7965*(Día)^2 + 5.2800*(Día) + 10.3232$$

$$r^2 = 0.5865$$

Los dos anteriores modelos permiten conocer las tendencias de ambas curvas en cuanto a su comportamiento lo que indica el comportamiento esperado por sistemas de autoproducción de energía eléctrica con base en esta tecnología para diferentes extensiones superficiales de este cultivo, el comportamiento que se obtuvo de la curva de potencia eléctrica promedio diaria indica que esta tiende a presentar una producción estable con ciertas variaciones que determinan la presencia de máximos de producción. La curva de energía eléctrica promedio semanal presenta un comportamiento con un máximo de producción energética evidente durante los días de la semana.

Los anteriores comportamientos generan para sistemas de mayor capacidad las tendencias a esperar para planificar una generación que permita dimensionar el sistema de autoproducción en especial los componentes de estos y a partir de una demanda eléctrica del cultivo.

Los otros parámetros importantes en la generación de energía eléctrica son el voltaje y la corriente por lo cual se determinó el voltaje y corriente promedio obtenidos de las mediciones realizadas durante el periodo de la

prueba a escala, las 304 mediciones presentadas en la tabla de datos medidos en la sección de anexos, a continuación se presenta el cálculo de estas dos variables.

$$V_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} = \frac{13524.0mV}{304} = 44.4868mV$$

$$V_{min} = \min\{V_1, V_2, \dots, V_{304}\} = 1.9000[mV]$$

$$V_{max} = \max\{V_1, V_2, \dots, V_{304}\} = 94.4000[mV]$$

$$I_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n} = \frac{12.788mA}{304} = 0.0421mA$$

$$I_{min} = \min\{I_1, I_2, \dots, I_{304}\} = 0.0020[mA]$$

$$I_{max} = \max\{I_1, I_2, \dots, I_{304}\} = 0.0870[mA]$$

Donde:

- i: el número de medición actual en el calculo
- n: número total de mediciones realizadas

Con estos parámetros obtenidos para la duración del periodo de prueba a escala y con un área de un metro cuadrado de cultivo para esta prueba se estimó la tasa de voltaje promedio por superficie de cultivo producida, así como la tasa de corriente promedio por superficie de cultivo producida, lo anterior se determinó de la siguiente manera.

$$Tasa\_V_{prom} = \frac{V_{prom}}{A} = \frac{44.4868mV}{1m^2} = 44.4868mV/m^2$$

$$Tasa\_I_{prom} = \frac{I_{prom}}{A} = \frac{0.042066mA}{1m^2} = 0.0421mA/m^2$$

### 2.2.2. Componentes del sistema

Los componentes del sistema de autoproducción energía eléctrica se determinaron a partir de que la generación de electricidad por medio de la célula de combustible vegetal microbiana genera en corriente continua por lo tanto evidencia la necesidad de convertir esta a corriente alterna si las cargas a suministrar son comunes (corriente alterna). Para esta investigación se trabajó la determinación y posterior dimensionamiento con conversión de la corriente continua a corriente alterna.

El sistema de autoproducción que se planteó en esta investigación se divide en las siguientes partes en manera resumida:

- Generación
- Transformación
- Almacenamiento
- Distribución
- Protecciones
- Accesorios

La parte de generación integra al componente principal que es la célula de combustible vegetal microbiana propiamente dicha, este componente es la

fuelle para el sistema y debe de tenerse en cuenta las partes que lo integran como lo son la estructura de contención o el suelo de trabajarse en grandes áreas cultivadas, los electrodos de recolección, conductores de cobre y el arreglo de conexiones que se trabajara, es decir las conexiones entre las células para obtener un voltaje y corriente deseado, por lo que las conexiones dependerán principalmente de la potencia eléctrica a suministrar y el voltaje de operación requerido.

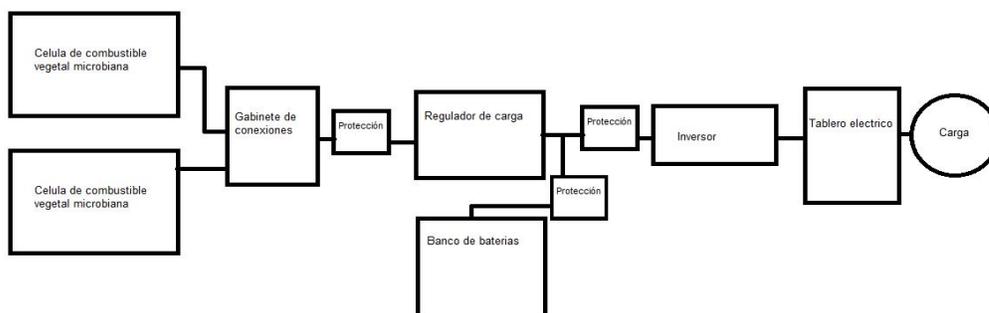
La parte de transformación se centra en el componente esencial siendo este el inversor de corriente como se indicó en el inicio de este apartado se debe convertir la corriente directa generada por los arreglos de células en corriente alterna para el correcto suministro de energía eléctrica a las cargas instaladas. La parte de almacenamiento se forma por dos componentes los cuales son el regulador de carga el cual administra la energía eléctrica almacenada en el segundo componente que es el banco de baterías estas en su amplia gama se utilizan de iones de litio o baterías de ciclo profundo, en esta investigación se propone la implementación de las segundas dado suponen un menor costo.

La parte de distribución contempla el suministro de corriente alterna a las cargas por alimentar, esto integra los circuitos de alimentación que se proponen con base en los requerimientos del usuario, en el caso específico de cultivos estos se emplearan en necesidades eléctricas relacionadas al cultivo como bombas de agua para el sistema de riego implementado, con ello los componentes requeridos son conductores de cobre recubiertos de calibre que se determine mediante el proceso expuesto en el siguiente apartado, también el uso de tableros de distribución con las protecciones necesarias y controles de mando. Implementando un esquema de distribución de alimentador principal con tablero principal y ramales para las distintas cargas.

Las protecciones del sistema de autoproducción son importantes para el correcto uso de la red, por lo que estas se deben encontrar distribuidas adecuadamente a lo largo de red. Por lo que estas protecciones se agrupan en protecciones en distribución las cuales se encuentran integradas en el tablero principal de distribución siendo los componentes principales los interruptores termomagnéticos que resguardan los circuitos de alimentación a las cargas.

El otro grupo son las protecciones aguas arriba de este tablero lo cual integran las protecciones para la conexión de la fuente de generación y el resto del sistema gobernado por un fusible, en el caso de la parte de almacenamiento presenta la protección necesaria por medio de un interruptor termomagnético, este almacenamiento presenta protección mediante el regulador de carga, también se debe tener la protección para el inversor de corriente siendo esta un interruptor termomagnético y un fusible. A continuación, se presenta un diagrama esquemático simplificado de un sistema de autoproducción de energía eléctrica.

Figura 20. **Diagrama esquemático del sistema de autoproducción**



Fuente: elaboración propia.

### 2.2.3. Proceso de dimensionamiento del sistema

El proceso de dimensionamiento del sistema de autoproducción de energía eléctrica inicia con la determinación de la potencia y energía eléctricas de la demanda, es decir el cálculo del consumo de la carga o cargas que se desean alimentar. En el cálculo de consumo se debe listar las cargas o aparatos que consuman electricidad y que sean alimentados por el sistema, por lo tanto para cada carga se debe obtener el valor de potencia eléctrica esto gracias a los datos técnicos de placa.

$$P_{carga\_i} = Potencia\_placa\_i \text{ [W]}$$

Consecuentemente con esto se obtiene la energía eléctrica que consume esta carga mediante la aplicación de la siguiente ecuación, donde se requiere del tiempo en horas que funcionara el aparato o que la carga consumirla dicha energía.

$$E_{carga\_i} = (P_{carga\_i} \text{ [W]}) * (t \text{ [horas]})$$

Donde:

- t: es el tiempo en horas de consumo de la carga

Estas ecuaciones se aplican a la carga que se alimentara o a todas las cargas que se alimentaran con esto se debe calcular la potencia demandada por todas las cargas y la energía eléctrica consumida por todas las cargas, esto mediante las siguientes ecuaciones (Fundación Energía Comunitaria, 2017).

$$P_{total\_demandada} = \sum_{i=1}^n P_{carga\_i}$$

$$E_{total\_demandada} = \sum_{i=1}^n E_{carga\_i}$$

Donde:

- $i$ : es el número de la carga actual en el cálculo
- $n$ : es el número total de cargas conectadas al sistema

El componente para dimensionar con estos datos es el inversor el cual al convertir de corriente continua a corriente alterna se presenta el cálculo de la potencia de operación de este, lo que se realiza por la siguiente ecuación, se menciona que al transformar a corriente alterna este determina la potencia aparente con dimensionales de voltamperios (Fundación Energía Comunitaria, 2017).

$$S_{inversor} = \frac{P_{total\_demandada}}{FP}, [VA]$$

Donde:

- FP: factor de potencia de la carga, que si existen motores o algún aparato que utilice bobinas se emplea un factor 0.8, mientras que si la carga es puramente resistiva, ningún motor o bobina se emplea un factor de 1 (Fundación Energía Comunitaria, 2017).

Un aspecto para considerar en el inversor es dado que se comercializan en el mercado en ciertos valores de potencia se debe seleccionar un valor de potencia que sea igual o mayor a la potencia aparente resultante de la anterior ecuación. Un punto para resaltar en el cálculo de la potencia del inversor es que si la carga o alguna de las cargas presenta valores de corriente de arranque elevados, como los tiene un motor de inducción se debe calcular una potencia

mayor por medio de la siguiente ecuación (Fundación Energía Comunitaria, 2017).

$$S_{inversor\_nueva} = (FI_A) * S_{inversor}$$

Donde:

- $FI_A$ : es el factor por corriente de arranque que puede ser 2 a 3 (Fundación Energía Comunitaria, 2017)

El siguiente componente para dimensionar es el banco de baterías, por lo tanto, se determinará la energía a suministrar, el voltaje del banco, tipo de batería y el número de baterías a utilizar. La energía que debe suministrar el banco de baterías será la energía total demandada ( $E_{total\_demandada}$ ) más la energía que se pierde en el proceso de conversión realizado por el inversor, esto se calcula mediante la siguiente ecuación (Fundación Energía Comunitaria, 2017).

$$E_{banco\_baterias} = \frac{E_{total\_demandada}}{\eta_{inversor}}$$

Donde:

- $\eta_{inversor}$ : es la eficiencia de la placa del inversor seleccionado esto en valor decimal (Fundación Energía Comunitaria, 2017).

La siguiente determinación para realizar para el banco de baterías es la capacidad del banco de baterías que se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación, las dimensionales de esta capacidad se encuentran en amperios-hora (Fundación Energía Comunitaria, 2017).

$$C_{\text{banco\_baterias}} = \frac{E_{\text{banco\_baterias}}}{\eta_{\text{banco}} * DoD * V_{\text{banco\_baterias}}}, [Ah]$$

Donde:

- $\eta_{\text{banco}}$ : es la eficiencia del banco de baterías esta depende de la batería a utilizar y habitualmente se encuentra entre 0.8 y 0.9 (Fundación Energía Comunitaria, 2017).
- DoD: es la profundidad de descarga de las baterías a utilizar, en el caso de las baterías de ciclo profundo varia de 0.5 a 0.7 (Fundación Energía Comunitaria, 2017).
- $V_{\text{banco\_baterias}}$ : es la voltaje nominal del banco de baterías esta deberá ser la misma que la tensión de entrada del inversor seleccionado es decir del valor de Voltaje en corriente directa que presenta el inversor (Fundación Energía Comunitaria, 2017).

