



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN DE METANO PARA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA EN UNA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA  
UBICADA EN GUATEMALA**

**Manuel Eduardo Zetina Zetina**

Asesorado por el Ing. Estuardo Edmundo Monroy Benítez

Guatemala, julio de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN DE METANO PARA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA EN UNA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA  
UBICADA EN GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**MANUEL EDUARDO ZETINA ZETINA**

ASESORADO POR EL ING. ESTUARDO EDMUNDO MONROY BENÍTEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, JULIO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Ing. 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. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Dra. Casta Petrona Zeceña Zeceña
SECRETARIA	Ing. Marcia Ivonne Véliz Vargas

## **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:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN DE METANO PARA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA EN UNA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA  
UBICADA EN GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 31 de mayo del 2022.

**Manuel Eduardo Zetina Zetina**



**EEPFI-PP-0667-2022**

Guatemala, 6 de mayo de 2022

**Director**  
**Williams G. Álvarez Mejía**  
Escuela De Ingenieria Quimica  
Presente.

**Estimado Ing. Álvarez**

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN SISTEMA DE CAPTACION DE METANO PARA GENERACIÓN DE ENERGIA EN UNA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA UBICADA EN GUATEMALA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Gerencia Estratégica - Planeación de proyectos**, presentado por el estudiante **Manuel Eduardo Zetina Zetina** carné número **200212550**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Gestion Industrial.

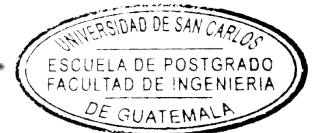
Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*



Mtro. Estuardo Edmundo Monroy Benitez  
Asesor(a)



Mtro. Kenneth Lubeck Corado Esquivel  
Coordinador(a) de Maestría



Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería



EEP.EIQ.0667.2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Quimica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN SISTEMA DE CAPTACION DE METANO PARA GENERACIÓN DE ENERGIA EN UNA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA UBICADA EN GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Manuel Eduardo Zetina Zetina**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Williams G. Álvarez Mejía; Mg.I.Q., M.U.I.E.  
Director  
Escuela De Ingenieria Quimica

Guatemala, mayo de 2022

LNG.DECANATO.OI.481.2022

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 Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN DE METANO PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN UNA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA UBICADA EN GUATEMALA**, presentado por: **Manuel Eduardo Zetina Zetina**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, julio de 2022

AACE/gaoc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por permitirme realizar una más de mis metas y todas las bendiciones en mi vida.
<b>Mis padres</b>	María Lissette Zetina y Edgar Rene Zetina, por darme su apoyo, paciencia y amor incondicional para hacer realidad este sueño.
<b>Mi esposa</b>	Clarita Ramírez de Zetina por la paciencia, amor y acompañamiento en el logro de una meta más en mi vida.
<b>Mis hijos</b>	Augusto Sebastián, Manuel Emilio y Matías André Zetina por ser una inspiración en mi vida.
<b>Mis hermanas</b>	Andrea Leonor y Laura María Zetina, por su apoyo y cariño durante mi vida.
<b>Mi abuela</b>	Ana Méndez de Zetina por sus cuidados, amor incondicional, enseñanzas y consejos durante toda mi vida.
<b>Mi tío</b>	Ramon Augusto Zetina por exhortarme a cumplir mis metas.



**Cuñados**

Gerson Ochaeta y Sergio Garcia por su apoyo en el logro de esta meta.

**Familia y amigos**

Por acompañarme durante el proceso, apoyo y compañía en el logro de esta meta.

## AGRADECIMIENTOS A:

<b>Dios</b>	Por la vida y ser una constante guía en mi camino.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser el alma <i>mater</i> que me permitió adquirir conocimientos profesionales.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por facilitarme los conocimientos técnicos y teóricos que me permitieron realizar este trabajo de graduación.
<b>Mi amigo</b>	Lic. Oswaldo Morales por el gran apoyo y enseñanzas en el trabajo de Investigación.
<b>Mi asesor</b>	Ing. Estuardo Monroy Benítez, por guía y enseñanzas durante el trabajo de Investigación.
<b>Familia</b>	Por acompañamiento en el proceso y estar siempre para mí.
<b>NaturAceites</b>	Por permitirme realizar el trabajo de investigación en sus instalaciones.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	9
3.1. Contexto general .....	9
3.2. Descripción del problema .....	10
3.3. Formulación del problema .....	11
3.3.1. Pregunta central .....	11
3.3.2. Preguntas auxiliares .....	11
3.4. Delimitación del problema .....	12
4. JUSTIFICACIÓN .....	13
5. OBJETIVOS .....	15
5.1. General.....	15
5.2. Específicos .....	15
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	17
6.1. Etapas de la investigación .....	17

7.	MARCO TEÓRICO .....	19
7.1.	Proceso de extracción de aceite de palma.....	19
7.2.	Generación de efluentes en proceso de extracción .....	20
7.3.	Caracterización de efluente de planta.....	22
7.4.	Digestión Anaerobia (origen del metano) .....	23
7.5.	Condiciones óptimas para digestión anaerobia.....	26
7.5.1.	Relación Carbono / nitrógeno en sustrato. ....	26
7.5.2.	Contenido de sólidos.....	26
7.5.3.	Temperatura.....	27
7.5.4.	Tiempo de retención hidráulico (TRH) y Carga orgánica volumétrica .....	29
7.5.5.	pH y Alcalinidad.....	32
7.5.6.	Nutrientes .....	33
7.5.7.	Agitación.....	33
7.5.8.	Tóxicos .....	34
7.6.	Caracterización del biogás y su composición.....	34
7.7.	Captación de biogás (biodigestores).....	36
7.8.	Filtración del biogás. (Eliminación de H <sub>2</sub> S) .....	39
7.9.	Remoción de vapor de agua .....	40
7.10.	Aprovechamiento de biogás.....	40
7.11.	Descripción de la empresa.....	42
7.12.	Conjugación de elementos técnicos para el diseño. ....	44
7.13.	Análisis financiero .....	45
7.13.1.	Valor actual neto (VAN).....	45
7.13.2.	Tasa interna de retorno (TIR).....	46
7.13.3.	Índice beneficio / costo.....	47
7.13.4.	Periodo de recuperación .....	48
7.14.	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).....	49

8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO.....	51
9.	METODOLOGÍA.....	55
9.1.	Enfoque .....	55
9.2.	Diseño .....	55
9.3.	Tipo de estudio .....	55
9.4.	Alcance.....	56
9.5.	Variables e indicadores .....	56
9.6.	Fases.....	58
9.7.	Resultados esperados .....	59
9.8.	Unidad de análisis .....	60
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	61
11.	CRONOGRAMA.....	63
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	65
13.	REFERENCIAS.....	67
14.	APÉNDICES.....	71



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Esquema de solución .....	18
2.	Proceso Extracción de Aceite .....	20
3.	Caracterización de efluentes de plantas extractoras en Colombia.....	23
4.	Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica .....	25
5.	Tasa de crecimiento relativo de microorganismos psicrófilicos, mesófilicos y termófilicos. ....	28
6.	Rangos de temperatura y tiempo de fermentación Anaeróbica .....	28
7.	Producción de biogás en función de la temperatura .....	29
8.	Tiempo de retención hidráulico en distintas regiones .....	30
9.	Características generales del biogás .....	34
10.	Características de biogás y comparación con otros gases. ....	35
11.	Composición de biogás en diferentes aplicaciones.....	36
12.	Esquema de sistema de lagunas .....	43
13.	Cronograma de actividades .....	63

### TABLAS

I.	Características de Efluente .....	43
II.	Operacionalización de variables .....	56
III.	Presupuesto .....	66





## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>G</b>	Gramos
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>kw</b>	Kilo Watts
<b>kWh</b>	Kilovatios hora
<b>Psi</b>	Libras por pulgada cuadrada
<b>L</b>	Litro
<b>m<sup>3</sup></b>	Metros cúbicos
<b>mg</b>	Miligramos
<b>ml</b>	Mililitro
<b>ppm</b>	Parte por millón
<b>%</b>	Porcentaje
<b>Q</b>	Quetzales
<b>T</b>	Temperatura
<b>TM</b>	Toneladas métricas



## GLOSARIO

<b>Biogás</b>	Tipo de gas generado a partir de la descomposición de desechos orgánicos. Su principal componente es el metano, que tiene regularmente concentraciones del 45 al 70 % dependiendo del tipo de desecho orgánico.
<b>Bióxido de carbono</b>	Es gas incoloro e inodoro, soluble en agua, Su composición química está formada por un átomo de carbono y 2 átomos de oxígeno (CO <sub>2</sub> ). Es el segundo componente en importancia en el biogás.
<b>Clarificación</b>	Es el proceso donde se obtiene el aceite que contiene el RFF, acá se genera la mayor cantidad de efluentes.
<b>DBO</b>	Demanda biológica de oxígeno, es el parámetro más utilizado para determinar el contenido de materia orgánica en una muestra líquida, se expresa en miligramos de oxígeno por litro (mg/L).
<b>DQO</b>	Demanda química de oxígeno, es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos, que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida. Es un parámetro que se utiliza para medir el grado de contaminación

del agua, se expresa en miligramos de oxígeno por litro (mg/L).

**Efluente** Es el flujo de agua residual que proviene de la planta de extracción, contiene una carga orgánica alta.

**GEI** Gases de efecto invernadero, son gases que atrapan el calor en la atmósfera. Los principales gases son vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y el ozono.

**GREPALMA** Gremial de palmicultores de Guatemala.

**Laguna anaeróbica** Es la laguna principal del sistema de tratamiento, su funcionamiento es primordialmente anaeróbico; en cuanto a capacidad de almacenamiento es la mayor de las lagunas. En esta laguna se alcanza hasta el 90 % de remoción de la carga orgánica.

**Materia Orgánica** Es aquella materia que está compuesta por átomos de carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O) en su mayoría. Está conformada por compuestos orgánicos que provienen de los restos de organismos vivos, tales como plantas, animales y sus productos de residuo en el ambiente natural.

**Metano** Es un gas combustible, y se forma por la acción de las bacterias metanogénicas que se encuentran en los biodigestores. Su composición química está formada

por un átomo de carbono y 4 átomos de hidrógeno (CH<sub>4</sub>). Es el componente más importante del biogás.

**Oxígeno**

Es un gas que puede o no estar presente en la generación del biogás, dependiendo esto de las condiciones anaeróbicas del sistema de producción del biogás.

**pH**

Potencial de hidrógeno. Es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución acuosa. El pH indica la concentración de iones de hidrógeno presentes en determinadas disoluciones.

**POME**

Siglas en inglés de *Palm Oil Mill Effluent*, efluente proveniente de la planta de extracción de aceite de palma africana.

**Residual industrial**

Aguas residuales industriales son las que proceden de cualquier actividad industrial en cuyo proceso de producción, transformación o manipulación se utilice el agua. En este caso del proceso de Aceite de palma.

**RFF**

Racimo de fruta fresca, es el nombre con el cual se denomina al fruto de la palma africana que ingresa a la planta extractora para su proceso.

**Vertido**

Es la salida de residuos líquidos fuera de la tubería, este caso es el efluente que ingresa a sistema.



# 1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo es un proceso sistematizado de investigación, el cual llevará al establecimiento de un diseño de captación de metano para la producción de biogás, permitirá a la industria productora de aceite de palma, reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero y costos de operación.

El calentamiento global y los requerimientos bajo estándares y reglamentaciones están orientando las actividades económicas, principalmente las industriales, en lo relacionado a las emisiones dentro de sus procesos productivos.

La industria de la extracción de aceite de palma, mediante el uso de equipos y maquinaria, dentro de su proceso utiliza agua y vapor de agua para obtener el aceite, según experiencias en la operación de planta extractora ha dado como resultado que se producen entre 0.8 – 1.2 metros cúbicos de aguas residuales industriales por Tonelada de fruta, las cuales requieren un proceso de tratamiento, esto se realiza mediante la instalación de un sistema de lagunas, las cuales, reducen los niveles de contaminantes de las aguas residuales, mediante la degradación orgánica.

Dentro de ese sistema de tratamiento, existe una fase denominada laguna metanogénicas, como su nombre lo dice, es donde se libera el metano directamente al ambiente.

Según lo establecido en los objetivos de desarrollo sostenible de las naciones unidas, es necesario realizar una reducción en los gases de efecto

invernadero (GEI), uno de ellos es el metano, mismo que dentro de los procesos de tratamiento de aguas residuales industriales, es producido.

Chaparro, Ramírez, Núñez, Cammaert, y Rincón (2021), manifiestan que el metano dentro del proceso de tratamiento en las lagunas se puede aprovechar mediante herramientas y equipos que lo capten, una vez captado, este se puede utilizar para la producción de biogás, con el cual se puede producir energía eléctrica, utilizable para la operación de los equipos y maquinaria.

El reto es diseñar un sistema de captación efectivo, para el aprovechamiento del metano y por consiguiente producir biogás, utilizable como combustible para la operación de maquinaria y equipos, a su vez el diseño, reducirá costos y la emisión de gases de efecto invernadero al ambiente.

Con el diseño no solo se beneficiará a la industria de procesamiento de aceite de palma; sino también, mejoras en la calidad de aire y el ambiente a la población cercana a las plantas de tratamiento; así mismo, se desarrollará un análisis económico que permitirá demostrar que el uso de biogás como combustible, es mucho más rentable que utilizar energías tradicionales.

En el informe final de la propuesta del diseño de investigación se desarrollará los cinco capítulos, siendo estos:

- Antecedentes, mediante fuentes de información secundaria se expondrán las experiencias que se han tenido con este tipo de diseños y su importancia.



- Marco teórico, se establecerá el esquema a resolver, mediante la identificación del problema, el contexto, las interrogantes a resolver, las necesidades a cubrir y la posible solución.
- Desarrollo de la investigación, durante ese proceso se realizarán análisis, diagnósticos, recolección de información lo cual llevará a un diseño eficiente para solución de problema planteado.
- Presentación de resultados, como resultado, se presentará y describirá el diseño para la captación y conversión del metano en biogás.
- Discusión de los resultados, expondrá el diseño propuesto, los beneficios sociales y económicos a obtener con él.



## 2. ANTECEDENTES

Para realizar la investigación y poder proponer un diseño de captación de metano, se consultó los siguientes antecedentes.

Dzulkiflee (2019), expone que en las plantas extractoras de aceite de palma se generan efluentes llamados POME (*Palm Oil Mills Effluents*, por sus siglas en inglés), y existen oportunidades para convertir estos subproductos de desecho en fuentes de ingreso. Lo descrito anteriormente en la industria de aceite de palma en Guatemala, presenta una oportunidad de obtener energías alternativas y reducir costos. *Felda Palm Industries*, ha explorado en el campo de biogás a base de POME para generar electricidad desde el año 2004, con la conversión a su uso en vehículos y biogás líquido, es por ello, que desde entonces ha emprendido la construcción de plantas de biogás con fines energéticos, llegando hoy en día a producir Bio-CNG a base de biogás y ya cuenta con su primera planta comercial en Colombia. (p. 129)

Con esta información se podrá tomar en cuenta las variables a ser consideradas, para el análisis financiero al momento de utilizar el biogás como fuente eléctrica; así mismo, demuestra que el biogás se puede utilizar como fuente energética alternativa comercialmente.

Contreras y Herazo (2020), afirma, las cambiantes condiciones climáticas que se han producido, debido al desmedido uso de los recursos no renovables, aproximan cada vez más al uso de energías limpias. Todos los procesos de la extracción de aceite generan subproductos ricos en materia orgánica, sin embargo, antes de ser vertidos, por ser efluentes líquidos necesitan tratamientos,

en el cual generan principalmente metano y dióxido de carbono, siendo estos los componentes principales del biogás. Además, estos gases son perjudiciales a la atmósfera, por lo que el vertimiento de efluentes sin tratamiento se convierte en un problema medioambiental.

Por otra parte, la ubicación de estas plantas es en zonas rurales donde son propensas a continuos fallos en el abastecimiento de electricidad. El biogás producido con estas fuentes, a través de motor de generación, se usan para suplir las necesidades energéticas, como combustible. Dando así solución a las necesidades de electricidad y a su vez haciendo más eficiente el tratamiento de los efluentes. Con esto se manifiesta que realizar un diseño para la captación del metano para producir biogás, se considera una buena práctica en Latinoamérica.

Carvajal, Mena, Ruiz, Peláez, y Vásquez (2019), exponen que el aumento de la producción ha convertido el POME en un problema ambiental importante en Colombia, debido a que presenta altos niveles de contaminación, pues es depositado en lagunas de tratamiento, que requieren grandes extensiones de tierra y largos tiempos de degradación en contacto directo con la atmósfera, generando dióxido de carbono y metano, los cuales representan una gran parte de los gases de efecto invernadero. La metodología utilizada por ellos fue basada en los lineamientos del *Standard Methods*, los cuales realizan un proceso en un reactor de flujos ascendentes continuos, de segunda generación acoplado a un reactor secundario, que cumple la función de finalizar la degradación de la materia orgánica. Esto da como resultado los procesos de digestión anaerobia, dan a residuos como el POME un valor energético agregado, y así contribuyen a la valorización de residuos orgánicos y revierten el impacto ambiental, que muchos causan tras su disposición final al reducir su carga orgánica. (p. 51)

Siendo esta otra practica experimental, de cómo captar el metano para la producción de biogás, reforzando que es una práctica factible económica y ambientalmente viable.

Ramírez, Munar, García, Mosquera, y Faaij (2021), exponen que para minimizar el uso del suelo e incrementar el rendimiento del cultivo de palma se puede utilizar la biomasa resultante, siempre y cuando sea de origen biológico, esto reducirá las emisiones de gases de efecto invernadero hasta en un 55 %. Dependiendo del proceso a seguir, el cual deberá incluir una evaluación económica y el ciclo de vida mostrará un potencial de mejora. Una cadena de producción optimizada se evidenciará si los costos y los gastos se reducen en un 20 %. Con esta exposición se refuerza la importancia de eficientar los procesos de tratamiento en las plantas extractoras de aceite, lo cual conducirá a una reducción de costos y un menor impacto ambiental.

Loh, Nasrin, Azri, Adela, Muzzammil, Jay, y Kaltschmitt (2017), exponen que la captación de biogás es una fuente de energía renovable, de probada eficacia que puede contribuir al aumento de fuentes energéticas del país y al desarrollo sostenible. Lo que implica que, mediante las experiencias y esfuerzos en malasia, la captura y utilización de biogás como fuente renovable, permite una alianza para la generación eléctrica. En gran medida uno de los enfoques a largo plazo, que mejoran continuamente el rendimiento medioambiental de la industria de la palma aceitera, para garantizar el acceso continuo al mercado de los países, que imponen requisitos de sostenibilidad más estrictos para el aceite de palma.

Todo lo anterior refuerza la necesidad de establecer un diseño eficiente, que permita el aprovechamiento del metano en la producción de biogás, como un recurso para cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible mundial.



### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **3.1. Contexto general**

Uno de los principales problemas en el proceso productivo de la extracción de aceite crudo de palma aceitera son las aguas residuales, regularmente este tratamiento se realiza en un sistema tipo lagunas sin recubrimiento alguno, por lo que generan emisiones de gases de efecto invernadero a la atmosfera.

En el ámbito de producción de aceite de palma, los países como Malasia e Indonesia han realizado investigaciones e innovaciones tecnológicas para reducir emisiones. También se han tropicalizado herramientas y tecnologías de otras industrias, para eficientar procesos de degradación y reducción de emisiones.

Según GREPALMA (2019), Guatemala en la actualidad cuenta con 20 plantas extractoras de aceite de palma, las cuales durante los últimos 20 años con sus operaciones han generado gases de efecto invernadero, y ahora deben adaptarse y cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible, reduciendo emisiones de gases de efecto invernadero, aprovechando con tecnologías renovables, que al ser utilizadas pueden generar alternativas productivas.

De esta cuenta, las lagunas de tratamiento de aguas industriales son productoras mayormente de metano, sin aprovechamiento alguno, con las nuevas tendencias, este puede ser aprovechado para generación de energía con el mismo, mediante el diseño de sistemas de captación y transformación.

Al implementar el sistema de captación, colateralmente se mejoran el proceso de funcionamiento de las lagunas evitando la generación de malos olores, favoreciendo la calidad del aire y la calidad del agua, esta última puede ser utilizada para otros fines, como en la agricultura para obtener mejores resultados.

### **3.2. Descripción del problema**

En la actualidad la extractora de aceite de palma ubicada en Fray Bartolomé de las Casas procesa aproximadamente 400,000 toneladas de fruta fresca al año, transformando entre el 22 al 25 % en aceite crudo de palma. Este proceso genera aproximadamente 0.80 a 1.2 metros cúbicos de aguas residuales por tonelada de fruta, lo que se traduce en 320,000 metros cúbicos anuales.

Estas aguas reciben un tratamiento en un sistema tipo lagunas, las cuales están divididas en etapas de tratamiento, siendo una de ellas, las denominadas lagunas anaeróbicas.

Carrillo (2003), afirma, “La principal función de las lagunas anaeróbicas es la transformación química de las aguas residuales, por medio de metanogénesis, en este proceso se libera el metano de forma directa a través de evaporación” (p. 1), generando malos olores y liberación al ambiente de gases de efecto invernadero.

En este momento no se puede cuantificar la cantidad de metano emitida al ambiente por las lagunas anaeróbicas, por lo que es un dato que será necesario determinar durante el proceso de la investigación.



El metano como tal, se puede utilizar como materia prima para producción de biogás, con el cual se obtiene un combustible, como fuente de energía renovable, que en este momento no se aprovecha. Y con el cual se podría generar energía eléctrica para la operación de equipos en planta.

Para la producción de biogás, se requiere de un diseño de captación de metano, que demuestre una reducción de las emisiones y mejorar los costos de operación.

### **3.3. Formulación del problema**

A continuación, en los incisos 3.3.1. y 3.3.2. se describen las preguntas necesarias para la elaboración de este diseño de investigación.

#### **3.3.1. Pregunta central**

¿Qué requerimientos debe llenar el diseño del sistema para la producción de biogás en las lagunas de tratamiento de aguas industriales?

#### **3.3.2. Preguntas auxiliares**

- ¿Cómo se realizará una evaluación del sistema actual de tratamiento de aguas residuales industriales?
- ¿Cómo será la propuesta del diseño de captación de biogás en el sistema de tratamiento de aguas residuales industriales existente?
- ¿Cuáles pueden ser los beneficios y usos del biogás que se producirá?

- ¿Cuál es el valor económico de la implementación del sistema en el ahorro energético, versus otras fuentes energéticas?

### **3.4. Delimitación del problema**

El Trabajo de investigación se realizará en el diseño de captación de biogás en las lagunas metanogénicas, de una planta extractora de aceite de palma, ubicada en el departamento de Alta Verapaz, Guatemala.

El periodo de ejecución de la investigación será del mes de mayo a diciembre del 2022.

Para la realización de la investigación se cuenta con los recursos necesarios, técnicos y económicos para realizar la investigación durante el periodo mencionado.

La investigación será realizada, en etapa documental y de campo en una la planta extractora descrita con anterioridad, por lo que se cuenta con la autorización y permisos correspondientes de la gerencia industrial de dicha empresa.

## 4. JUSTIFICACIÓN

La línea de investigación con la que se relaciona el presente diseño de investigación es la Planeación de Proyectos dentro de la Gestión Estratégica de la Maestría de Gestión Industrial de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

En los tratamientos de aguas industriales de las plantas extractoras de aceite de palma, comúnmente se desaprovecha la producción de metano en las lagunas metanogénicas.

En la coyuntura actual del cambio climático surge la necesidad que toda la industria, en sus operaciones reduzca la producción de emisiones de gases de efecto invernadero, para cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas, el metano, es uno de esos gases, sin embargo, su emisión es factible manejarla y convertirla en materia prima para la producción de energía eléctrica.

El beneficio principal del diseño propuesto es la producción de energía eléctrica, energía que dará operatividad a los equipos que usan electricidad como fuente para la producción de aceite de palma, utilizando la captación del metano como materia prima y transformándolo en biogás, como fuente generadora sostenible. Este beneficio al ser de forma continua permitirá que el metano siga siendo aprovechado como una fuente inagotable, mientras la planta extractora este en operación.