En el caso de las baterías estas se comercializan en valores de capacidad estándar dependiendo del valor que se requiera por lo que se requiere que estas se conecten en configuraciones que permitan obtener el valor de capacidad deseado o en su defecto mayor por lo que para calcular el número de baterías a comprar para fabricar el banco se calcula como sigue, se resalta que el numero 3 indica la cantidad de días que debe suministrar la batería en caso no exista generación de electricidad por parte de la fuente (Fundación Energía Comunitaria, 2017).

$$\text{Numero\_baterias} = \frac{3 * C_{\text{banco\_baterias}}}{C_{\text{bateria}}}$$

Donde:

- $C_{\text{bateria}}$ : es la capacidad de la batería comercializada seleccionada

La conexión de las baterías en serie y paralelo que conformaran el banco se debe realizar por medio de las siguientes ecuaciones (Fundación Energía Comunitaria, 2017).

$$\text{Numero\_baterias}_{\text{serie}} = \frac{V_{\text{banco\_baterias}}}{V_{\text{bateria}}}$$

$$\text{Numero\_ramas}_{\text{paralelo}} = \frac{\text{Numero\_baterias}}{\text{Numero\_baterias}_{\text{serie}}}$$

El resultado del número de ramas en paralelo debe ser un numero entero para ello se puede aumentar el número de baterías a utilizar. El siguiente componente en dimensionarse es el regulador de carga el cual debe dimensionarse la corriente que este pueda controlar que deberá ser como mínimo la máxima corriente del arreglo de células combustibles vegetales microbianas, esta corriente se determina de la siguiente manera, sus dimensionales son en amperios (Fundación Energía Comunitaria, 2017).

$$I_{\text{carga\_bateria}} = \frac{P_{\text{total\_demandada}}}{V_{\text{banco\_baterias}}}, [A]$$

Para el dimensionamiento de las células de combustible vegetal microbiana se calculan la potencia y energía eléctrica que se puede generar asociada a una superficie cultivada, esta potencia deberá ser igual a la potencia del inversor con ello se podrá encontrar el área necesaria en metros cuadrados a partir de la siguiente ecuación, la energía eléctrica del sistema deberá ser como mínimo igual a la energía total demandada.

$$P_{sistema} = (Tasa\_P_{prom}) * (Area\_cultivada)$$

$$E_{sistema} = (Tasa\_E_{prom}) * (Area\_cultivada)$$

En el caso del voltaje y corriente generados por las células de combustible vegetal microbiana, se estima con base en el área cultivada un valor, siendo el determinado por la siguiente fórmula.

$$V_{sistema} = (Tasa\_V_{prom}) * (Area\_cultivada)$$

$$I_{sistema} = (Tasa\_I_{prom}) * (Area\_cultivada)$$

Se debe tomar en cuenta que el voltaje del sistema, es decir de los arreglos de las células debe ser el mismo que el voltaje del banco de baterías que a su vez es el voltaje de entrada (DC) del inversor, por lo tanto se debe realizar un arreglo en serie y paralelo que permita obtener el voltaje del banco de baterías. Lo anterior requiere que se mida el voltaje de cada célula y por

medio de las siguientes ecuaciones se determine el arreglo a realizar (Fundación Energía Comunitaria, 2017).

$$numero\_celulas\_serie = \frac{V_{banco\_baterias}}{V_{celula}}$$

$$I_{arreglo} = \frac{\left( \frac{E_{banco\_baterias}}{\eta_{regulador}} \right)}{V_{banco\_baterias}}$$

$$numero\_ramas\_paralelo = \frac{I_{arreglo}}{I_{celula}}$$

Donde:

- $\eta_{regulador}$ : es la eficiencia del regulador seleccionado

Para el dimensionamiento de los conductores se toma la potencia máxima que se trabajara en el sistema, es decir la potencia generada por el arreglo de células que se denominó potencia del sistema, dado que esta está en corriente directa se calcula la corriente que circulara por los conductores mediante la siguiente ecuación (Espinosa, 2014).

$$I_{conductores} = \frac{P_{sistema}}{V_{banco\_baterias}}, [A]$$

Con este valor de corriente mediante la tabla de corriente soportada por calibre de conductores se determina el calibre del conductor a utilizar, tomando

en cuenta que la corriente del conductor dada por la tabla debe ser cercana a la corriente calculada con anterioridad, pero siempre mayor (Espinosa, 2014).

Figura 21. **Tabla de conductores de cobre**

Amperaje que soportan los cables de cobre					
Nivel de temperatura:	60°C	75°C	90°C	60°C	
Tipo de aislante:	TW	RHW, THW, THWN	THHN, XHHW-2, THWN-2	SPT	
Medida / calibre del cable	Amperaje soportado			Medida / calibre del cable	Amperaje soportado
14 AWG	15 A	15 A	15 A	20 AWG	2 A
12 AWG	20 A	20 A	20 A	18 AWG	10 A
10 AWG	30 A	30 A	30 A	16 AWG	13 A
8 AWG	40 A	50 A	55 A	14 AWG	18 A
6 AWG	55 A	65 A	75 A	12 AWG	25 A
4 AWG	70 A	85 A	95 A		
3 AWG	85 A	100 A	115 A		
2 AWG	95 A	115 A	130 A		
1 AWG	110 A	130 A	145 A		
1/0 AWG	125 A	150 A	170 A		
2/0 AWG	145 A	175 A	195 A		
3/0 AWG	165 A	200 A	225 A		
4/0 AWG	195 A	230 A	260 A		

Fuente: Intensity. *Conceptos básicos de conductores eléctricos*. Consultado el 13 de noviembre de 2020 Recuperado de <https://intensity.mx/es/blog/conceptos-basicos-de-conductores-electricos>

Para el dimensionamiento del interruptor termomagnético este se selecciona con base en la corriente de conductores anteriormente calculada esta será la corriente mínima que debe proteger el interruptor termomagnético. Con este último componente se termina el proceso de dimensionamiento del sistema de autoproducción de energía eléctrica, este proceso es una guía simplificada que permite una estimación aproximada de los valores de los componentes necesarios en el sistema.

## **2.3. Beneficios del sistema de generación de electricidad**

En este apartado se presentan los beneficios que presenta el sistema de generación de electricidad utilizando como fuente una célula de combustible vegetal microbiana, este apartado se divide en dos grandes partes la económica y ambiental.

### **2.3.1. Beneficio económico**

El beneficio económico que se presenta a continuación indica el presupuesto de inversión a realizar tanto para el sistema de generación de energía eléctrica a pequeña escala así como el sistema de autoproducción propuesto de una hectárea, la siguiente parte describe el análisis que permite determinar la viabilidad económica de este sistema.

#### **2.3.1.1. Presupuesto de costos del sistema**

En la investigación realizada se obtuvo el presupuesto de costos de la prueba a escala, el cual indica los gastos realizados para la construcción del sistema de generación de electricidad a escala este se desglosa de acuerdo con los materiales utilizados, detallándose en la siguiente tabla.

Tabla VI. **Presupuesto de costos del sistema de generación de electricidad a pequeña escala**

Componente	Precio por unidad [Q]	Unidades	Precio total [Q]
Contenedores plásticos	69.99	6	419.94
Malla metálica galvanizada	18.00	2	36.00
Conductores eléctricos de cobre recubiertos	2.95	12	35.4
Estaño para soldadura	17.00	1	17.00
Borneras plásticas con tornillo	17.99	2	35.98
Cajas plexo para intemperie	39.99	2	79.98
Resistencia de medición	1.00	1	1.00
Bolsas de tierra abonada	8.00	12	96.00
Semillas de frijol	5.00	1	5.00
Barrilla para entutorar	4.00	11	44.00
Cautin para soldar	49.99	1	49.99
<b>Total</b>			<b>820.29</b>

Fuente: elaboración propia.

Este presupuesto de gastos plantea principalmente los gastos realizados para construir el proyecto es decir la inversión inicial y no considera los gastos operacionales como agua requerida.

### 2.3.1.2. Viabilidad económica

El presupuesto de gastos que se presenta a continuación estima para un sistema de autoproducción de energía eléctrica descrito en el capítulo anterior. Esto con el fin de analizar la viabilidad del proyecto. La tabla siguiente muestra el presupuesto de los gastos necesarios en este sistema para su instalación lo cual se traduce como la inversión inicial a realizar en el flujo de caja que se realizara en otro apartado posterior del capítulo. Para estimar la producción de una hectárea se utilizó las ecuaciones del capítulo anterior, como a continuación se muestra.

$$V_{sist\_1ha} = (Tasa\_V_{prom}) * (Area\_cultivada) = (44.4868 mV/m^2) * (10,000 m^2) = 444.8680 [V]$$

$$I_{sist\_1ha} = (Tasa\_I_{prom}) * (Area\_cultivada) = (0.0421 mA/m^2) * (10,000 m^2) = 0.4210 [A]$$

$$P_{sist\_1ha} = V_{sist\_1ha} * I_{sist\_1ha} = (444.8680 [V]) * (0.4210 [A]) = 187.2894 [W]$$

Con esto se determinó que la carga alimentada sería una bomba de agua de 150 [W] de potencia por un periodo de 3 horas, se empleó el proceso de dimensionamiento del capítulo anterior para dimensionar el equipo y se costeo el mismo según los precios del mercado (octubre 2019), todo esto generó el monto de la inversión inicial que a continuación se muestra. Cabe resaltar que se usó el voltaje y corriente del sistema dado que la potencia del sistema por ecuación directa resulto reducida en grandes proporciones.

Tabla VII. **Presupuesto de costos del sistema de autoproducción**

Componente	Precio por Unidad [Q]	Unidades	Precio Total [Q]
Malla metálica galvanizada (1 rollo de 33.33 yardas)	599.94	500	299970.00
Conductor eléctrico de cobre	2.95	1000	2950.00
Estaño para soldadura (450 g)	220.00	1	220.00
Bornes de conexión	6.00	500	3000.00
Tablero eléctrico de conexiones (gabinete)	929.15	1	929.15
Riel metálico (35mm)	12.00	10	120.00
Canaletas	14.99	1	14.99
Tornillos	0.23	100	23.34
Inversor de corriente (200 W)	429.99	1	429.99
Regulador de carga (12 V, 20A)	338.95	1	338.95
Baterías (100 Ah, 12 V)	1537.20	3	4611.60
Tablero eléctrico de distribución (2 polos)	59.99	1	59.99
Interruptor termomagnético (15 A)	34.99	1	34.99
Fusibles (15 A)	2.00	20	40.00
Seccionador manual	272.30	1	272.30
Medidores de potencia y energía eléctrica producida	544.60	1	544.60
Semillas de frijol	800.00	2	1600.00
Barrillas para entutorar	4.00	500	2000.00

Continuación de la tabla VII.