El diseño, además de la producción de biogás, eficientizará el tratamiento de aguas residuales industriales, lo cual reducirá las emisiones de gases de

efecto invernadero (especialmente el metano) y reducirá los costos en su mantenimiento.

El beneficiario será la industria de extracción de aceite de palma en Guatemala, brindando un diseño para hacer más eficientes sus procesos de transformación, una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero al ambiente, así mismo reducirán los malos olores perceptibles por las comunidades vecinas.

Al contribuir con los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas, en la reducción de emisiones, la industria de aceite de palma estaría, junto a los esfuerzos de la sociedad en general, detener los efectos del calentamiento global.

El desarrollo del diseño permitirá disminuir el uso de fuentes energéticas tradicionales costosas por fuentes energéticas renovables.

En la investigación de este trabajo aplican los cursos de Gestión Industrial y Evaluación de proyectos industriales, dando las herramientas para realizar la propuesta del diseño; así también, el curso de Finanzas Industriales y valoración económica de la industria, para poder evaluar la viabilidad financiera del proyecto.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. General**

Diseñar un sistema de captación de metano para la producción de biogás a utilizarse para la generación de energía.

### **5.2. Específicos**

1. Diagnosticar el sistema de lagunas de tratamiento de aguas residuales existente.
2. Desarrollar un diseño de captación de metano para producción de biogás en el sistema de tratamiento de aguas industriales.
3. Determinar los beneficios al utilizar el biogás como generador de energía.
4. Desarrollar un análisis financiero que permita establecer la viabilidad del sistema, así como sus impactos en el ahorro en otras fuentes energéticas.



## **6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN**

Con el desarrollo de un diseño para el aprovechamiento de metano como biogás, se facilitará que las empresas que tengan plantas extractoras y por consiguiente lagunas de tratamiento, optimicen la degradación orgánica y obtengan mejores y mayores beneficios ambientales y económicos.

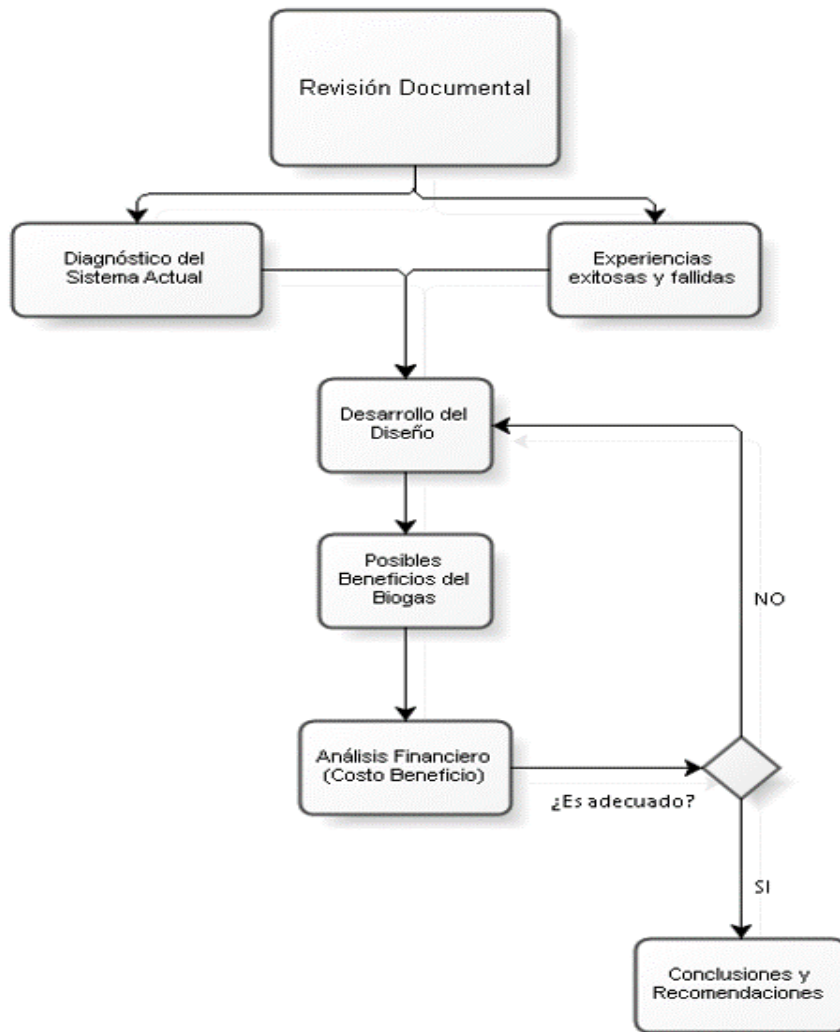
### **6.1. Etapas de la investigación**

- Primera etapa recolección de información: revisión de documentos relacionados al tema que proporcionen elementos para sustentar el diseño. Tiempo estimado 2 semanas.
- Segunda etapa diagnóstico del sistema actual: análisis del funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales industriales, que permitirá establecer los puntos de mejora y aprovechamiento. Tiempo estimado de 4 semanas.
- Tercera etapa desarrollo del diseño: desarrollar el proceso para el aprovechamiento del metano, mediante acciones que permitan la transformación en biogás. El proceso consistirá en la captación, conducción, filtración y remoción de vapor de agua. Esta etapa se desarrollará en 12 semanas.
- Cuarta etapa beneficios del biogás: se transformará en combustible para alimentación de los generadores de biogás, lo cual generará energía

eléctrica, útil para funcionamiento de nuevos proyectos en la planta extractora. Tiempo estimado de 6 semanas.

- Quinta etapa análisis financiero: se realizará un análisis de costo – beneficio, de la utilización de biogás para generar energía eléctrica en comparación con los sistemas tradicionales de generación, este análisis se realizará en 2 semanas.

Figura 1. **Esquema de solución**



Fuente: elaboración propia, realizado con BizAgi.



## **7. MARCO TEÓRICO**

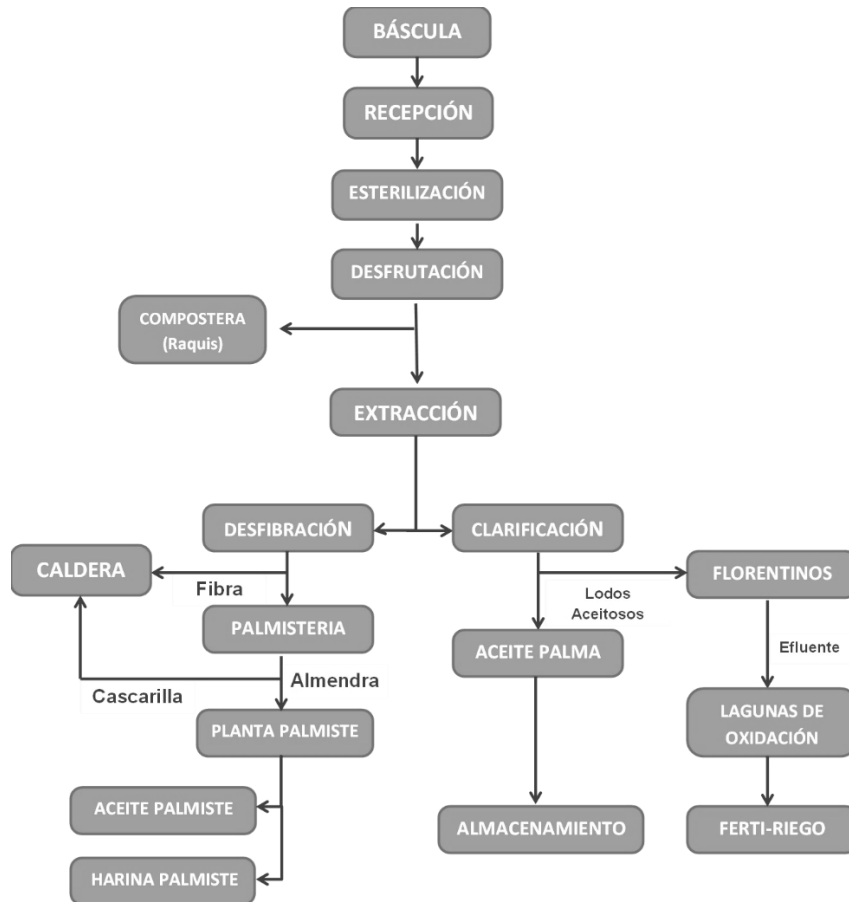
En esta sección se presentan las fuentes primarias y secundarias de literatura para realizar el diseño de la investigación propuesta.

### **7.1. Proceso de extracción de aceite de palma.**

García y Uribe (1997), afirma que el proceso de los racimos de fruta (RFF) de la palma se realiza en plantas extractoras que, mediante temperatura, presión y procesos mecánicos, se extrae el aceite contenido en el mesocarpio del fruto. Se puede considerar únicamente el agua como insumo para la producción, ya que este se utiliza para diluir, producir vapor y lavado.

El proceso de extracción de aceite se desarrolla de la siguiente forma:

Figura 2. **Proceso Extracción de Aceite**



Fuente: elaboración propia, realizado con Word.

## 7.2. **Generación de efluentes en proceso de extracción**

Rahayu, Karsiwulan, Yuwono, Trisnawati, Mulyasari, Rahardjo, Hokermin, y Paramita (2015), declara que el procesamiento de los racimos de fruta fresca (RFF) de las palmas para la producción de aceite, genera varios tipos de residuos. Los procesos de extracción, lavado y limpieza del aceite generan residuos líquidos que denominamos efluentes llamados POME (*Palm Oil Mills*

*Effluents*, por su sigla en inglés). El POME en el proceso de extracción de aceite, se producen principalmente:

- Esterilización de los racimos de fruta fresca
- Clarificación y condensados de vapor
- Prensado de raquis

Por cada tonelada de racimos de fruta fresca procesada, la extractora produce de 0.7 a 1 m<sup>3</sup> de POME; El POME fresco es un líquido caliente (temperatura de 60-80°C), ácido (pH de 3.3 – 4.6), espeso, color marrón, con altos valores de sólidos, aceite y grasa, DQO y Demanda biológica de oxígeno (DBO).

García y Uribe (1997), exponen que son cuatro los procesos más importantes que generan efluentes en una planta extractora.

- Esterilización: se realiza en dos o tres picos de presión de vapor que oscilan entre 20 y 45 psi. Este vapor es evacuado del esterilizador en parte como vapor a la atmósfera y en parte como un condensado, generando de esta forma el primer efluente que contiene aceite, sólidos en diferentes formas y materia orgánica, entre otros. Este efluente puede representar hasta el 10 % del peso de RFF y hasta el 15 % del total de los efluentes.
- Clarificación: los lodos aceitosos del clarificador primario se envían a unos tanques para recuperar algo del aceite que no se pudo recuperar. Estos son conducidos a una centrífuga desladora, en la cual se recupera otro poco de aceite. El efluente de las centrifugas desladora es llevado al sistema de tratamiento, convirtiéndose en la principal fuente de efluentes de la planta extractora.

- Hidrociclones: cuando en la separación de almendras y cáscaras se utilizan estos equipos se produce el tercer efluente de aguas residuales. Este tiene poca materia orgánica. Las nuevas tecnologías en el proceso de separación se realizan en seco, por lo tanto, este efluente no se genera.

Adicionalmente, un cuarto efluente sería el agua utilizada en el lavado y los drenajes de algunos equipos durante el proceso.

### **7.3. Caracterización de efluente de planta.**

El POME crudo es una suspensión viscosa y coloidal de color pardo espeso, que contiene un alto contenido de agua (95-96 %), sólidos en suspensión (2-4 %) y aceites (0.6-0.7 %). El POME existe como una sustancia ácida con olor característico, alto valor de DQO y DBO. Muchos investigadores informaron sobre la composición nutricional del POME, así como de los minerales y metales pesados. El análisis de Espectrómetros de fluorescencia de rayos X (*XRF*, por sus siglas en inglés) de POME, muestreado en Penang, Malasia, se obtuvo lo siguiente: C 51.0 %, O 35.3 %, Na 0.0632 %, Mg 1.09 %, Al 0.215 %, Si 0.552 %, P 0.429 %, S 0.553 %, Cl 2.75 %, K 6.77 %, Ca 1.09 %, Mn 0.0243 %, Fe 0.141 % y Rb 0.0286 %. La calidad del efluente producido se ve afectada por muchos factores, entre ellos el grado de maduración de la RFF, diferentes sistemas de tratamiento, así como lotes variados de RFF y sistema de extracción de aceite en fábricas. (Mohammad, Baiduran, Kobayashi, Ismail y Leh, 2021, p. 4)

García y Uribe (1997), presenta un promedio de caracterizaciones de los efluentes de varias plantas extractoras en Colombia.