Manguera para riego (100 m, 1 ")	652.40	125	81550.00
Bomba para riego (150 W)	121.37	1	121.37
Tubos PVC	17.00	20	340.00
Total			399,171.27

Fuente: elaboración propia.

El total antes estimado representara la inversión inicial del proyecto en el flujo de caja que se calcula más adelante en este capítulo, otros gastos a considerar en este flujo de caja son los gastos de operación y mantenimiento tanto de las partes eléctricas del sistema, como también de la parte de cultivo del sistema. En el caso del cálculo de operación y mantenimiento del sistema de autoproducción se utilizó el porcentaje que se aplica a los sistemas solares fotovoltaicos por la gran similitud de este sistema al sistema propuesto, este porcentaje es de 0.5 % de la inversión inicial del sistema de energía (Mercados eléctricos, 2012; Beyer *et al*, 2009; IEA, 2010c).

$$C_{\text{mantto}} = (0.5\%) * (314,074.92) = 1570.37 [Q / \text{año}]$$

Donde:

- $C_{\text{mantto}}$  : costo anual de mantenimiento y operación del sistema de autoproducción [Q/año].

- 0.5 % : porcentaje de mantenimiento y operación utilizado sobre la inversión inicial del sistema de autoproducción (componente eléctrica).
- 314,074.92[Q]: componente monetaria de la inversión inicial correspondiente a la parte eléctrica del sistema de autoproducción.

La determinación del costo de producción del frijol requirió primeramente la estimación de la producción esperada para el área cultivada esta se realizó mediante la siguiente ecuación.

$$Producción = (Rendimiento) * (Área\_cultivada) * \left( \frac{1[manzana]}{0.7050[hectareas]} \right) = (15.10) * (1) * \left( \frac{1}{0.7050} \right) = 21.4184[quintales]$$

Donde:

- Rendimiento: es el rendimiento del cultivo con respecto a su área cultivada, para el año agrícola 2016/2017 según MAGA, en [quintales/manzanas].
- Área cultivada: es la superficie cultivada en hectáreas, siendo en este cálculo una hectárea.

Con la estimación de la producción esperada en una hectárea de cultivo mediante el dato de costo de producción de 327.00 [Q] determinado en (Hernández, 2009) se estimó los costos totales de operación del sistema presentes en la siguiente tabla.

Tabla VIII. **Gastos del sistema de autoproducción anuales**

Gasto	Precio por unidad [Q]	por Unidades	Precio total [Q]
Costo de producción del quintal de frijol	327.00	21.4184	7003.82
Mantenimiento de la componente eléctrica del sistema	1570.37	1	1570.37
Total			8574.19

Fuente: elaboración propia.

Los ingresos que se calculan para el proyecto son principalmente el consumo de energía eléctrica que necesita el cultivo en el desarrollo de este como el bombeo de agua para riego el cual se traduce a quetzales, para realizar la determinación de este consumo se utiliza la siguiente ecuación.

$$E_{consumida} = P_{bomba} [kW] * (Horas\_uso\_diario), [kWh]$$

$$E_{consumida} = (150[W]) * (3[horasdiarias]) = 450[Wh] = 0.45[kWh]$$

$$Ingreso\_energia\_ahorrada = (E_{consumida}) * (30) * (Tarifa_{kWh}), [Quetzales\_mensuales]$$

$$Ingreso\_energia\_ahorrada = (0.450[kWh]) * (30) * \left(1.2501 \left[\frac{Q}{kWh}\right]\right) = 16.88[Q\_mes]$$

$$Ingreso\_energia\_total = [(c\ argo\_energia) + (c\ argo\_consumidor[Q/usuario - mes])](1.12) + (1 + Tasa\_alumbrado)$$

$$Ingreso\_energia\_total = [(16.88) + (9.37)] * (1.12) + (1 + (26.25 * .0.10)) = 32.02[Q/mes]$$

Donde:

- 30: representa el número de días promedio de un mes.
- TarifakWh : es la tarifa eléctrica de la distribuidora EEGSA, para el pliego tarifario agosto-octubre 2019, en específico la tarifa social.(1.2501[Q/kWh]).
- Tasa\_alumbrado: tasa de alumbrado público del 10 % sobre cargo energía más cargo consumidor.

El otro ingreso para considerar es el generado por la venta de la producción de frijol como grano básico de alimentación en un año agrícola. Para determinar dicho ingreso se realizó una estimación de la producción de frijol por superficie cultivada, con esta producción se procedió a la determinación del precio del grano en el mercado nacional, el cual se estimó mediante un modelo matemático de los precios históricos de los últimos años presentes en la siguiente tabla.

Tabla IX. **Precios históricos del frijol a nivel nacional**

Frijol precio anual	
Año	[Q/qq]
2009	427.32
2010	375.76
2011	378.08
2012	384.91
2013	333.14
2014	356.56
2015	362.86
2016	405.46
2017	420.47

Fuente: MAGA, (2016). *El agro en cifras 2016*.

El modelo matemático determinado gracias a la regresión polinomial correspondiente se determinó como.

$$Pr\ ecio\_Venta_{frijol} = 4.3413 * X^2 - (1.7478 * 10^4) * X + (1.7592 * 10^7)$$

Con este modelo se calculó el precio de venta para cada año de los correspondientes al intervalo de análisis financiero realizado, el cual es de 30 años iniciando en 2019, estos datos se presentan a continuación.

Tabla X. **Precios estimados de la venta del frijol a nivel nacional**

Año	Precio Venta F [Q/qq]
2019	624.01
2020	680.52
2021	745.71
2022	819.59
2023	902.15
2024	993.39
2025	1093.31
2026	1201.92
2027	1319.21
2028	1445.18
2029	1579.83
2030	1723.17
2031	1875.19
2032	2035.89
2033	2205.28
2034	2383.34
2035	2570.09
2036	2765.52
2037	2969.64
2038	3182.44
2039	3403.92
2040	3634.08

Continuación de la tabla X.

2041	3872.93
2042	4120.45
2043	4376.66
2044	4641.56
2045	4915.13
2046	5197.39
2047	5488.33
2048	5787.96

Fuente: elaboración propia.

Con estos datos obtenidos de gastos e ingresos se realizó el análisis financiero del flujo de caja del proyecto de un sistema de autoproducción de una hectárea de superficie cultivada para 30 años, obteniendo lo siguiente.

**Tabla XI. Flujo de caja para el sistema de autoproducción**

n	Ingresos por venta frijol	Ingresos energía	Costos	Flujo neto
0			-314074.92	-314074.92
1	13365.28	384.24	-8574.19	5175.33
2	14575.65	384.24	-8574.19	6385.69
3	15971.99	384.24	-8574.19	7782.03
4	17554.29	384.24	-8574.19	9364.33
5	19322.56	384.24	-8574.19	11132.61
6	21276.80	384.24	-8574.19	13086.84
7	23417.00	384.24	-8574.19	15227.05
8	25743.18	384.24	-8574.19	17553.22
9	28255.32	384.24	-8574.19	20065.36

Continuación de la tabla XI.

10	30953.43	384.24	-8574.19	22763.47
11	33837.50	384.24	-8574.19	25647.55
12	36907.54	384.24	-8574.19	28717.59
13	40163.55	384.24	-8574.19	31973.60
14	43605.53	384.24	-8574.19	35415.58
15	47233.48	384.24	-8574.19	39043.52
16	51047.39	384.24	-8574.19	42857.43
17	55047.27	384.24	-8574.19	46857.31
18	59233.12	384.24	-8574.19	51043.16
19	63604.93	384.24	-8574.19	55414.98
20	68162.71	384.24	-8574.19	59972.76
21	72906.46	384.24	-8574.19	64716.51
22	77836.18	384.24	-8574.19	69646.22
23	82951.86	384.24	-8574.19	74761.91
24	88253.51	384.24	-8574.19	80063.56
25	93741.13	384.24	-8574.19	85551.18
26	99414.72	384.24	-8574.19	91224.77
27	105274.27	384.24	-8574.19	97084.32
28	111319.80	384.24	-8574.19	103129.84
29	117551.28	384.24	-8574.19	109361.33
30	123968.74	384.24	-8574.19	115778.79

Fuente: elaboración propia.

Para el flujo de caja presentado se realizó el cálculo del VAN y TIR para analizar estos valores para 10, 20, 25 y 30 años para estimar la TIR del proyecto, el tiempo de retorno de la inversión y el VAN, esto mediante las siguientes ecuaciones, con los datos de la tabla anterior.

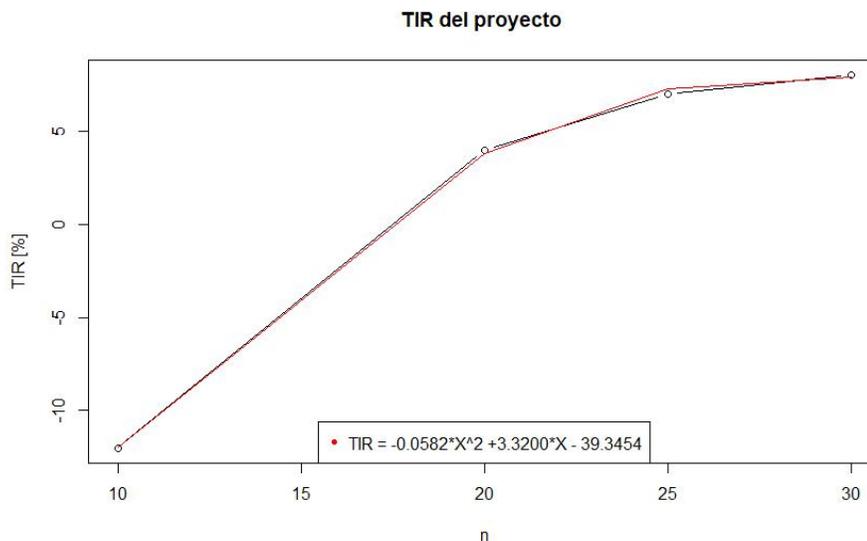
Tabla XII. **VAN y TIR resultantes del análisis financiero del proyecto**

n	TIR	VAN (Tasa= 4 %)
10	-12	Q-214,905.81
20	4	Q6,831.53
25	7	Q158,277.98
30	8	Q330,007.33

Fuente: elaboración propia.

Mediante la anterior tabla se procedió a determinar por medio de los valores de TIR el modelo matemático y la gráfica siguiente.

Figura 22. **TIR analizada para el sistema de autoproducción de energía**



Fuente: elaboración propia.

Con este modelo se estimó que el sistema de autoproducción de energía presentara un tiempo de retorno de inversión mayor a 17 años, la TIR calculada para un horizonte de 20 años para esperar ganancias serias de 4 % con un VAN de Q 6,831.53 y para el límite de 30 años se determinó una TIR de 8 % además de un VAN de Q 330,007.33 con una tasa de 4 %.

### 2.3.2. **Beneficio ambiental**

A continuación, se describe la identificación del impacto ambiental para la prueba a escala, así también se presentan los cálculos de CO<sub>2</sub> equivalente tanto de la prueba a escala como la proyectada para el sistema de autoproducción de energía de una hectárea.