Figura 3. **Caracterización de efluentes de plantas extractoras en Colombia**

PARÁMETRO	UNIDAD	RANGO	PROMEDIO
pH	unidad	3,87-5,25	4,55
Temperatura	°C	53 - 77	67,4
DBO	mg/ l	18.700 - 175.521	48.873
DQO	mg/ l	45.256 - 232.000	79.729,6
Sólidos Totales (ST)	mg/ l	32.482 - 111.029	45.669,8
Sólidos Suspendidos (SS)	mg/ l	19.129 - 88.258	35.105
Sólidos Disueltos	mh/ l	5.150 - 13.074	9.112
Sólidos Sedimentados (S.Sed)	ml/ hr	0 - 1.000	564,2
Sólidos Totales Volátiles (STV)	mg/ l	26.530 - 98.445	48.988
Fósforo Total (P - Total)	mg/ l	15,7 - 113.6	66,1
Nitrógeno Total (N- Total)	mg/ l	67.5 - 695	284,1
Nitrógeno Amoniacal	mg/ l	11 - 25,5	18,3
Grasas y Aceites	mg/ l	5.400 - 19.420	9.611
Acidez Total	mg/ l	750 - 2.548	1.611
Alcalinidad Total	mg/ l	0- 807,3	161,5

Fuente: García y Uribe. (1997). *Manejo de Efluentes de Plantas Extractoras*

Según la información anterior, los problemas más comunes de estos efluentes son el bajo pH, elevada temperatura, alta carga de sólidos totales y suspendidos, alta carga orgánica medida como Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), pero con la ventaja de que una alta fracción es biodegradable, ya que la relación DBO / DQO es de 0.61, la cual está por encima de 0.45 que es la mínima, Por lo tanto, esto justifica que el sistema de tratamiento de los efluentes sea del tipo biológico.

#### 7.4. Digestión Anaerobia (origen del metano)

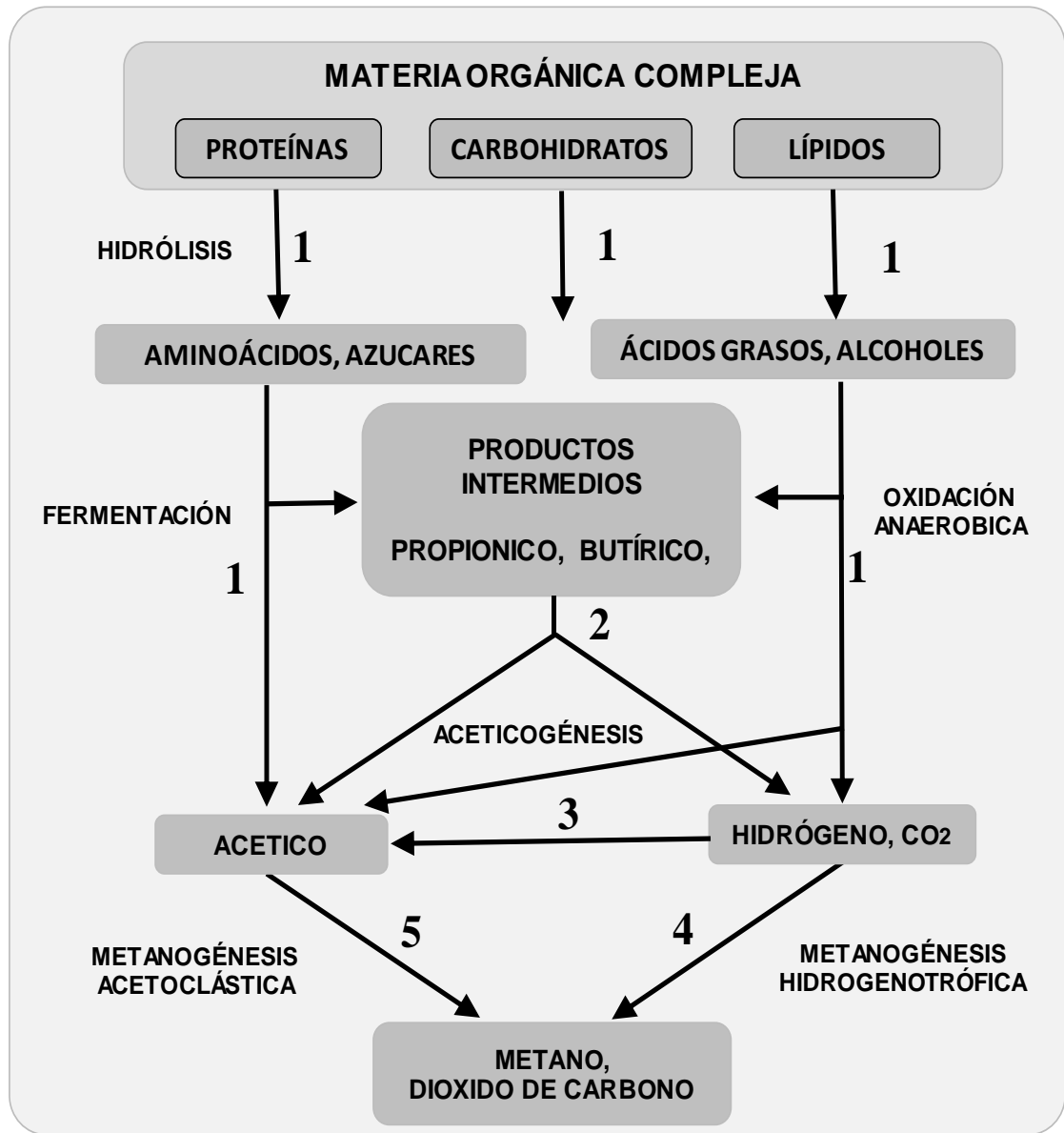
La degradación anaerobia es la fermentación bacteriana en ausencia de oxígeno que produce una composición de gases, en su mayoría metano y dióxido de carbono, llamado biogás y un lodo acuoso (biofertilizante) que tienen

compuestos de degradación lenta, así como, los minerales que se encuentran en la biomasa (Moncayo-Romero, 2005).

Varnero (2011), manifiesta que las investigaciones en bioquímica y microbiología se dividen en cuatro etapas el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica, siendo Hidrólisis, fermentativa o acidogénica, acetogénica y metanogénica.

La hidrólisis de carbohidratos, proteínas y lípidos, que se hidrolizan por enzimas elaboradas por las bacterias acidogénicas. Como efecto se producen componentes tales como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos de cadena larga, estos se metabolizarán por los microorganismos acidogénicos originando principalmente, ácidos grasos, hidrógeno, alcoholes, dióxido de carbono. Los ácidos grasos son convertidos en hidrógeno, ácido acético y dióxido de carbono, por la acción de los microorganismos acetogénicos. Para finalizar, las bacterias metanogénicas generan metano utilizando el hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético.

Figura 4. Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica



\*Los números indican la población bacteriana responsable del proceso: 1: bacterias fermentativas; 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3: bacterias homoacetogénicas; 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas.

Fuente: Pavlostathis y Giraldo-Gómez. (1991). *Kinetics of anaerobic treatment: A critical review.*

## **7.5. Condiciones óptimas para digestión anaerobia.**

Varnero (2011), expone que las bacterias metanogénicas, son altamente vulnerables a los cambios de las condiciones ambientales. Los investigadores examinan el funcionamiento de un sistema anaeróbico considerando la tasa de generación de metano, ya que la metanogénesis es un límite importante en el proceso. Por lo tanto, la degradación anaeróbica necesita monitorear de cerca las condiciones del ambiente. Siendo la temperatura, pH, nutrientes, tipo de sustrato, concentración de minerales, toxicidad.

### **7.5.1. Relación Carbono / Nitrógeno en sustrato.**

Varnero (2011), indica que toda la materia orgánica puede producir biogás durante la fermentación anaeróbica. El biogás generado dependerá del residuo utilizado, para determinar la cantidad y calidad de este. La cantidad de nutrientes debe ser mayor a la concentración idónea para las metano bacterias, ya que ellas se reprimen fuertemente al no tener suficientes nutrientes. Las fuentes primarias de comida de las bacterias metanogénicas son el nitrógeno y carbono. Este último conforma la fuente de energía, así el nitrógeno se usa para formar nuevas células. Estos microorganismos usan más carbono que nitrógeno, por lo que la proporción idónea en el sustrato se considera entre 30:1 hasta 20:1.

### **7.5.2. Contenido de sólidos**

Moncayo-Romero (2005), expone que, si la alimentación está muy diluida, las bacterias no tienen suficiente alimento para vivir; mientras que un exceso en sólidos disminuye la movilidad de las bacterias y, por lo tanto, la eficiencia de la degradación, ya que les impide acceder al alimento. Por norma general, el contenido en sólidos regularmente es inferior al 15 %.



### 7.5.3. Temperatura

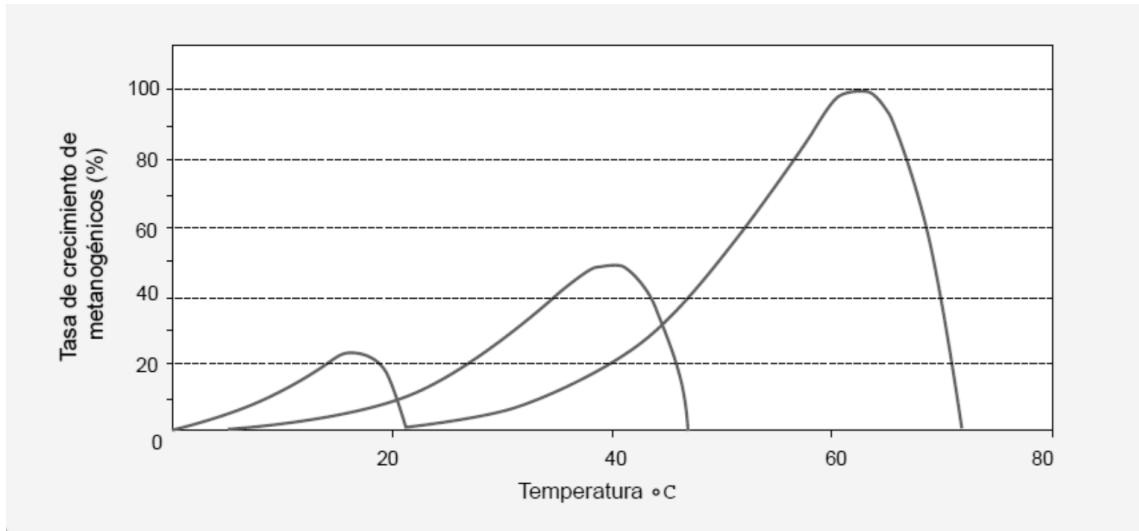
El principal parámetro de diseño es la temperatura de operación, en los biodigestores, ya que esta genera un amplio efecto en la velocidad de la digestión anaeróbica. Los cambios repentinos de temperatura en el biodigestor pueden causar inestabilidad en el proceso. Por lo tanto, para asegurar una temperatura uniforme en el biodigestor, es esencial un sistema de agitación adecuado y un regulador de temperatura (Varnero, 2011).

Moncayo-Romero (2005), expone que la digestión anaerobia puede tener darse en un gran rango de temperaturas, pero se distinguen unas zonas claramente diferenciadas, que corresponden a las temperaturas de funcionamiento óptimo de tres grupos diferentes de bacterias: las psicrófilas ( $T < 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), las mesófilas ( $20\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y las termófilas ( $50\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Como recomendación, es mejor trabajar en el rango mesófilo. La mayor velocidad de generación de metano y crecimiento de bacterias se tiene en rango de temperatura de 35-36  $^{\circ}\text{C}$ .