### **2.3.2.1. Identificación del impacto ambiental**

La identificación de los impactos ambientales se realizó mediante la implementación de una matriz de Leopold para la prueba a escala ejecutada, realizada por el autor de esta investigación. Obteniéndose las siguientes acciones y factores.

#### Acciones:

- Etapa de construcción
- Preparación del suelo (PS)
- Colocación de electrodos (CE)
- Instalación eléctrica (IE)
- Siembra de semillas (Si)
- Etapa de operación
- Control de maleza (CM)
- Aplicación de fertilizante (AF)
- Riego (R)
- Funcionamiento de electrodos (FE)
- Cosecha (C)
- Etapa final
- Desinstalación de la célula (Di)
- Disposición de suelo utilizado (DS)
- Disposición de desechos vegetales (DDV)
- Secado de granos (SG)

#### Componentes:

- Agua
- Calidad (CA)

- subterráneas (AS)
- Suelo
- Nutrientes (NS)
- Contaminantes presentes (CS)
- Estructura (ES)
- Planta
- Nutrientes (NP)
- Desarrollo de las etapas de la planta (DEP)
- Flora
- Cobertura vegetal (CV)

En la ponderación de la magnitud e importancia de la acción sobre el componente se estableció una escala, la cual se detalla a continuación.

Magnitud: se estableció una escala del 1 al 10 en donde se presentó los siguientes parámetros.

- 0-1.9: muy baja
- 2-3.9: baja
- 4-5.9: media
- 6-7.9: alta
- 8-10: muy alta

Importancia: se estableció una escala de 1 a 10 en donde se presentó los siguientes parámetros de control.

- Sin importancia: 0
- Menor importancia: 1-3

- Moderada: 4-6
- Mayor importancia: 7-9
- Máxima importancia: 10

Los impactos analizados presentan la característica que pueden ser perjudiciales al ambiente en este caso serán negativos (-) o pueden ser beneficiosos al ambiente en este caso serán positivos (+), este signo se agregó a la ponderación dada en cada par (magnitud/importancia).

Tabla XIII. **Matriz de impactos ambientales de la prueba a escala**

		Acciones													Total
		PS	CE	IE	Si	CM	AF	R	FE	C	Di	DS	DDV	SG	
Componentes	CA	1/1	-3/3	-2/1	-2/2	3/3	-5/5	5/5	-3/4	3/3	2/2	-3/3	-3/3	1/1	-6/6
	AS	-2/2	-1/1	-1/1	-1/1	3/3	-6/6	-4/4	-4/5	1/1	2/2	-3/3	-3/3	-3/3	-22/23
	NS	6/6	1/1	-1/1	-4/4	4/4	8/8	4/4	2/2	4/6	2/2	4/4	7/7	1/1	38/40
	CS	-1/2	-6/6	-2/2	1/1	2/2	-5/6	-5/5	-5/6	1/1	6/7	-3/3	7/7	1/1	-9/11
	ES	-7/7	-4/4	-1/1	-5/6	2/2	-2/2	-4/4	-3/3	1/1	6/7	3/2	7/7	1/1	-6/7
	NP	8/8	-3/3	-1/1	3/3	6/7	9/9	4/4	-2/3	6/6	6/6	1/1	7/7	-2/2	42/42
	DEP	8/8	-2/2	-1/1	8/9	8/8	9/9	7/9	-3/3	4/4	4/4	1/1	7/7	-1/1	49/53
	CV	-7/8	1/1	-2/2	-5/5	-4/4	-1/1	6/6	-3/3	-2/2	-1/1	1/1	2/2	-5/5	-20/21
Total		6/4	-17/17	-11/10	-5/5	24/26	7/6	13/15	-21/25	18/20	27/29	1/0	31/31	-7/7	

Fuente: elaboración propia.

Las ponderaciones en cada cuadro se dividieron en dos en magnitud del impacto e importancia del impacto donde puede ser positivo o negativo identificando a ambos con un número entero positivo o entero negativo correspondientemente, por lo que en totales se obtuvo la suma de estas ponderaciones por acción y componente con eso se identificaron los impactos ambientales negativos de la prueba a escala. Los que se en listan en la siguiente tabla en orden de punteo.

Tabla XIV. **Impactos ambientales identificados para la prueba a escala**

Orden	Factores afectados	Acciones perjudiciales
1	Aguas subterráneas	Funcionamiento de electrodos
2	Cobertura vegetal	Colocación de electrodos
3	Suelo(contaminantes presentes)	Instalación eléctrica
4	Suelo (estructura)	Secado de granos
5	Agua (calidad)	Siembra de semillas

Fuente: elaboración propia.

### 2.3.2.2. Dióxido de carbono equivalente

En este apartado se determinó el CO<sub>2</sub> equivalente para la energía eléctrica promedio producida durante la prueba a escala, así como el equivalente para la energía eléctrica producida por un sistema de autoproducción de una hectárea esto mediante las siguientes ecuaciones, se resalta que el factor empleado para generar dicha equivalencia fue el del biogás (Dirección General de Energía, 2018), dado que no se encuentra un factor específico para la tecnología de células de combustible vegetal microbianas.

$$CO_{2eq\_prueba\_escala} = (0.0007 \text{ [kgCO}_{2eq} / kWh]) * (E_{prom} \text{ [kWh]}) \text{ [kgCO}_{2eq} ]$$

$$CO_{2eq\_prueba\_escala} = \left(0.0007 \left[\frac{kgCO_{2eq}}{kWh}\right]\right) * (0.000016404 [Wh]) * \left(\frac{1kWh}{1000Wh}\right) = 11.4828 * 10^{-12} [kgCO_{2eq}]$$

$$CO_{2eq\_1\_hectarea} = (0.0007 \text{ [kgCO}_{2eq} / kWh]) * (E_{sistema}) \text{ [kgCO}_{2eq} ]$$

$$CO_{2eq\_1\_hectarea} = (0.0007 \text{ [kgCO}_{2eq} / kWh]) * (450 [Wh]) * \left(\frac{1kWh}{1000Wh}\right) = 0.3150 * 10^{-3} [kgCO_{2eq}]$$



### 3. RESULTADOS

Los resultados producidos por esta investigación se describen a continuación. La generación de electricidad mediante una célula de combustible vegetal microbiana por la fotosíntesis de la planta *Phaseolus vulgaris* obtuvo la siguiente producción en la prueba a escala de laboratorio en un metro cuadrado de superficie.

Tabla XV. **Producción de electricidad obtenida de la prueba a escala de laboratorio**

Parámetros eléctricos	Mínima	Promedio	Máxima	Coeficiente de Variación (adimensional)
Potencia eléctrica [μW]	0.0038	2.3786	8.2128	0.7809
Energía eléctrica día [μWh]	0.0927	16.4044	45.4820	0.8098
Voltaje [mV]	1.9000	44.4868	94.4000	0.5258
Corriente eléctrica [mA]	0.0020	0.0421	0.0870	0.5179

Fuente: elaboración propia.

Con base en la producción obtenida en la prueba a escala de laboratorio se determinaron las tasas de producción de electricidad por área cultivada de los parámetros eléctricos analizados, estos se presentan en la siguiente tabla.

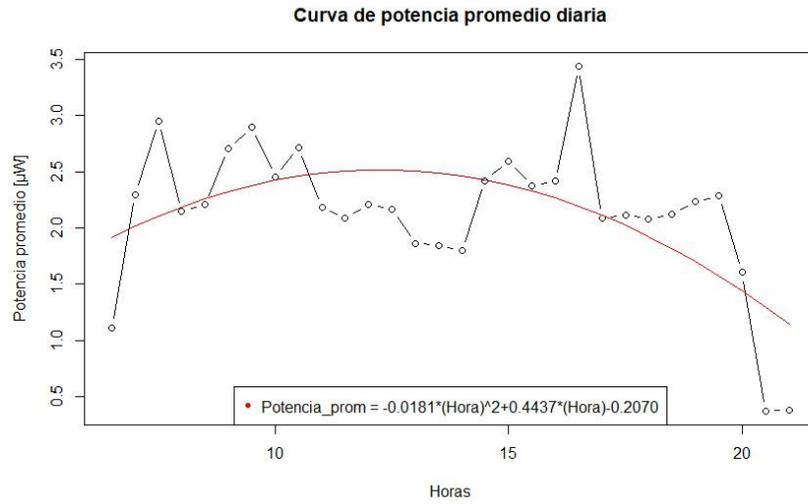
Tabla XVI. **Tasas de producción de electricidad por área cultivada**

Tasa de producción	Valor
Potencia eléctrica promedio por área de cultivo [ $\mu\text{W}/\text{m}^2$ ]	2.3786
Energía eléctrica promedio por área de cultivo [ $\mu\text{Wh}/\text{m}^2$ ]	16.4044
Voltaje promedio por área de cultivo [ $\text{mV}/\text{m}^2$ ]	44.4868
Corriente promedio por área de cultivo [ $\text{mA}/\text{m}^2$ ]	0.0421

Fuente: elaboración propia.

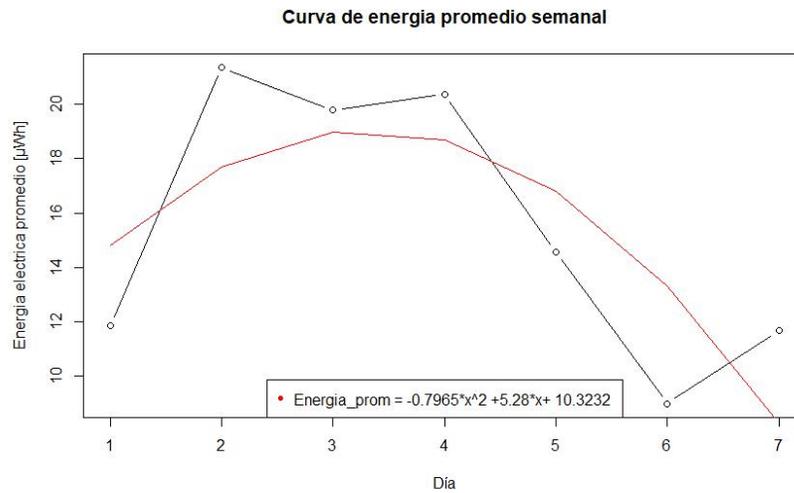
Se determino la curva de producción de potencia eléctrica promedio diaria y la curva de producción de energía eléctrica promedio semanal, obteniendo el modelo matemático que describe su comportamiento con el objetivo de tener un parámetro de la posible generación de electricidad de las células de combustible vegetal microbiana, dichas gráficas se presenta a continuación con su correspondiente modelo.

Figura 23. **Curva de producción de potencia eléctrica promedio diario**



Fuente: elaboración propia.

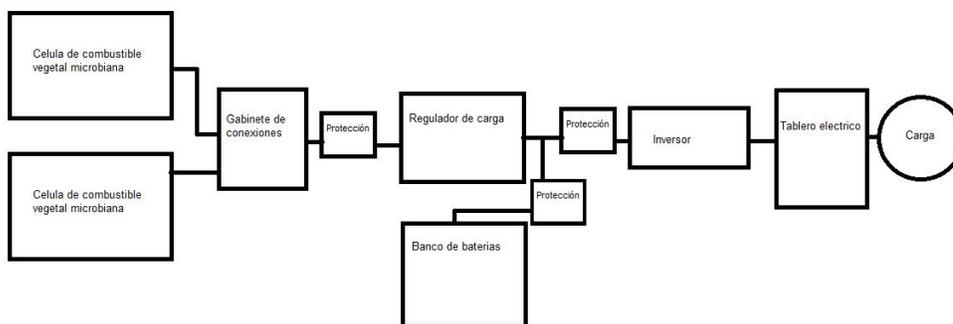
Figura 24. **Curva de producción de energía eléctrica promedio semanal**



Fuente: elaboración propia.

La información obtenida de la prueba a pequeña escala brindo los datos necesarios para determinar los componentes necesarios para dimensionar un sistema de autoproducción de energía eléctrica tomando como fuente de energía la célula de combustible vegetal microbiana. En el siguiente diagrama se presenta dicho sistema con sus componentes, el proceso de dimensionamiento se encuentra en el capítulo 3.

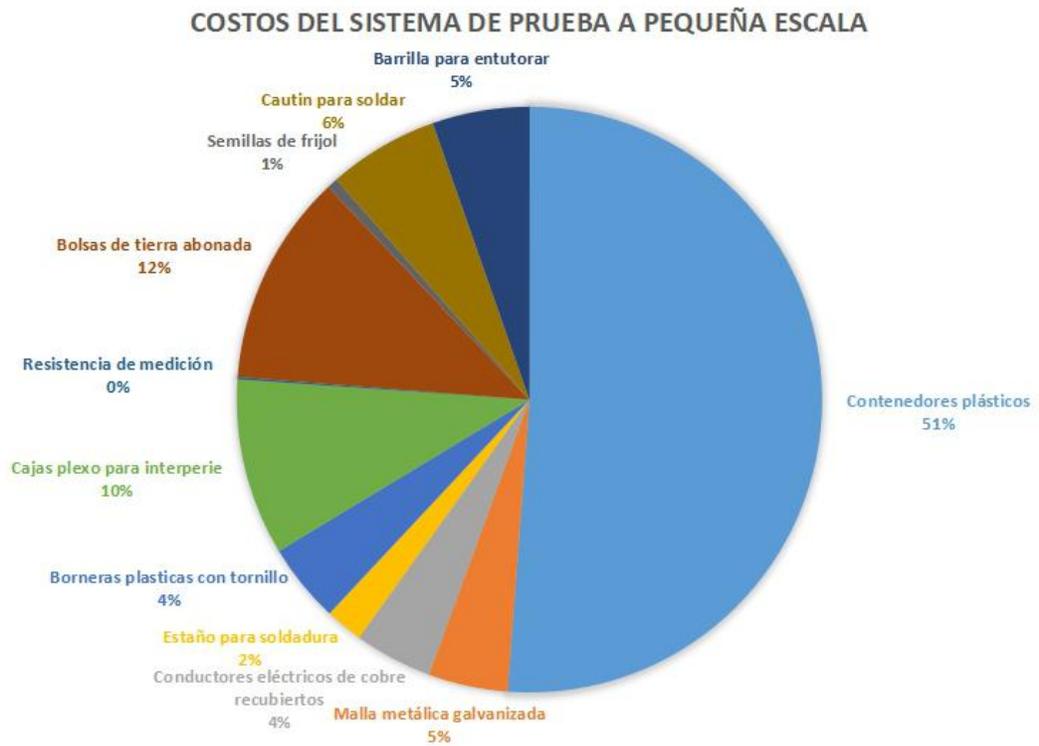
Figura 25. **Diagrama esquemático simplificado del sistema de autoproducción de energía**



Fuente: elaboración propia.

El beneficio económico de la investigación se estimó tomando como punto de partida la prueba a pequeña escala, por lo que se presenta una gráfica donde indica el porcentaje que represento cada componente de la prueba sobre el costo total o presupuesto.

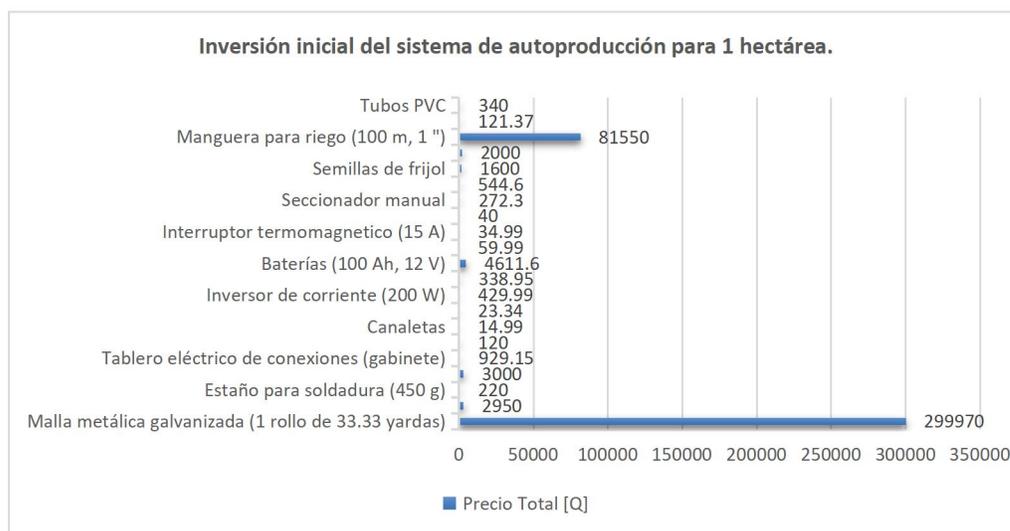
Figura 26. **Costos del sistema de la prueba a pequeña escala**



Fuente: elaboración propia.

Con base en los costos antes mencionados se proyectó la inversión inicial de un sistema de autoproducción de energía eléctrica para una hectárea cultivada de terreno con una célula de combustible vegetal microbiana por la fotosíntesis del frijol como fuente de energía e integrándolo con la carga alimentada, por este sistema, a continuación, se desglosan los componentes de la inversión.

Figura 27. **Inversión inicial proyectada para un sistema de autoproducción de 1 hectárea**



Fuente: elaboración propia.

Con el análisis financiero del flujo de caja realizado se determinó que la inversión necesaria para el sistema con un área cultivada de una hectárea es el siguiente.

Tabla XVII. **Inversión inicial por una hectárea del sistema de autoproducción**

Componentes de la inversión	Costo [Q]	Porcentaje (%)
Inversión inicial del sistema de riego	85096.35	21.32
Inversión del sistema autoproducción	314074.92	78.68
<b>TOTAL</b>	<b>399171.27</b>	<b>100.00</b>

Fuente: elaboración propia.

Generando un precio de instalación por hectárea del sistema autoproducción incluyendo el bombeo de 399,171.27 [Q/Ha], con un tiempo de retorno de inversión superior a 17 años. El valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR) para este sistema de una hectárea de superficie cultivada se estimó como a continuación se muestra.

Tabla XVIII. **VAN y TIR para el sistema de autoproducción en una hectárea de cultivo**

Años	TIR [ %]	VAN	Opción
20	4	Q6,831.53 (Tasa= 4 %)	Año inmediato superior al tiempo de retorno
30	8	Q330,007.33 (Tasa= 4 %)	Año límite del análisis

Fuente: elaboración propia.

El beneficio ambiental generado en esta investigación permitió identificar los factores ambientales afectados negativamente por la prueba a escala de laboratorio y las acciones de la prueba a escala que afectaron a esos factores ambientales, presentándose en la siguiente tabla en orden descendente (más afectado a menos afectado y más dañino a menos dañino).

**Tabla XIX. Factores ambientales y acciones perjudiciales de la prueba a escala de laboratorio**

Orden	Factores afectados	Acciones perjudiciales
1	Aguas subterráneas	Funcionamiento de electrodos
2	Cobertura vegetal	Colocación de electrodos
3	Suelo (contaminantes presentes)	Instalación eléctrica
4	Suelo (estructura)	Secado de granos
5	Agua (calidad)	Siembra de semillas

Fuente: elaboración propia.

En la investigación se estimó la cantidad en kilogramos del dióxido de carbono equivalente que se evitó durante la prueba a escala de laboratorio y la proyección de dicha cantidad para un sistema de autoproducción de energía eléctrica de una hectárea de superficie cultivada, estos datos se presentan a continuación.

**Tabla XX. Dióxido de carbono equivalente**

Proyecto	Cantidad de dióxido de carbono equivalente [kgCO <sub>2eq</sub> ]
Prueba a escala de laboratorio	11.4828 *10 <sup>-12</sup>
Sistema de autoproducción de 1 hectárea	0.3150 *10 <sup>-3</sup>

Fuente: elaboración propia.

## 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En los resultados obtenidos de potencia y energía eléctrica promedio para la prueba a escala de laboratorio resalta la diferencia entre el promedio y el máximo en donde este último es aproximadamente el triple del promedio para ambos casos, la dispersión de los datos a partir de la media para la potencia se determinó en 1.857 [ $\mu\text{W}$ ] y en la energía de 13.2840 [ $\mu\text{Wh}$ ], evidenciando que la producción de electricidad en la prueba fue afectada por factores del entorno (intensidad de radiación solar presente y el contenido de agua en el suelo) es respaldado por las observaciones realizadas durante la prueba.

La curva de producción de potencia eléctrica promedio diario mediante la regresión polinomial realizada permitió obtener un modelo matemático que establece la existencia de un máximo de producción de potencia, el cual se estimó en un valor de  $X = 12.2569$  horas, esto evidencia un comportamiento a esperar con un máximo de producción presente en sistemas de autoproducción de energía cercano al mediodía.

La curva de producción de energía eléctrica promedio semanal mediante la regresión polinomial realizada permitió obtener un modelo matemático que establece la existencia de un máximo de producción de energía promedio en los días que integran una semana, este se estimó en  $X = 3.3145$  día, lo que identifica un comportamiento de producción de energía a la semana con un máximo cercano al tercer día en los sistemas de autoproducción de energía.

El sistema de autoproducción de energía propuesto por medio del diagrama simplificado presenta una estructura similar al empleado por sistemas

aislados de energía solar fotovoltaica dado que la célula de combustible vegetal microbiana genera electricidad en corriente directa, esta estructura integra las partes de generación de energía, almacenamiento, conversión de energía (CD a CA), carga alimentada y las protecciones, las cuales son importantes en la instalación para evitar daños al sistema que deterioren los componentes y reduzcan su vida útil, dichos componentes podrán ser empleados en varias cosechas dado que su periodo de vida útil es mayor al periodo de cultivo.

Los costos de la prueba a pequeña escala arrojan un aspecto a resaltar dado que por el tamaño de la prueba de un metro cuadrado el mayor gasto se debió a la compra de contenedores para soportar las células de combustible vegetal microbiano esto represento el 51 %, lo cual presenta el escenario que al proyectarse un sistema de autoproducción de energía este componente no será implementado por el costo que implica y por la razón principal de utilizar directamente el suelo como soporte de las células debido a la extensión del cultivo permitiendo una mayor movilidad de microorganismos que podría beneficiar en la producción de energía.