“Dentro de cada rango de temperatura, existe un intervalo para el cual dicho parámetro se hace máximo, determinando así la temperatura de trabajo óptima en cada uno de los rangos posibles de operación” (Varnero, 2011, p.38).

Demostrándose en las siguientes graficas.

Figura 5. **Tasa de crecimiento relativo de microorganismos psicrófilicos, mesófilicos y termófilicos.**



Fuente: Speece. (1996). *Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatments*.

Figura 6. **Rangos de temperatura y tiempo de fermentación Anaeróbica**

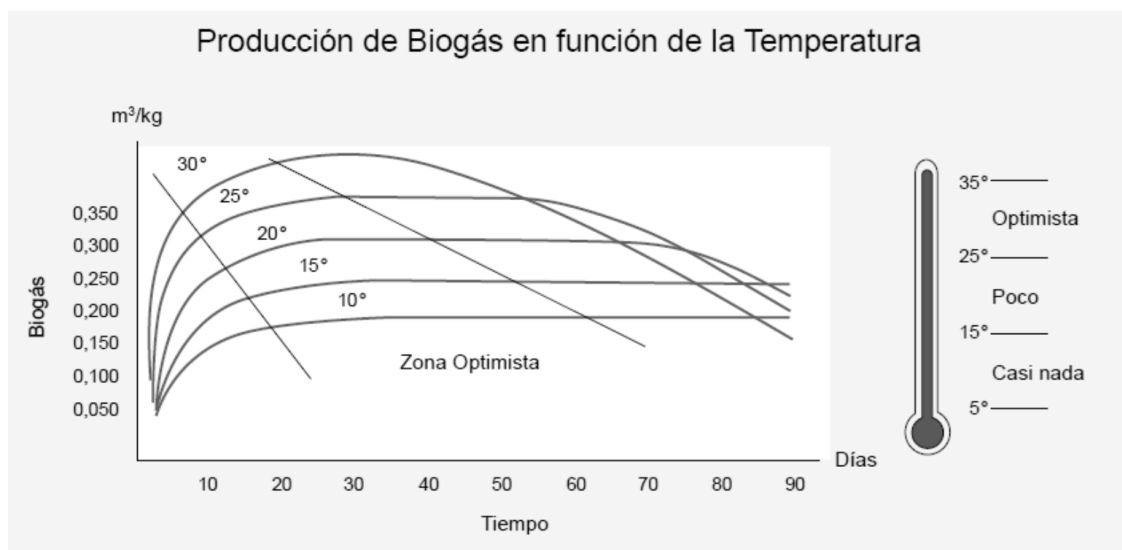
Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psychrophilica	4-10 °C	15-18 °C	20-25 °C	Sobre 100 días
Mesophilica	15-20 °C	25-35 °C	35-45 °C	30-60 días
Thermophilica	25-45 °C	50-60 °C	75-80 °C	10-15 días

Fuente : Lagrange. (1979). *Biomethane. Principes, Techniques, Utilisation*.

Rahayu *et al.* (2015), indica que los digestores deben mantener temperaturas superiores a los 20 °C. Las tasas de producción de metano se duplican aproximadamente por cada 10 °C de aumento de la temperatura en el rango mesófilo. Los parámetros físicos, como la viscosidad y la tensión

superficial, cambian con la temperatura. Las temperaturas termófilas dan lugar a una mejor transferencia de masa y a una mayor tasa de digestión que las condiciones mesófilas. Una temperatura estable consigue mejores resultados que las temperaturas fluctuantes (p.14).

Figura 7. **Producción de biogás en función de la temperatura**



Fuente: Varnero. (1991). *Manual de Reciclaje Orgánico y Biogás*.

#### 7.5.4. **Tiempo de retención hidráulico (TRH) y Carga orgánica volumétrica**

Este término se designa al volumen de sustrato orgánico cargado diariamente al digestor. Este valor tiene una relación de tipo inversa con el tiempo de retención, dado que a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de retención (Varnero, 2011, p.41).

Por lo tanto, el tiempo de retención, así como la velocidad de carga orgánica determinada por el tipo de materia prima, son los parámetros vitales de diseño que determinan el volumen del biodigestor. La materia orgánica o sólidos volátiles se refiere a la fracción de materia seca o sólidos totales, que se evaporan cuando se queman a una temperatura superior a 550 °C. De acuerdo con los requisitos operativos para un digestor anaeróbico, el contenido de materia seca no debe superar el 10 % de la combinación materia orgánica y agua en casi todas las aplicaciones.

La producción eficiente de biogás se indica mostrando el volumen de biogás por unidad de peso de Materia seca o Sólidos volátiles. La transformación de biogás requiere una gama muy amplia de concentraciones de Materia Seca, normalmente del 1 al 30 %. Las bacterias tardan un tiempo en descomponer la materia orgánica. La tasa de degradación está relacionada muy fuertemente con la temperatura; cuando más alta es la temperatura, disminuirá el tiempo de retención para tener una eficiente generación de biogás. Al tomarse como ejemplo de sustrato el estiércol de vacas, el TRH varía con la temperatura promedio de cada lugar, con variaciones estacionales diarias (Varnero, 2011).

Esto mismo se puede aplicar a cualquier tipo de residuo orgánico a degradar.

Figura 8. **Tiempo de retención hidráulico en distintas regiones**

Tiempo de retención hidráulico	Características
30 - 40 días	Clima tropical con regiones planas. Ej. Indonesia, Venezuela, América Central.
40 - 60 días	Regiones cálidas con inviernos fríos cortos. Ej. Indis, Filipinas, Etiopía.
60 - 90 días	Clima temperado con inviernos fríos. Ej. China, Corea, Turquía.

Fuente: Varnero. (1991). *Manual de Reciclaje Orgánico y Biogás*.

En un biodigestor que trabaja en modo estacionario o “discontinuo”, el TRH es el tiempo transcurrido entre la carga y descarga del sistema. En un sistema de alimentación diaria, el tiempo de retención determina el volumen de carga diario requerido para abastecer el biodigestor, ya que existe la siguiente formula:

$$\text{TRH (días)} = \frac{\text{Volumen diario (m}^3\text{/día)}}{\text{Volumen del digestor (m}^3\text{)}} \quad (\text{Ec. 1})$$

El volumen de biogás generado por un biodigestor dependerá de la alimentación diaria de residuos. Usualmente se operan con tiempos de retención alrededor 20 a 55 días y una carga diaria de 1 - 5 kg de DQO por m<sup>3</sup> de biodigestor. Por lo que se considera que, al tener menor tiempo de retención, menor será la dimensión del biodigestor (Varnero, 2011).

Elegir una temperatura más alta en la digestión reduce el tiempo de retención necesarios, lo que resultará en un reactor más pequeño para digerir un volumen dado de material. Un factor importante en determinar la relación óptima entre la temperatura y TRH, es el costo y beneficio, ya que varían el tamaño del digestor, tener mayores controles y aumento o disminución de eficiencia en generación de biogás (Varnero, 2011).

Con respecto al tipo de materia prima, los componentes con mayor porcentaje de carbono retenido en moléculas estables generalmente requieren TRH más largos para una digestión completa.

Los tiempos de residencia típicos para los lodos en el rango mesófilo son de 15 a 20 días, pero este valor varía mucho según el tipo de digestor utilizado.

La cantidad de materia orgánica vertida al día en el biodigestor por unidad de volumen se conoce como carga orgánica volumétrica (COV) y está directamente relacionado con la concentración del sustrato y el tiempo de retención establecido. Cuando no se tienen inhibidores, la alta carga orgánica proporciona una gran producción de biogás, pero también crece el riesgo de ciertas sobrecargas que conducen a la acidificación del biodigestor. (Varnero, 2011)

#### **7.5.5. pH y Alcalinidad**

Rahayu et al. (2015), manifiesta que todas las bacterias que participan en la fermentación anaeróbica tienen un rango de pH específico para el crecimiento idóneo. Para los acidógenos, el pH ideal se encuentra próximo a 6, mientras que para los acetógenos y metanógenos, el idóneo está cerca de 7.

Numerosos estudios confirman que un rango de pH de entre 6,5 y 7,5 da lugar a un buen rendimiento y estabilidad en los sistemas anaeróbicos, aunque puede darse un funcionamiento estable fuera de este rango. Los sistemas anaeróbicos deben tener una capacidad de amortiguación adecuada, para acomodar la producción de ácidos volátiles y dióxido de carbono.

Para evitar la acumulación de un exceso de ácidos volátiles, los operadores del sistema deben evitar que el pH se vuelva demasiado ácido.

Existen tres fuentes químicas importantes para aumentar la alcalinidad en el reactor y ayudan a amortiguar, siendo estas, la cal viva, bicarbonato de sodio e hidróxido de sodio. Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones de POME y sobre todo la tecnología de lagunas cubiertas, no requieren la dosificación de productos químicos para amortiguar el pH. El agua de salida del sistema

anaeróbico contiene una alcalinidad amortiguadora procedente del bicarbonato ( $\text{HCO}_3$ ), por lo tanto, la recirculación de esta agua hacia la entrada del POME crudo mantiene un pH neutro.

#### **7.5.6. Nutrientes**

Moncayo-Romero (2005), expresa que las células necesitan nutrientes para el crecimiento y la actividad microbológica. Deben estar disponibles en la materia prima que ingresa al reactor biológico como nitrógeno, azufre, carbono, fósforo y diferentes sales minerales. Poca cantidad de potasio, calcio, sodio, hierro o molibdeno, contribuyen a la descomposición de los sustratos y la conversión de metano. Una ventaja de un proceso anaeróbico frente a los procesos aeróbicos está en los nutrientes. Esto se debe a que, para el mismo nivel de degradación, los procesos anaeróbicos requieren aproximadamente la mitad de los nutrientes.

#### **7.5.7. Agitación**

Rahayu *et al.* (2015) expresa que la agitación ayuda a mantener uniforme el pH y las condiciones ambientales. Sin una mezcla adecuada, pueden desarrollarse microambientes desfavorables. La agitación distribuye los agentes amortiguadores por todo el digestor y evita la acumulación focalizada de altas concentraciones de productos metabólicos intermedios, que pueden inhibir la formación de metano. La mezcla se realiza habitualmente mediante agitadores mecánicos, Recirculación de líquidos por la entrada de POME a través de las tuberías de distribución, o la mezcla de gases mediante la recirculación de biogás. (p.15)

### 7.5.8. Tóxicos

Moncayo-Romero (2005) Afirma: “Aparte del oxígeno, inhiben la digestión concentraciones elevadas de amoníaco, sales minerales y algunas sustancias orgánicas como detergentes, antibióticos y pesticidas”. (p.5)

### 7.6. Caracterización del biogás y su composición.

Moncayo-Romero (2005) expone: “El producto principal de la digestión anaerobia es el biogás, mezcla gaseosa de metano (50 a 70 %) y dióxido de carbono (30 a 50%), con pequeñas proporciones de otros componentes (nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno)”. (p. 5) Esta composición está relacionada con el sustrato y el proceso de digestión.

“El biogás es un combustible natural, no fósil, de alto poder calorífico dependiente del contenido de gas metano (CH<sub>4</sub>)”. (Moncayo-Romero, 2017, p.1)

Figura 9. Características generales del biogás

Composición	55-70 % metano (CH <sub>4</sub> ) 30-45% dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0-6.5 kW h m <sup>-3</sup>
Equivalente de combustible	0.60-0.65 L petróleo/ m <sup>3</sup> biogás
Límite de explosión	6-12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650-750°C ( con el contenido CH <sub>4</sub> mencionado)
Presión crítica	74-88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad Normal	1.2 kg m <sup>-3</sup>
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kg kmol <sup>-1</sup>

Fuente: Deublein y Steinhauser. (2008). *Biogas from waste and renewable resources: An Introduction*.



En la figura siguiente se exponen las características más relevantes del biogás en relación con otros gases.

Figura 10. **Características de biogás y comparación con otros gases.**

Tipos de gas	Unidad	Biogás	Gas natural	Propano	Metano	Hidrogeno
Poder calorífico	Kwh/m3	6	10	26	10	3
Peso específico	Kg/m3	1,25	0,7	2,01	0,72	0,09
Relación a la densidad del aire		0,9	0,54	1,51	0,55	0,07
Temperatura de encendido	°C	700	650	470	600	585
Contenido de oxígeno para explosión	Vol.-%	6 - 12	4,4 - 15	1,7 - 10,9	4,4 - 16,5	4 - 7

Fuente: Moncayo-Romero. (2017). *Que es biogás*.

“El contenido de gas metano y dióxido de carbón que se produce de la materia orgánica depende del tipo de sustrato que se aprovecha en el biodigestor”. (Moncayo-Romero, 2017, p.3)

Figura 11. **Composición de biogás en diferentes aplicaciones**

Gas	Desechos Agrícolas	Lodos cloacales	Desechos industriales	Rellenos sanitarios	Características
Metano CH <sub>4</sub>	30-80%	40-80%	40-80%	45-65%	Inflamable inodoro
CO <sub>2</sub>	30-50%	30-50%	30-50%	30-55%	Forma ácido, inodoro, asfixiante
Vapor de agua	Saturación	Saturación	Saturación	Saturación	Corrosivo
H <sub>2</sub> S	100-3000 ppm	0-1000 ppm	0-5000 ppm	0-10000 ppm	Inflamable tóxico, fétido
Hidrógeno H <sub>2</sub>	0-2%	0-5%	0-2%	0-2%	Inflamable inodoro
Amoníaco NH <sub>3</sub>	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	Corrosivo irritante
Nitrógeno N <sub>2</sub>	0-15%	0-1%	0-1%	0-30%	Inerte, inodoro, asfixiante
Oxígeno O <sub>2</sub>	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%	Corrosivo
Orgánicos	Trazas	Trazas	0-5 ppm	10 ppm	Corrosivo, olores

Fuente: Moncayo-Romero. (2017). *Que es biogás*.

Althausen (2016), indica que en durante la fermentación anaeróbica del POME los microorganismos liberan una mezcla de gases (principalmente, 60 % de metano y 35 % de dióxido de carbono) con un potencial energético de 6 kWh por m<sup>3</sup>. El biogás se puede recolectar y utilizar como combustible en la generación de energía. Cada metro cúbico de POME puede producir 25 - 35 m<sup>3</sup> de biogás (según el DQO del POME) o 150 a 210 kilovatios hora de energía. Esto da hincapié a el aprovechamiento del biogás.

### 7.7. **Captación de biogás (biodigestores)**

Se llama biodigestores a los depósitos en los que tiene lugar la digestión anaerobia aprovechando el recurso de Biomasa. Se pueden explicar cómo recipientes que permiten la carga de sustratos o materia prima y la descarga de

biofertilizante, contando con un sistema de recolección de biogás para su posterior tratamiento y aprovechamiento. (Moncayo-Romero, 2005)

Rahayu et al. (2015), expone que se pueden elegir entre varias tecnologías de digestión anaeróbica de residuos líquidos. Cada diseño tiene como principal función asegurar un largo unión entre el sustrato y las bacterias, así, evitarse que los microorganismos salgan del sistema. A continuación, se presentan varios diseños de la tecnología usada en la digestión anaeróbica:

- Tanque reactor de agitación continua: son cilindros de hormigón o metálicos con una baja relación altura-diámetro. Pueden funcionar a temperaturas mesófilas o termófilas, con mezcla mecánica, hidráulica o por inyección de gas.
- Lagunas cubiertas: las lagunas anaeróbicas son esencialmente estanques cubiertos equipados con mecanismos de mezcla. Este diseño normalmente maneja un contenido de sólidos inferior al 2 %, y opera en el rango de temperatura mesofílica.
- Filtros anaeróbicos: los filtros anaeróbicos utilizan materiales "portadores", a menudo de plástico, a los que se adhieren los microorganismos activos para evitar su lavado fuera del sistema. Los filtros anaeróbicos pueden producir biogás de muy alta calidad, con un contenido de metano de hasta el 85 %.
- Lechos fluidizados y expandidos: en los lechos fluidizados y expandidos, los microorganismos se adhieren a pequeñas partículas. El sistema crea un fuerte flujo ascendente que suspende las partículas, poniendo en contacto a los microorganismos con el sustrato.

- Los reactores de manta de lodos anaeróbicos de flujo ascendente (UASB, *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*): permiten que los microorganismos crezcan en agregados. Por ello, los microorganismos permanecen en el reactor a pesar de una fuerte entrada de sustrato. El sistema bombea el nuevo material con suficiente potencia para mezclarlo, creando un contacto entre los microorganismos y el sustrato.
- Los reactores de lecho de lodo granular expandido (EGSB, *Expanded Granular Sludge Bed*): son similares a los reactores UASB, pero con una velocidad de flujo ascendente más rápida para las aguas residuales que pasan por el lecho de lodo. Este diseño es apropiado para concentraciones de DQO inferiores a 1 o 2 g de DQO/L o para aguas residuales con partículas en suspensión poco biodegradables.

Por la alta presencia de sólidos y aceite en el efluente de las aguas residuales del aceite de palma es un reto tratar este tipo de aguas con filtros anaeróbicos, lechos fluidizados, UASB o EGSB.

El alto contenido en aceite y sólidos de las POME debe eliminarse antes de entrar en los sistemas mencionados, por lo que se necesitarían más instalaciones de pretratamiento. Como consecuencia, los sistemas mencionados generarían menos biogás. Las Plantas extractoras de aceite de palma suelen utilizar reactores de tanque de agitación continua o lagunas cubiertas para la conversión de POME en biogás. En estos biodigestores se puede degradar un alto contenido de sólidos y aceite, también debe destacarse que su funcionamiento y mantenimiento son relativamente sencillos, su costo es menor que el de las demás, por lo que, estas tecnologías son las más adecuadas para la agroindustria de aceite de palma.

## 7.8. Filtración del biogás. (Eliminación de H<sub>2</sub>S)

Varnero, Carú, Galleguillos y Achondo (2012), expone que actualmente, existe una tecnología eficaz para la purificación fisicoquímica del biogás, pero es costosa de adquirir y operar; recientemente se ha destacado la importancia del método de purificación biológica. Este último permite utilizar diferentes tipos de bacterias como agentes de conversión, formando biofiltros que pueden separar mezclas de gases, reduciendo así los altos costes asociados a los sistemas de limpieza por métodos fisicoquímicos.

Rahayu *et al.* (2015), manifiesta que el filtro de sulfuro de hidrógeno debe reducir la concentración de H<sub>2</sub>S a los niveles permitidos por el motor de biogás, normalmente por debajo de 200 ppm. Esto evita la corrosión, optimiza el funcionamiento y alarga la vida útil de los motores de biogás. El H<sub>2</sub>S en el biogás procede del sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) y otros componentes de azufre de las aguas residuales.

En el digester anaeróbico, donde no hay oxígeno, el sulfato se convierte en H<sub>2</sub>S. Para reducir el contenido de H<sub>2</sub>S se utiliza un depurador biológico, químico o de agua. Un depurador biológico utiliza bacterias especiales que oxidan el azufre para convertir el H<sub>2</sub>S en SO<sub>4</sub>, mientras que un depurador químico utiliza un producto químico como el NaOH para convertir el H<sub>2</sub>S en SO<sub>4</sub>. Los depuradores de agua, que funcionan basándose en la absorción física de los gases disueltos en el líquido, utilizan agua a alta presión. En la industria de aceite de palma usualmente se utilizan depuradores o filtros biológicos debido a su bajo costo de funcionamiento.

La biodesulfuración es una etapa en filtración del biogás, que usan microorganismos para eliminar el azufre o compuestos de azufre.

Ortega, Rodríguez, Fernández y Bárcenas (2015) expone: “Se basa en la capacidad de ciertos microorganismos aerobios azufre-oxidantes, como el Thiobacillus ferrooxidans, Methylobacterium, Paracoccus Pseudomonas, Starkeya, Sulfolobus y anaerobios como Allochromatium, Chlorobium, Rhodopseudomonas, Rhodovulum y Thiocapsa, para oxidar compuestos reducidos de azufre transformándolos en sustancias de fácil eliminación” (p.48).

El residuo de la filtración es el azufre ( $S^0$ ) o sulfatos ( $SO_4$ )<sup>-2</sup>, de esta manera, se puede alcanzar un enriquecimiento en metano, al quitar dióxido de carbono y eliminar el material más corrosivo ( $H_2S$ ).

#### **7.9. Remoción de vapor de agua**

Rahayu et al. (2015), manifiesta que un deshumidificador de gas puede ser un secador, un enfriador o un ciclón; reduce el contenido de humedad del biogás para prepararlo para su uso en un motor de gas. Este equipo tiene la característica separar el agua del biogás. Esto ayuda a optimizar el proceso de combustión en el motor, evitar la condensación y proteger el motor de la formación de ácido. El ácido se forma cuando el agua reacciona con el  $H_2S$  y el oxígeno. Un biogás de alta calidad y baja humedad, con una humedad relativa inferior al 80 %, favorece la eficiencia del motor y reduce el consumo de gas combustible. (p. 22)

#### **7.10. Aprovechamiento de biogás.**

Varnero (2011) Afirma: “Existen diversas opciones para la utilización del biogás. Dentro de éstas destacan la producción de calor o vapor, generación de electricidad y combustible de vehículos”. (p. 55)

Althausen (2016) indica que comúnmente el biogás se utiliza como combustible en motores de biogás con generación de electricidad para la planta extractora, venta de energía a la red pública o venta de energía a otros productores. Los generadores más modernos y con nuevas tecnologías alcanzan una eficiencia eléctrica del 42 %, debiendo realizarse una inversión inicial de \$ 1.000 por kW aproximadamente. Las mejores marcas de generadores de biogás son GE Jenbacher de Austria, *Caterpillar Group* (MWM) de Alemania y Guascor de España. Estas compañías ofrecen un amplio soporte en el mercado.

Rahayu et al. (2015), indica que un motor de gas es una parte de un motor de combustión interna que funciona con un combustible gaseoso como el gas natural o el biogás. Después de que el proceso de producción reduzca las impurezas del biogás a unos niveles determinados, el biogás se introduce en un motor de gas para generar electricidad. Los motores de gas que funcionan con biogás requieren un contenido de humedad inferior al 80 % y una concentración de H<sub>2</sub>S inferior a 200 ppm; estos parámetros dependen de las especificaciones de los motores de gas. Los motores de gas convierten la energía contenida en el biogás en energía mecánica para impulsar el generador, que produce electricidad. Normalmente, los motores de gas tienen un rendimiento eléctrico de entre el 36 y el 42 %.