Mediante la proyección realizada por los cálculos del dimensionamiento de un sistema de autoproducción se estimó los componentes necesarios para un cultivo de frijol de una hectárea, se tuvo en consideración dos aspectos clave de la inversión, la parte propia del sistema de autoproducción y el sistema de bombeo, representando el sistema de autoproducción el 78.7 % de la inversión y el sistema de bombeo el 21.3 %. Enfocándose en el sistema de autoproducción el componente de mayor gasto es la malla metálica galvanizada.

El análisis financiero para el sistema de autoproducción de una hectárea de cultivo indica que este requiere de un periodo superior a 17 años para presentar el retorno de la inversión que se aproxima a 400,000 [Q/hectárea]

presentando una TIR de 4 % la cual comparada con el 14 % que se manejaba para este proyecto y con el VAN obtenidos brinda una tendencia de una rentabilidad económica a largo plazo y que la instalación sea utilizada en muchos periodos de cultivo.

Los impactos ambientales negativos identificados en la prueba a escala de laboratorio brindan información importante, la cual indica que en el caso de los factores que resultan afectados por la prueba el agua es el principal afectado en el caso de aguas subterráneas y en menor cantidad su calidad seguidamente se presenta el suelo tanto en su estructura como en los contaminantes presentes, a esto también se relaciona la cobertura vegetal que es el segundo más afectado, se considera un impacto consistente con la prueba dado que el suelo forma parte de las componentes de una célula de combustible vegetal microbiana al ser el sustento para los electrodos, planta y microorganismos.

Las acciones que perjudican a estos factores antes mencionados para la prueba a escala de laboratorio se identifican que los más impactantes son los electrodos tanto en su colocación (instalación) como durante su funcionamiento, seguido de la instalación eléctrica lo que se relaciona directamente con el factor suelo dado que este sirve de soporte y de entorno de desarrollo de los electrodos necesitando de este para su correcto funcionamiento.

El dióxido de carbono equivalente requirió del factor de conversión del  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  del biogás dado que las células de combustible (P-MFC) no presentaron equivalencia directa, con esto se evidenció que para la prueba realizada a escala y la proyección de una hectárea presentan una proporción de  $27 \cdot 10^6$  veces la prueba a escala es la cantidad de la proyección de una hectárea, esto se relaciona a la cantidad de superficie cultivada que en el sistema de una hectárea es  $10 \cdot 10^3$  veces mayor que en la prueba de laboratorio.



## CONCLUSIONES

1. La célula de combustible vegetal microbiana por la fotosíntesis de la planta *Phaseolus vulgaris* produjo voltajes y corrientes en el orden de los milivoltios como también en miliamperios que generó una potencia y energía eléctrica promedio en una escala de microwatts y microwatts hora, con esto se obtuvieron curvas de producción promedio que evidenciaron máximos en la generación para el intervalo de análisis efectuado; conjuntamente se determinó que el proyecto es de largo plazo debido al tiempo de retorno de inversión obtenido.
2. La célula de combustible vegetal microbiana mediante la fotosíntesis de la planta *Phaseolus vulgaris* (frijol) de un metro cuadrado de superficie generó de acuerdo con el análisis estadístico realizado, una potencia eléctrica promedio de 2.3786 [ $\mu$ W], para el periodo analizado en la prueba se determinó una energía eléctrica promedio de 16.4044 [ $\mu$ Wh], estas variables se obtuvieron gracias a las mediciones efectuadas de voltaje y corriente en la prueba a escala de laboratorio.
3. La transición de la producción de electricidad a través de una célula de combustible vegetal microbiana por la fotosíntesis de la planta *Phaseolus vulgaris*, a una fuente para autoproducir electricidad se da al integrarse a esta célula en un sistema que abarca los componentes en etapas de generación, almacenamiento, transformación, protecciones y distribución a la carga alimentada requiriendo de su dimensionamiento mediante el proceso de cálculo y diagrama de conexiones entre los mismos presentado en el capítulo 3 de esta investigación.

4. Se cuantifico gracias al análisis financiero realizado para la generación de electricidad en un sistema autoprodutor por medio de la célula de combustible vegetal microbiana por la fotosíntesis de la planta *Phaseolus vulgaris*, una inversión correspondiente a Q 399,171.27 de la cual aproximadamente el 79 % corresponde a la parte eléctrica tomando como base esta inversión del porcentaje anterior se presenta un tiempo de retorno de inversión mayor a 17 años, presentando un valor actual neto Q 6,831.53 con un tasa interna de retorno del 4 % en 20 años.
  
5. Se identificó el beneficio ambiental de la generación de electricidad por la célula de combustible vegetal microbiana mediante el valor de kg de CO<sub>2eq</sub> no emitidos a la atmósfera al aplicar esta fuente siendo de 11.4828 \*10<sup>-12</sup> [kg CO<sub>2eq</sub> ] para la prueba a escala y 27\*10<sup>6</sup> veces el valor anterior para la proyección de una hectárea de cultivo; así mismo, la matriz de Leopold indicó que el factor mayormente impactado negativamente al implementar esta prueba de laboratorio es el agua (subterránea y calidad) seguidamente del suelo (estructura y contaminantes presentes), así también la acción más perjudicial es la relacionada a los electrodos (instalación y funcionamiento).

## RECOMENDACIONES

1. Realizar implementaciones de sistemas autoprodutores de energía mediante células de combustible (P-MFC) y sistemas a escala residencial para obtener suministro de alimentos y energía eléctrica, utilizando el proceso de dimensionamiento presentado como resultado de la investigación y el presupuesto generado en este estudio.
2. Aplicar células de combustible (P-MFC) por fotosíntesis de plantas en cultivos como el maíz y la caña de azúcar, tomando como guía de implementación esta investigación.
3. Para la modelación de las curvas de producción es pertinente considerar el efecto de las variables del entorno en específico la intensidad de radiación solar y la cantidad de agua presente en el suelo.
4. Controlar correctamente la cantidad de agua requerida por el cultivo durante su desarrollo al aplicarse en este una célula de combustible (P-MFC) para lograr optimizar la generación de electricidad.



## REFERENCIAS

1. Abarca, S., y Mora, B. (2007). Contaminación del agua. *Agua y ambiente*, 3(1), 137-139.
2. ASOPROL, P. r. (2009). *Guía técnica para el cultivo de frijol, en los municipios de Santa Lucia, Teustepe y San Lorenzo del departamento de Boaco, Nicaragua*. Santa Lucia, Boaco: Instituto Interamericano de cooperación para la agricultura OEA.
3. Bombelli, P., Rajaraman, D., Covshoff, S., McCormick, A., Yunus, K., Hibberd, J., Howe, C. (2012). Comparación de la salida (producción) de potencia por el arroz (*Oryza sativa*) y una maleza asociada (*Echinochloa glabrescens*) en sistemas bio-fotovoltaicos de plantas vasculares (VP-BPV). *Springer-Verlag, bioenergía y biocombustibles*. doi:10.1007/s00253-012-4473-6
4. Boylestad, R. (2004). *Introducción al análisis de circuitos* (10ª edición). México: Pearson Educación.
5. Cabrera, C., y Reyes, C. (2008). *Guía técnica para el manejo de variedades de frijol*. CENTA, Ministerio de Agricultura y Ganadería.
6. Comisión Nacional de Energía Eléctrica, C. (2014). Norma Técnica de Generación Distribuida Renovable y Usuarios Autoprodutores con Excedentes de Energía (NTGDR). *Resolución CNEE-227-2014*. Guatemala.

7. De la Fuente, E., y Suárez, S. (2008). Problemas ambientales asociados a la actividad humana: la agricultura. *Ecología Austral* (18), 239-252.
8. Deng, H., Chen, Z., y Zhao, F. (2012). Energía de plantas y microorganismos: progreso en las células de combustible vegetal microbianas. *Chemsuschem* (5), 1006-1011. doi:10.1002/cssc.201100257
9. Dirección General de Energía, D. (2018). *Balance energético 2017*. Guatemala: Ministerio de Energía y minas.
10. Hernández, S. (2009). *Costos y rentabilidad de unidades agrícolas (producción de frijol)*. (Tesis de Licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de [http://biblioteca.usac.edu.gt/EPS/03/03\\_0717\\_v15.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/EPS/03/03_0717_v15.pdf)
11. MAGA, D. d. (2016). *El agro en cifras 2016*. MAGA.
12. MAGA, D. d. (2017). *Informe Situación del Frijol*. MAGA
13. Maqueda, M., Carbonell, M., Martínez, E., y Flórez, M. (2005). Fuentes de emisión de gases de efecto invernadero en la agricultura. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, II* (2), 14-148.
14. Martín, M., Martínez-Granero, F., y Rivilla, R. (s.f.). *Colonización de la rizosfera por pseudomonas*. Madrid: Departamento de Biología, Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid.

15. Mercados eléctricos (2012). *Costos solar-fotovoltaico. Evolución de los costos ERNC*. Recuperado de [http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno12/costosernc/C.\\_Foto.html](http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno12/costosernc/C._Foto.html)
16. Nitorisavut, R., y Regmi, R. (2017). Células de combustible vegetal microbianas: un prometedor biosistema de ingeniería. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (76), 81-89. doi: 10.1016/j.rser.2017.03.064
17. Ocampo, N. (2014). *Fotosíntesis*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
18. Pérez-Urria, E. (2009). Fotosíntesis: Aspectos básicos. *Reduca (Biología)*. *Serie Fisiología Vegetal*, 2(3), 1-47.
19. Sistema Mesoamericano de alerta temprana para la seguridad alimentaria, M.-M. (s.f.). *Manual de campo para la identificación de las etapas de desarrollo del frijol en Guatemala y su equivalencia con las fases fenológicas del sistema de monitoreo de cultivos (SMC)*.
20. Ternium. (s.f.). *Manual de Contenido del participante Instrumentos de medición eléctrica*. Ternium.
21. Verd, J. (2000). Recursos para las CTMA: La matriz de Leopold, un instrumento para analizar noticias de prensa de temática ambiental. *Enseñanzas de las ciencias de la tierra*, 239-243.

22. Villatoro, J., Castillo, F., y Franco, J. (2011). *Producción de frijol, Phaseolus vulgaris L.* Guatemala: ICTA-FAO.
23. Young, H., y Freedman, R. (2013). *Física universitaria con física moderna* (Décimo tercera ed., Vol. 2). México: Pearson.

## APÉNDICES

A continuación, se presentan las tablas de datos obtenidos de las mediciones realizadas durante la prueba a escala de laboratorio y los datos calculados operacionales.