En la producción de biogás se deben tener equipos que eliminan el exceso de gas por medio de unos quemadores dentro de una chimenea, o quemadores expuestos. En ocasiones, el biogás no puede entrar en el motor de gas u otro equipo de combustión por lo tanto es necesario quemarlo, para evitar realizar emisiones de GEI. Cuando el exceso de producción supera el flujo máximo de biogás que puede entrar en el motor de gas, del mismo modo, cuando el motor de gas está fuera de servicio por mantenimiento, el biogás no tiene adónde ir, por

lo tanto, debe utilizar constantemente el quemador para el biogás. (Rahayu *et al.* 2015)

También se puede aprovechar el biogás para utilizarse en la caldera de biomasa de las plantas extractoras, instalando un quemador de gas en la pared de la caldera y así poder reducir la biomasa utilizada para combustión de la caldera. Esto implica realizar una reingeniería en el diseño de caldera. (Rahayu *et al.* 2015)

Nuevas tecnologías de purificación de biogás permiten aislar el metano, removiendo el dióxido de carbono, para obtener biometano puro y luego comprimirlo para tener gas natural comprimido (GNC). Este gas se puede utilizar en vehículos, maquinarias o motores de combustión interna, por lo tanto, sustituyen el diésel o gasolina. Siendo esto un aprovechamiento adicional del biogás. (Althausen, 2016)

Althausen (2016), afirma: “Los proyectos de biogás convierten el POME de un residuo costoso a un recurso importante y rentable para la planta extractora, y establecen un círculo cerrado de sostenibilidad en la planta extractora”. (p. 37)

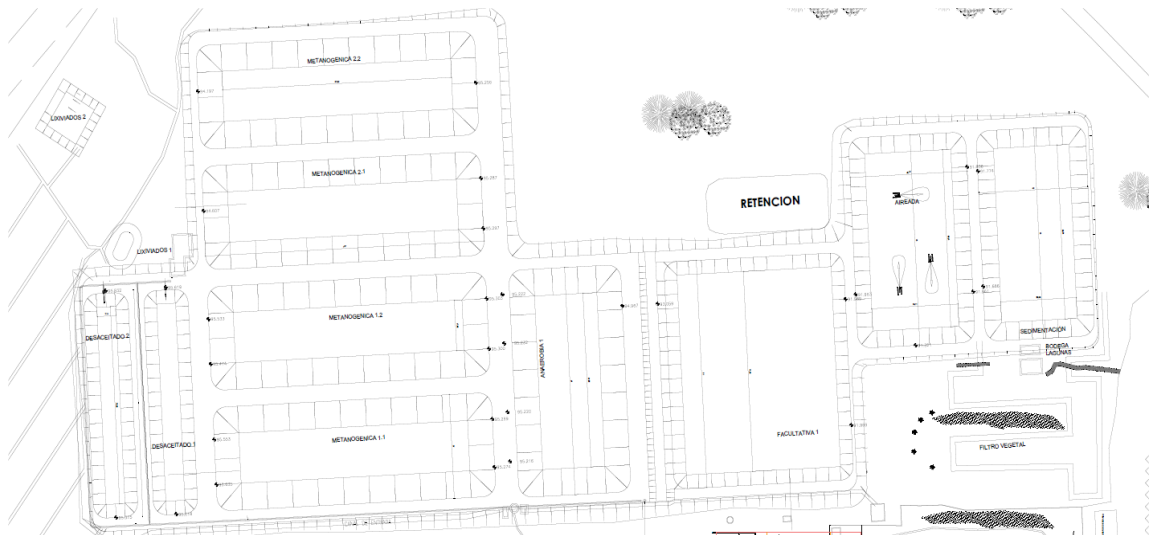
### **7.11. Descripción de la empresa**

En la planta extractora de aceite de palma, ubicada en el departamento de Alta Verapaz, Guatemala, procesa 400,000 TM de RFF al año, lo cual genera aproximadamente 320,000 m<sup>3</sup> de efluentes, los cuales reciben tratamiento de un sistema de lagunas compuesto por 2 lagunas de enfriamiento, 4 lagunas metanogénicas, una laguna anaerobia, una laguna facultativa, una laguna de aireación y por último una laguna de sedimentación.



Estos efluentes al recibir su tratamiento pasan a un sistema de fertirriego para su disposición directamente en la plantación de palma.

Figura 12. Esquema de sistema de lagunas



Fuente: Naturaceites, S.A. (2016). *Plano lagunas de tratamiento de aguas.*

Según la siguiente tabla, actualmente al inicio del sistema los efluentes ingresan con valores altos y finalizan con valores mínimos, lo que demuestra que el sistema es eficiente.

Tabla I. Características de Efluente

Parámetro	Ingreso	Salida
DQO (mg/L)	72250	2201
DBO (mg/L)	34000	716

Fuente: elaboración propia con información de Naturaceites, S.A. (2021). *Análisis de calidad de aguas en lagunas de tratamiento.*

En este momento las lagunas metanogénicas, que serían la fuente de metano para el diseño propuesto, no tienen ningún esquema de manejo, por lo tanto, más adelante se propondrá el aprovechamiento y transformación en biogás.

Durante la investigación se construirán los datos requeridos para hacer la propuesta de diseño del sistema de captación de metano para generación de energía en una planta extractora de aceite de palma, tomando en cuenta los análisis desarrollados en el marco teórico.

#### **7.12. Conjugación de elementos técnicos para el diseño.**

Según los autores consultados, los elementos que deberán ser considerados para realizar el diseño son:

- Caracterización de los efluentes.
- Volúmenes disponibles.
- Captación de metano.
- Conducción de metano.
- Transformación a biogás.
- Aprovechamiento de biogás.

La conjugación de estos elementos en el orden de análisis propuesto por los consultados permitirá tener un diseño que responderá a los objetivos propuestos en la investigación.

### 7.13. Análisis financiero

Briceño (2021), manifiesta que las métricas de rentabilidad que se utilizan usualmente al evaluar proyectos de inversión se encuentran el valor actual neto, la tasa interna de retorno y el índice beneficio/costo. A estos tres indicadores se les suma el periodo de recupero de la inversión (conocido como el *pay back*), que, si bien no es un indicador de rentabilidad como los tres anteriores, es un elemento auxiliar en la toma de decisiones y se utiliza junto con alguno de las métricas. Los indicadores de rentabilidad sirven para seleccionar la alternativa de inversión que genere valor para el negocio o ayudan a ordenar proyectos en función de sus rentabilidades.

#### 7.13.1. Valor actual neto (VAN)

También conocido como valor presente neto (VPN), se trata del valor actual de las utilidades netas que genera un proyecto, restándole la inversión hecha en el periodo cero. Se representa con la siguiente fórmula.

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{BN_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

$BN_t$  : Utilidades netas del periodo

$i$ : tasa de descuento

$I_0$ : inversión en el periodo cero

$n$ : vida útil del proyecto

Sin embargo, el resultado se puede obtener utilizando la función en Excel VNA, para actualizar solo los flujos futuros y luego descontarle la inversión inicial.

$$\text{VAN} = \text{=vna(} \boxed{\phantom{VNA(tasa; valor1; [valor2]; \dots)}} - I_0 \quad (\text{Ec. 3})$$

$\text{VNA(tasa; valor1; [valor2]; \dots)}$

Una vez que se han calculado los flujos de efectivo del proyecto (utilidades y costos), las utilidades netas de esos flujos se pueden utilizar para calcular el valor presente neto. La realización de un proyecto depende del valor que recibe. Por ejemplo, si el valor actual neto es superior a cero, debe aprobarse, y si es inferior a cero, debe rechazarse. Los intervalos que puede tomarse para este índice son:

- $\text{VAN} > 0$ . Se recomienda ejecutar la inversión del proyecto analizado. Los valores superiores a cero dicen que se tendrá una ganancia en relación con la inversión inicial, por lo tanto, es la alternativa idónea.
- $\text{VAN} = 0$ . para la persona que invierte, esto indica que es igual realizar la inversión en el proyecto o utilizar otra alternativa evaluada.
- $\text{VAN} < 0$ . No debe realizarse la inversión del proyecto, debe optarse por otra alternativa (Arroyo y Vásquez, 2016).

### 7.13.2. Tasa interna de retorno (TIR)

En el caso de una inversión, la tasa interna de retorno es el tipo de interés que representa la rentabilidad media anual generada por el capital continuamente invertido en el proyecto. Para el caso contrario, que es de financiamiento, la TIR representa el costo promedio anual (o periódico, dependiendo de la periodicidad de los flujos) que se debe pagar por un determinado capital. (Arroyo y Vásquez, 2016)

La expresión matemática para determinar la TIR se muestra en esta fórmula.

$$\sum_{t=0}^n \frac{BN_t}{(1+i)^t} - I_0 = f \quad (\text{Ec. 4})$$

La TIR se interpreta como el costo máximo, en el cual, un inversor puede solicitar dinero prestado para capitalizar un proyecto, lo que da como resultado el reembolso de los costos de capital y producción sin pérdidas. La tasa interna de retorno se recomienda que sea superior al costo de oportunidad. Con este criterio de aceptación el proyecto es viable. (Arroyo y Vásquez, 2016)

### 7.13.3. Índice beneficio / costo

Arroyo y Vásquez (2016) expresa que es usual escuchar que cuando en el mundo empresarial se está evaluando la toma de una decisión, se mencione que es necesario analizar el beneficio / costo de dicha decisión. Lo que se entiende es, que se van a comparar todos los beneficios asociados a la decisión contra los costos de dicha decisión. Dicho en términos cotidianos, se analizan los pros y contras de la decisión.

El índice de beneficio/costo es una métrica que deja buscar la relación entre el valor actual de los flujos futuros y el costo actual de la inversión del proyecto (en valor absoluto).

$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Valor presente de los flujos futuros}}{\text{Inversión inicial}} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde: flujos futuros = ingresos – egresos por periodo

Si el resultado es mayor a 1, ello indica que es mayor el beneficio que la inversión. Para el cálculo de la relación beneficio/costo, es muy importante separar los beneficios de los costos en el flujo de caja.

Un proyecto podría tener una relación beneficio/ costo mayor que el de otro y a su vez generar menor valor. Por ello, el VAN siempre es la herramienta de evaluación de proyectos más sólida y que puede complementarse con indicadores como el B/C o el periodo de recuperación. (Arroyo y Vásquez, 2016)

#### **7.13.4. Periodo de recuperación**

También se conoce como el plazo de recuperación del capital o el periodo de recuperación de la inversión. El periodo de recuperación es una herramienta de valoración de proyectos de inversión que puede responder a siguiente Pregunta: ¿cuánto tiempo tardaré en recuperar mi inversión? En el cálculo del tiempo de recuperación de la inversión, debe pensar en el valor del dinero en el tiempo. En ese sentido, hay que descontar cada flujo de efectivo generado por el proyecto llevándolo al presente y sumar dichos valores hasta que totalicen la inversión inicial. El periodo en que dicha suma iguale a la inversión inicial será el tiempo en el cual se retoma el capital invertido en el proyecto. (Arroyo y Vásquez, 2016)

El periodo de recuperación es un indicador muy importante para todo proyecto de inversión. Sin embargo, necesariamente no ordena bien la elección de alternativas de inversión, ya que no siempre el proyecto que tiene la recuperación más rápida es el que mayor valor genera (valor presente). (Arroyo y Vásquez, 2016, p.123)

#### **7.14. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)**

Para diseñar el sistema de captación de metano se utilizará metodología aceptadas por entes reguladores de emisiones de GEI.

El metano es uno de los gases, que mayor incidencia tiene en la atmosfera, en el proceso de la investigación se analizara la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), específicamente orientados al metano.

Rahayu *et al.* (2015), manifiesta que los principales gases de efecto invernadero de la atmósfera terrestre son el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso y el ozono.

Siendo dentro del proceso de extracción de aceite de palma y sus efluentes, el metano el principal GEI de emisión.

Para realizar un cálculo de GEI, es importante que se entiendan algunos términos y conceptos básicos de reducción de emisiones. Una reducción de emisiones es la cantidad de GEI que no entra en la atmósfera como resultado de una implementación.

Reducción de emisiones = Emisión de referencia - Emisión del proyecto – Fuga (Ec. 6)

Las emisiones de referencia son las que resultan de las actividades habituales, mientras que las emisiones del proyecto son el resultado de la implementación de las actividades del proyecto. Las fugas se refieren a las emisiones fuera de los límites del proyecto que se deben a la actividad de este. Los cálculos consideran que las emisiones por fugas son insignificantes porque suelen ser pequeñas, en traducción. (Rahayu et al., 2015)





## 8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTADO DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS ORIENTADORAS

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO REFERENCIAL

2. MARCO TEÓRICO

- 2.1 Proceso de extracción de aceite de palma.
- 2.2 Generación de efluentes en proceso de extracción.
- 2.3 Caracterización de efluentes.
- 2.4 Digestión Anaerobia (origen del Metano).
- 2.5 Condiciones óptimas para digestión anaerobia.
  - 2.5.1 Relación carbono/nitrógeno en sustrato.
  - 2.5.2 Contenido de sólidos.
  - 2.5.3 Temperatura.
  - 2.5.4 Tiempo de retención hidráulico (TRH) y carga orgánica volumétrica.
  - 2.5.5 PH y alcalinidad.
  - 2.5.6 Nutrientes.

- 2.5.7 Agitación.
- 2.5.8 Tóxicos.
- 2.6 Caracterización de biogás y su composición.
- 2.7 Captación de biogás (biodigestores).
- 2.8 Filtración de biogás (Remoción de H<sub>2</sub>S).
- 2.9 Remoción de vapor de agua.
- 2.10 Aprovechamiento de biogás.
- 2.11 Descripción de la empresa.
- 2.12 Conjugación de elementos técnicos para el diseño.
- 2.13 Análisis financiero.
  - 2.13.1 Valor actual neto (VAN).
  - 2.13.2 Tasa interna de retorno (TIR).
  - 2.13.3 Índice beneficio / costo.
  - 2.13.4 Periodo de recuperación.
- 2.14 Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

### 3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

### 4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

- 4.1 Diagnóstico del sistema de lagunas de tratamiento de aguas residuales existente.
- 4.2 Diseño de captación de metano para producción de biogás en el sistema de tratamiento de aguas industriales.
- 4.3 Beneficios al utilizar el biogás como generador de energía.
- 4.4 Análisis financiero, viabilidad del sistema e impactos en el ahorro frente a otras fuentes energéticas.