### Apéndice 1. Datos obtenidos de las mediciones y calculados operacionales

Fecha	Hora	Voltaje [mV]	Corriente [mA]	Potencia [ $\mu$ W]	Fecha	Hora	Voltaje [mV]	Corriente [mA]	Potencia [ $\mu$ W]
8/8/2019	6:30:00	3.6	0.004	0.0144	22/8/2019	11:00:00	54.9	0.052	2.8548
8/8/2019	7:00:00	2.7	0.004	0.0108	22/8/2019	11:30:00	54.5	0.052	2.834
8/8/2019	8:00:00	2.4	0.003	0.0072	22/8/2019	12:30:00	53.3	0.05	2.665
8/8/2019	8:30:00	2.7	0.003	0.0081	22/8/2019	13:00:00	52.7	0.05	2.635
8/8/2019	9:00:00	1.9	0.002	0.0038	22/8/2019	14:30:00	53.5	0.05	2.675
8/8/2019	9:30:00	2.1	0.003	0.0063	22/8/2019	15:00:00	57.9	0.054	3.1266
8/8/2019	10:00:00	3.1	0.004	0.0124	22/8/2019	15:30:00	62.3	0.058	3.6134
8/8/2019	10:30:00	2.5	0.003	0.0075	22/8/2019	16:00:00	64	0.059	3.776
8/8/2019	11:00:00	3.2	0.004	0.0128	23/8/2019	7:00:00	59.7	0.056	3.3432
8/8/2019	11:30:00	3.9	0.005	0.0195	23/8/2019	7:30:00	60.6	0.057	3.4542
8/8/2019	12:00:00	4.4	0.005	0.022	23/8/2019	8:00:00	62.2	0.058	3.6076
8/8/2019	12:30:00	4.1	0.005	0.0205	23/8/2019	8:30:00	62.6	0.058	3.6308
8/8/2019	13:00:00	3.5	0.005	0.0175	23/8/2019	9:00:00	61.8	0.058	3.5844
8/8/2019	13:30:00	3.4	0.004	0.0136	23/8/2019	9:30:00	61.6	0.057	3.5112
8/8/2019	14:00:00	3.2	0.004	0.0128	23/8/2019	10:00:00	61	0.057	3.477
8/8/2019	14:30:00	3.1	0.003	0.0093	23/8/2019	10:30:00	62.1	0.058	3.6018
8/8/2019	15:00:00	3.8	0.004	0.0152	23/8/2019	11:30:00	61.6	0.058	3.5728
8/8/2019	15:30:00	6.2	0.008	0.0496	23/8/2019	12:30:00	61.2	0.057	3.4884
8/8/2019	16:00:00	11.3	0.013	0.1469	23/8/2019	13:00:00	57.5	0.054	3.105
9/8/2019	6:30:00	14.2	0.016	0.2272	23/8/2019	14:30:00	59.7	0.056	3.3432
9/8/2019	7:00:00	14	0.015	0.21	23/8/2019	15:30:00	59.7	0.056	3.3432

Continuación del apéndice 1.

9/8/2019	7:30:00	13.7	0.015	0.2055	23/8/2019	16:00:00	62.5	0.059	3.6875
9/8/2019	8:00:00	13.8	0.015	0.207	24/8/2019	10:00:00	73.7	0.068	5.0116
9/8/2019	8:30:00	13.1	0.014	0.1834	24/8/2019	11:00:00	72.4	0.069	4.9956
9/8/2019	9:00:00	13	0.015	0.195	24/8/2019	12:00:00	72.4	0.069	4.9956
9/8/2019	9:30:00	12.7	0.013	0.1651	26/8/2019	7:30:00	51.3	0.05	2.565
9/8/2019	10:00:00	12.5	0.013	0.1625	26/8/2019	8:00:00	50.6	0.048	2.4288
9/8/2019	11:00:00	13.4	0.014	0.1876	26/8/2019	9:00:00	50.5	0.049	2.4745
9/8/2019	11:30:00	13.7	0.014	0.1918	26/8/2019	9:30:00	50.2	0.047	2.3594
9/8/2019	12:00:00	12.8	0.012	0.1536	26/8/2019	10:00:00	51.4	0.048	2.4672
9/8/2019	12:30:00	11.2	0.011	0.1232	26/8/2019	10:30:00	51.2	0.049	2.5088
9/8/2019	13:00:00	19.2	0.02	0.384	26/8/2019	11:00:00	51.2	0.05	2.56
9/8/2019	13:30:00	22.5	0.023	0.5175	26/8/2019	15:00:00	49	0.045	2.205
9/8/2019	14:00:00	24.2	0.024	0.5808	26/8/2019	15:30:00	53.4	0.05	2.67
9/8/2019	14:30:00	23.5	0.024	0.564	26/8/2019	16:00:00	56	0.053	2.968
9/8/2019	15:00:00	23.7	0.024	0.5688	27/8/2019	7:00:00	54.2	0.051	2.7642
9/8/2019	15:30:00	22.5	0.022	0.495	27/8/2019	7:30:00	55.8	0.052	2.9016
9/8/2019	16:00:00	22.6	0.023	0.5198	27/8/2019	8:30:00	53.9	0.052	2.8028
10/8/2019	7:00:00	25.8	0.027	0.6966	27/8/2019	9:00:00	55	0.052	2.86
10/8/2019	7:30:00	26	0.026	0.676	27/8/2019	9:30:00	54.2	0.051	2.7642
10/8/2019	8:00:00	25.8	0.028	0.7224	27/8/2019	10:00:00	54.3	0.052	2.8236
10/8/2019	8:30:00	24.9	0.025	0.6225	27/8/2019	10:30:00	55.6	0.052	2.8912
10/8/2019	9:00:00	25.2	0.025	0.63	27/8/2019	11:00:00	55.7	0.052	2.8964
10/8/2019	13:00:00	26.2	0.026	0.6812	27/8/2019	16:00:00	51	0.048	2.448
12/8/2019	12:30:00	49.8	0.048	2.3904	28/8/2019	7:00:00	49.5	0.047	2.3265
12/8/2019	13:00:00	49.2	0.05	2.46	28/8/2019	7:30:00	49.1	0.046	2.2586
12/8/2019	14:00:00	50.3	0.05	2.515	28/8/2019	8:00:00	48.7	0.049	2.3863
12/8/2019	14:30:00	49.1	0.047	2.3077	28/8/2019	9:00:00	51.1	0.048	2.4528
12/8/2019	15:00:00	48.8	0.047	2.2936	28/8/2019	9:30:00	51.1	0.048	2.4528
12/8/2019	16:00:00	47.1	0.045	2.1195	28/8/2019	10:00:00	50.4	0.048	2.4192
13/8/2019	6:30:00	56.2	0.055	3.091	28/8/2019	14:00:00	61.7	0.058	3.5786
13/8/2019	7:00:00	55.7	0.053	2.9521	28/8/2019	15:00:00	61.4	0.058	3.5612
13/8/2019	8:00:00	55.1	0.053	2.9203	29/8/2019	7:00:00	46.9	0.045	2.1105
13/8/2019	8:30:00	54.6	0.052	2.8392	29/8/2019	7:30:00	46.3	0.042	1.9446
13/8/2019	9:00:00	54.3	0.051	2.7693	29/8/2019	8:30:00	45.2	0.042	1.8984

Continuación del apéndice 1.

13/8/2019	9:30:00	64.7	0.061	3.9467	29/8/2019	9:00:00	45	0.043	1.935
13/8/2019	10:00:00	68.5	0.065	4.4525	29/8/2019	9:30:00	42.9	0.041	1.7589
13/8/2019	10:30:00	69.5	0.067	4.6565	29/8/2019	10:00:00	43.1	0.041	1.7671
13/8/2019	11:00:00	69.6	0.066	4.5936	29/8/2019	14:00:00	39.4	0.037	1.4578
13/8/2019	11:30:00	69.5	0.068	4.726	29/8/2019	14:30:00	48.4	0.045	2.178
13/8/2019	12:00:00	68.6	0.065	4.459	30/8/2019	8:00:00	48.9	0.046	2.2494
13/8/2019	12:30:00	67	0.063	4.221	30/8/2019	9:00:00	46.6	0.043	2.0038
13/8/2019	13:00:00	65.3	0.063	4.1139	30/8/2019	9:30:00	47.1	0.044	2.0724
13/8/2019	14:00:00	62.6	0.061	3.8186	30/8/2019	10:00:00	47.7	0.045	2.1465
13/8/2019	14:30:00	62.5	0.059	3.6875	30/8/2019	11:00:00	46.6	0.044	2.0504
13/8/2019	15:00:00	60.9	0.057	3.4713	30/8/2019	14:30:00	83.2	0.078	6.4896
13/8/2019	16:00:00	53.5	0.051	2.7285	30/8/2019	15:00:00	82.6	0.077	6.3602
14/8/2019	7:00:00	54.9	0.053	2.9097	30/8/2019	15:30:00	85.7	0.08	6.856
14/8/2019	7:30:00	55.7	0.055	3.0635	30/8/2019	16:30:00	88.8	0.084	7.4592
14/8/2019	8:00:00	55.2	0.054	2.9808	31/8/2019	7:30:00	81.8	0.076	6.2168
14/8/2019	8:30:00	53.9	0.051	2.7489	31/8/2019	9:00:00	84.9	0.078	6.6222
14/8/2019	9:00:00	54.2	0.051	2.7642	31/8/2019	9:30:00	84	0.078	6.552
14/8/2019	9:30:00	54.4	0.051	2.7744	2/9/2019	7:00:00	94.4	0.087	8.2128
14/8/2019	10:00:00	53.9	0.051	2.7489	2/9/2019	7:30:00	94.1	0.087	8.1867
14/8/2019	10:30:00	53.6	0.05	2.68	2/9/2019	8:30:00	90.6	0.085	7.701
14/8/2019	11:00:00	53.4	0.051	2.7234	2/9/2019	9:00:00	90	0.084	7.56
14/8/2019	11:30:00	53.2	0.05	2.66	2/9/2019	9:30:00	91.6	0.085	7.786
14/8/2019	12:00:00	52.5	0.049	2.5725	2/9/2019	10:00:00	92.5	0.085	7.8625
14/8/2019	12:30:00	67	0.064	4.288	3/9/2019	8:00:00	68	0.064	4.352
14/8/2019	13:30:00	73.6	0.068	5.0048	3/9/2019	9:00:00	66.6	0.062	4.1292
14/8/2019	14:30:00	73	0.068	4.964	3/9/2019	9:30:00	66.1	0.062	4.0982
14/8/2019	15:30:00	72.8	0.069	5.0232	3/9/2019	10:00:00	64.7	0.06	3.882
15/8/2019	7:00:00	58.7	0.056	3.2872	3/9/2019	10:30:00	64.1	0.059	3.7819
15/8/2019	7:30:00	58.7	0.056	3.2872	3/9/2019	11:00:00	63	0.059	3.717
15/8/2019	8:00:00	58.8	0.055	3.234	3/9/2019	11:30:00	63	0.058	3.654
15/8/2019	8:30:00	58.4	0.055	3.212	3/9/2019	12:00:00	70.7	0.066	4.6662
15/8/2019	9:00:00	58.5	0.054	3.159	3/9/2019	12:30:00	72.9	0.068	4.9572
15/8/2019	9:30:00	58.8	0.056	3.2928	3/9/2019	13:00:00	74.8	0.069	5.1612
15/8/2019	10:30:00	58.1	0.054	3.1374	3/9/2019	14:30:00	75.7	0.07	5.299

Continuación del apéndice 1.

15/8/2019	11:30:00	57.3	0.054	3.0942	3/9/2019	15:00:00	77.1	0.072	5.5512
15/8/2019	12:00:00	55.5	0.052	2.886	4/9/2019	7:30:00	71.8	0.066	4.7388
15/8/2019	12:30:00	54.2	0.051	2.7642	4/9/2019	8:30:00	71.4	0.066	4.7124
15/8/2019	13:00:00	52.4	0.055	2.882	4/9/2019	9:00:00	72.2	0.067	4.8374
15/8/2019	14:00:00	51.4	0.048	2.4672	4/9/2019	9:30:00	70.2	0.065	4.563
15/8/2019	14:30:00	52.7	0.05	2.635	4/9/2019	10:00:00	68.3	0.064	4.3712
15/8/2019	16:00:00	53.8	0.052	2.7976	4/9/2019	10:30:00	68.5	0.064	4.384
15/8/2019	16:30:00	53.6	0.051	2.7336	4/9/2019	11:00:00	67.8	0.063	4.2714
15/8/2019	17:00:00	53.8	0.051	2.7438	4/9/2019	15:00:00	66	0.061	4.026
15/8/2019	17:30:00	53.6	0.051	2.7336	4/9/2019	15:30:00	68.7	0.064	4.3968
15/8/2019	18:00:00	53.7	0.051	2.7387	4/9/2019	16:00:00	68.7	0.063	4.3281
15/8/2019	18:30:00	54.4	0.052	2.8288	5/9/2019	7:30:00	84.6	0.078	6.5988
15/8/2019	19:00:00	54.8	0.052	2.8496	5/9/2019	9:00:00	80.8	0.074	5.9792
15/8/2019	19:30:00	55.1	0.053	2.9203	5/9/2019	9:30:00	81.8	0.075	6.135
15/8/2019	20:00:00	54.9	0.052	2.8548	5/9/2019	15:00:00	77	0.072	5.544
16/8/2019	7:00:00	52	0.049	2.548	6/9/2019	8:00:00	74.7	0.069	5.1543
16/8/2019	7:30:00	51.5	0.049	2.5235	6/9/2019	9:00:00	73.2	0.068	4.9776
16/8/2019	8:30:00	51.5	0.049	2.5235	6/9/2019	10:30:00	67.9	0.063	4.2777
16/8/2019	9:00:00	51.6	0.049	2.5284	8/9/2019	9:00:00	21.2	0.021	0.4452
18/8/2019	8:30:00	43.7	0.042	1.8354	8/9/2019	20:00:00	19.7	0.018	0.3546
18/8/2019	9:00:00	43.3	0.042	1.8186	8/9/2019	20:30:00	19.6	0.019	0.3724
18/8/2019	9:30:00	43.3	0.041	1.7753	8/9/2019	21:00:00	19.8	0.019	0.3762
18/8/2019	11:00:00	43.3	0.041	1.7753	9/9/2019	8:00:00	8.4	0.008	0.0672
18/8/2019	16:00:00	41.8	0.041	1.7138	9/9/2019	10:00:00	5.1	0.005	0.0255
18/8/2019	16:30:00	42.2	0.04	1.688	10/9/2019	7:30:00	16.7	0.015	0.2505
18/8/2019	17:00:00	40.9	0.039	1.5951	10/9/2019	8:30:00	19.4	0.018	0.3492
18/8/2019	17:30:00	41.4	0.04	1.656	11/9/2019	7:00:00	26.6	0.024	0.6384
18/8/2019	18:00:00	41	0.039	1.599	11/9/2019	8:30:00	24.8	0.022	0.5456
18/8/2019	18:30:00	41.7	0.04	1.668	11/9/2019	10:00:00	24.2	0.022	0.5324
18/8/2019	19:00:00	41.4	0.039	1.6146	11/9/2019	11:00:00	25.5	0.023	0.5865
18/8/2019	19:30:00	41.2	0.04	1.648	11/9/2019	12:30:00	31.6	0.028	0.8848
19/8/2019	7:30:00	38.5	0.037	1.4245	11/9/2019	13:00:00	28.4	0.025	0.71
19/8/2019	8:30:00	39.8	0.038	1.5124	11/9/2019	14:30:00	19.6	0.018	0.3528
19/8/2019	9:00:00	42	0.04	1.68	11/9/2019	15:00:00	19.9	0.018	0.3582

Continuación del apéndice 1.

19/8/2019	9:30:00	43.2	0.041	1.7712	11/9/2019	15:30:00	18.2	0.017	0.3094
19/8/2019	10:00:00	43.9	0.042	1.8438	12/9/2019	7:00:00	7.6	0.007	0.0532
19/8/2019	10:30:00	43.6	0.042	1.8312	12/9/2019	7:30:00	6.3	0.006	0.0378
19/8/2019	11:00:00	43.3	0.041	1.7753	12/9/2019	8:30:00	8.8	0.008	0.0704
20/8/2019	10:30:00	46	0.044	2.024	12/9/2019	9:00:00	8.7	0.008	0.0696
20/8/2019	11:00:00	45.9	0.043	1.9737	12/9/2019	9:30:00	7.4	0.007	0.0518
20/8/2019	11:30:00	45.9	0.044	2.0196	12/9/2019	10:00:00	10.2	0.009	0.0918
20/8/2019	14:00:00	41.6	0.039	1.6224	12/9/2019	11:00:00	9.8	0.008	0.0784
20/8/2019	14:30:00	42.2	0.04	1.688	12/9/2019	11:30:00	10.5	0.009	0.0945
20/8/2019	15:00:00	43	0.041	1.763	12/9/2019	12:00:00	9.2	0.007	0.0644
20/8/2019	15:30:00	42.8	0.04	1.712	12/9/2019	12:30:00	9.5	0.009	0.0855
20/8/2019	16:00:00	43.4	0.041	1.7794	12/9/2019	13:00:00	9.8	0.008	0.0784
20/8/2019	16:30:00	44.3	0.042	1.8606	12/9/2019	14:00:00	11.8	0.01	0.118
20/8/2019	17:00:00	44.8	0.043	1.9264	12/9/2019	14:30:00	9.7	0.008	0.0776
20/8/2019	17:30:00	45.4	0.043	1.9522	12/9/2019	15:00:00	8.2	0.007	0.0574
20/8/2019	18:00:00	45.1	0.042	1.8942	12/9/2019	15:30:00	7.4	0.006	0.0444
20/8/2019	18:30:00	44.5	0.042	1.869	13/9/2019	8:00:00	7.9	0.007	0.0553
21/8/2019	7:00:00	43.2	0.042	1.8144	13/9/2019	9:00:00	6.8	0.005	0.034
21/8/2019	8:00:00	43.8	0.042	1.8396	13/9/2019	9:30:00	7.4	0.006	0.0444
21/8/2019	8:30:00	45.2	0.043	1.9436	13/9/2019	10:00:00	7.4	0.006	0.0444
21/8/2019	9:00:00	45.8	0.043	1.9694	13/9/2019	10:30:00	6.7	0.005	0.0335
21/8/2019	10:30:00	45	0.044	1.98	13/9/2019	11:00:00	7.4	0.006	0.0444
22/8/2019	7:00:00	54.9	0.053	2.9097	13/9/2019	11:30:00	8.9	0.008	0.0712
22/8/2019	7:30:00	54.5	0.051	2.7795	13/9/2019	12:00:00	9.5	0.008	0.076
22/8/2019	8:30:00	54.7	0.052	2.8444	13/9/2019	12:30:00	10.4	0.01	0.104
22/8/2019	9:00:00	54.8	0.052	2.8496	13/9/2019	13:00:00	11.9	0.01	0.119
22/8/2019	9:30:00	55.4	0.053	2.9362	13/9/2019	14:30:00	7.5	0.006	0.045
22/8/2019	10:00:00	55.5	0.053	2.9415	13/9/2019	15:00:00	6.4	0.005	0.032
22/8/2019	10:30:00	55.3	0.053	2.9309	13/9/2019	15:30:00	5.4	0.004	0.0216

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Potencia y energía eléctrica promedio por día**

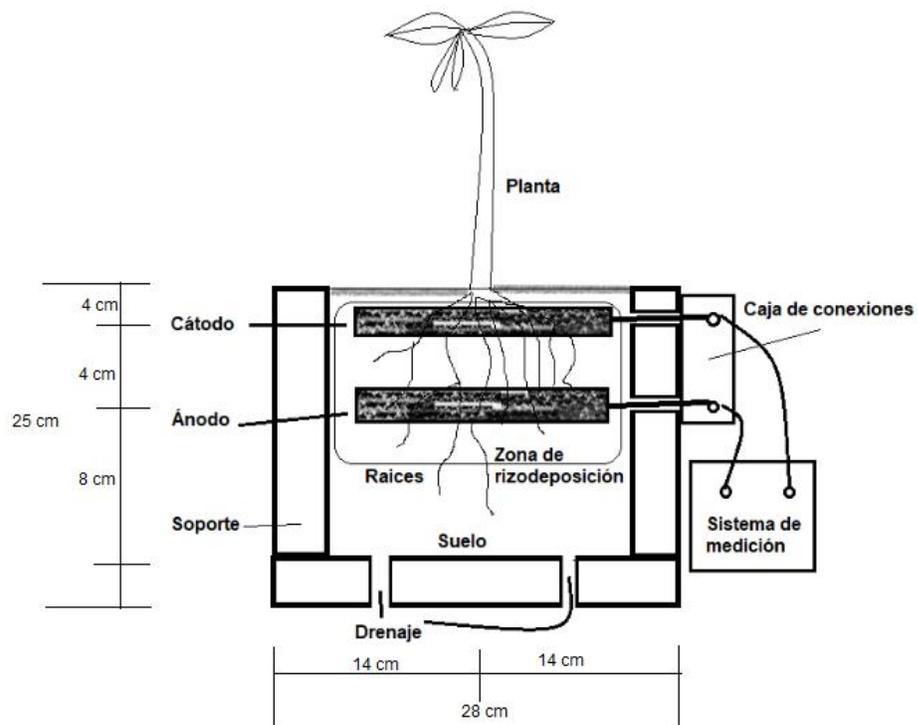
Día	Potencia promedio día [ $\mu$ W]	Energía promedio día [ $\mu$ Wh]
8/8/2019	0.0216	0.2051
9/8/2019	0.3075	2.9209
10/8/2019	0.6715	4.0287
12/8/2019	2.3477	8.2170
13/8/2019	3.7322	35.4557
14/8/2019	3.3271	28.2802
15/8/2019	2.9336	35.2031
16/8/2019	2.5309	5.0617
18/8/2019	1.6989	18.6882
19/8/2019	1.6912	5.9192
20/8/2019	1.8527	14.8212
21/8/2019	1.9094	6.6829
22/8/2019	2.9581	26.6230
23/8/2019	3.4822	31.3395
24/8/2019	5.0009	10.0019
26/8/2019	2.5207	21.4257
27/8/2019	2.7947	25.1520
28/8/2019	2.6795	21.4360
29/8/2019	1.8813	14.1097
30/8/2019	4.1875	35.5938
31/8/2019	6.4637	12.9273
2/9/2019	7.8848	23.6545
3/9/2019	4.4374	31.0620
4/9/2019	4.4629	37.9347
5/9/2019	6.0643	45.4819
6/9/2019	4.8032	12.0080

Continuación del apéndice 2.

8/9/2019	0.3871	4.6452
9/9/2019	0.0464	0.0927
10/9/2019	0.2999	0.2999
11/9/2019	0.5465	4.6449
12/9/2019	0.0715	0.6081
13/9/2019	0.0558	0.4182

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 3. Representación gráfica de la célula de combustible vegetal microbiana implementada en la prueba a escala



Fuente: elaboración propia.