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

ANEXOS



## **9. METODOLOGÍA**

En este apartado se presenta la metodología de la investigación donde se describe el enfoque, diseño, tipo de estudio, alcances, variables e indicadores, fases, resultados esperados.

### **9.1. Enfoque**

La investigación tendrá un enfoque mixto, ya que, en el proceso de esta, se estará evaluando indicadores financieros e indicadores de proceso como parte cuantitativa. en la parte cualitativa se consultará información documental que aporte y valide el marco teórico. Ambos estarán delimitados en tiempos específicos durante la realización de la investigación.

### **9.2. Diseño**

Para esta investigación el diseño es no experimental, ya que durante su desarrollo no se utilizará fuentes primarias de información o análisis experimentales, sin embargo, se realizarán análisis de la información obtenida con herramientas para medición de variables.

### **9.3. Tipo de estudio**

Se utilizará un estudio Descriptivo, puesto que las variables a analizar únicamente presentarán resultados de variables y comparaciones de datos establecidos con anterioridad, que servirán para optimizar la propuesta de diseño.

#### 9.4. Alcance

La metodología tendrá un alcance descriptivo porque, se medirán, evaluarán y recolectarán datos de variables que permitirán desarrollar un diseño de captación de metano acorde a los objetivos planteados.

#### 9.5. Variables e indicadores

Se definen las variables e indicadores para el presente trabajo de investigación.

Tabla II. Operacionalización de variables

Objetivos	Variables	Tipo de variable	Indicador	Técnicas e Instrumentos	Metodología
Diagnosticar el sistema de lagunas de tratamiento de aguas residuales existente.	Diagnóstico del sistema de lagunas de tratamiento de agua.	Cualitativa. Dependiente.	Volumen de Aguas residuales: metros cúbicos de flujo. Operación del tratamiento, % de degradación. Cantidad de Gases emitidos, Toneladas de Metano. Metros cuadrados disponibles para instalación de equipo.	Análisis de información documental existente. Recorridos de Campo a las lagunas de tratamiento. Revisión de cálculos y parámetros de emisiones mediante calculadora ambiental.	Lectura y análisis de informes. Revisión de proceso. Cálculo de emisiones en Calculadora de emisiones de GEI.

Continuación de la tabla II.

Desarrollar un diseño de captación de metano para producción de biogás en el sistema de tratamiento de aguas industriales.	Diseño del sistema	Cuantitativa Dependiente	Identificación de equipos idóneos. Sistema de captación del metano Sistema de transformación a Biogás Sistema de transformación a electricidad.	Evaluación y comparación de especificaciones de equipos Cálculos y evaluaciones de diseños para la captación y transformación	Diseño esquemático
Determinar los beneficios al utilizar el biogás como generador de energía.	Evaluación de los beneficios del diseño.	Cuantitativa Independiente	Eficiencia energética. % de aprovechamiento. Emisiones de GEI, % de reducción. Fuente sostenible de combustible, Volumen de metano disponible. Eficiencia en el tratamiento de aguas residuales industriales. % de degradación.	Análisis y comparación de valores de emisiones y producción de metano. Valores de funcionamiento de las lagunas. Medición de Biogás	Mediciones de parámetros.
Desarrollar un análisis financiero que permita establecer la viabilidad del sistema, así como sus impactos en el ahorro en otras fuentes energéticas.	Análisis financiero del sistema.	Cualitativa Dependiente	Consumo de equipos, Cantidad de energía requerida vs. producida. Costos operativos con energía convencional. Costos operativos con Biogás. Análisis costo beneficio.	Análisis Económico Graficas de barras	Análisis Económico

Fuente: elaboración propia.

## 9.6. Fases

Para el cumplimiento de los objetivos del diseño de la investigación se realizará de la siguiente forma:

- Primera fase, recolección de información: revisión de documentos relacionados al tema que proporcionen elementos para sustentar el diseño. Durante esta esta se consultarán documentos, informes y publicaciones, que proporcionarán datos sobre el funcionamiento y experiencias del manejo de metano para producción de biogás. De ellos se extraerán datos para utilizarse en la propuesta de diseño. Tiempo estimado de 2 semanas.
- Segunda fase, diagnóstico del sistema actual: Se realizará el análisis del funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales industriales que permitirá establecer los puntos de mejora y aprovechamiento. Para esto se utilizará un cuadro de recolección de datos, utilizando los parámetros del proceso. Se tomará todo el funcionamiento, se verificarán los parámetros de operación actual y se conocerán las acciones de mejora a considerar en el diseño. Se presentará en apéndice 3. Tiempo estimado de 4 semanas.
- Tercera etapa desarrollo del diseño: desarrollar el proceso para el aprovechamiento del metano mediante acciones que permitan la transformación en biogás. En esta etapa se tomarán variables, tanto documentales como de proceso para poder establecer el diseño que corresponda. El proceso consistirá en la captación, conducción, filtración y remoción de vapor de agua, con esto se contribuirá a un óptimo diseño. Esta etapa se desarrollará en 12 semanas.



- Cuarta etapa beneficios del biogás: el metano se transformará en combustible para alimentación de los generadores de biogás, lo cual generará energía eléctrica, útil para funcionamiento de nuevos proyectos en la planta extractora. Se conocerán los beneficios cuantitativos que se podrán obtener con la transformación de metano a biogás, para utilizarse como una fuente alternativa de energía. Se utilizará un cuadro para determinar los beneficios cuantitativos que aplican a la industria de aceite de palma, se presentará en anexo 4, tiempo estimado de 6 semanas.
- Quinta etapa análisis financiero: se realizará el análisis de costo – beneficio mediante herramientas de análisis financieros, lo que permitirá determinar si la utilización de biogás para generar energía eléctrica en comparación con los sistemas tradicionales de generación. Además, esta etapa brindara la información para la toma de decisiones gerenciales en cuanto a la viabilidad del diseño. Este análisis se realizará en 2 semanas.

### **9.7. Resultados esperados**

Se espera obtener inicialmente un estado de la situación del funcionamiento y operación del sistema de tratamiento de aguas residuales industriales.

Se obtendrá como resultado de estos procesos un diseño que optimice el aprovechamiento del metano para la generación de biogás y con ello producir energía eléctrica.

Por último, se establecerá la viabilidad técnica y económica de un diseño de captación de metano como fuente alternativa sustentable dentro de los procesos de tratamiento de agua residuales en la industria de extracción de aceite de palma.

## **9.8. Unidad de análisis**

Por el tipo de investigación se considerará una unidad de análisis compuesta por el sistema de tratamiento de aguas residuales, que inicia en lagunas de enfriamiento y finaliza en laguna de sedimentación, con énfasis en las lagunas metanogénicas.

## 10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Las técnicas que se utilizarán para el desarrollo de la investigación varían según objetivos planteados, algunos serán descriptivos y otros cuantitativos

Para el primer objetivo que es básicamente obtener información para desarrollar un diagnóstico, la técnica será descriptiva, pues dentro de este proceso únicamente se obtendrá información que se comparará para fines de esta investigación. Para esto se utilizará una tabla de obtención de datos y un recorrido para observar las instalaciones (Apéndice 3).

En el segundo objetivo, se utilizarán técnicas comparativas, que deberán ser analizadas y evaluadas, pues con los resultados de estos se tomarán en cuenta para establecer la propuesta de diseño.

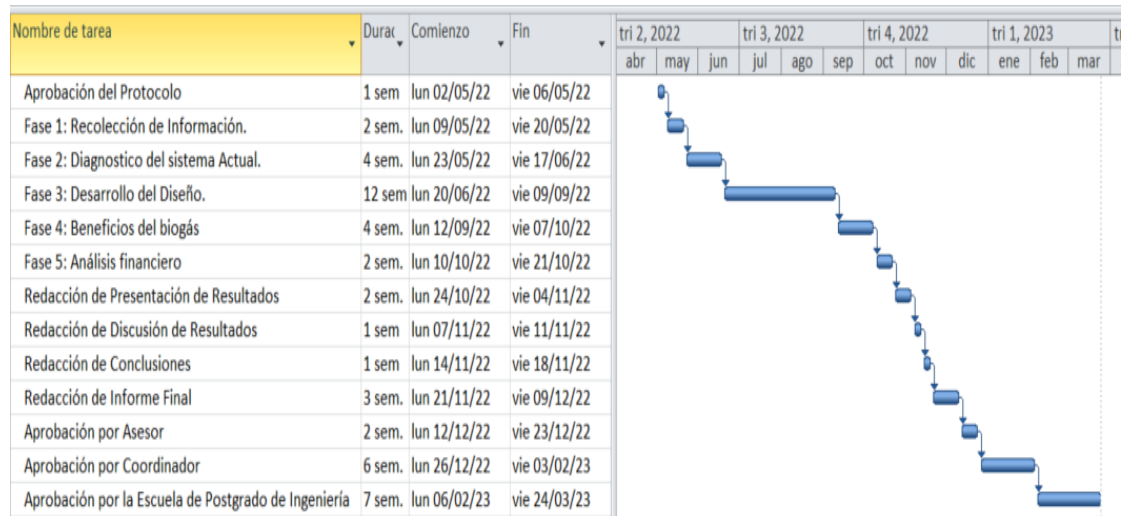
Para el tercer objetivo, cuya finalidad es determinar la eficiencia del diseño propuesto en variables operativas, se utilizará una tabla comparativa, cuyos resultados se expresarán porcentualmente para hacer las comparaciones de eficiencia y determinar cuáles son aplicables a la industria de aceite de palma (Apéndice 4).

En el análisis económico, que es el último objetivo planteado, estará básicamente definido por esquemas de análisis costo beneficio, dentro de marcos económicos, tales como: VAN, TIR, análisis comparativos de costos y rendimientos, donde únicamente se harán la sustitución de valores para obtener resultados. Los resultados en tablas y gráficas.



## 11. CRONOGRAMA

Figura 13. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Project.



## 12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

El presente trabajo de investigación es factible, ya que cuenta con todos los recursos necesarios para realizar la investigación y cumplir con los objetivos propuestos. Siendo los siguientes recursos:

- Humano

Se cuenta con el investigador para realizar la propuesta del diseño, así como el asesor para orientar la misma.

- Material e información

Se tendrá acceso a la información de análisis fisicoquímicos, cotizaciones y proyecciones de costos para realizar la investigación, con el compromiso de confidencialidad hacia la empresa.

- Transporte y tecnología

También se utilizarán los equipos de cómputo, mobiliario y equipo de la empresa, así como la infraestructura necesaria para realizar la investigación.

Los recursos financieros necesarios para realizar la investigación serán aportados en su totalidad por el investigador, considerando el siguiente presupuesto de gastos.

Tabla III. Presupuesto

Recurso	Descripción de Gasto	Cantidad	Costos	Fuente de financiamiento
Humano	Asesor	1	Q 0.00	Donación
	Investigador	1	Q 12,000.00	Propia
Materiales	Análisis fisicoquímicos de aguas residuales.	3	Q 0.00	Por la industria
	Cotizaciones y proyección de costos	2	Q.0.00	Por la industria
	Papelería y útiles	1	Q 120.00	Propia
Transporte	Depreciación de vehículo	1	Q 1,000.00	Propia
	Combustible para vehículo	1	Q 2,500.00	Propia
Tecnológico	Equipo de computo	1	Q 0.00	Propia
	Programa anti-plagio	1	Q 200.00	Propia
	Internet	1	Q 1,200.00	Propia
Varios	Imprevistos	1	Q 850	Propia
<b>TOTAL</b>			<b>Q 17,870.00</b>	

Fuente: elaboración propia.



### 13. REFERENCIAS

1. Althausen, M. (2016). *Tratamiento de Efluentes de la Planta de Beneficio-Convertir un residuo en un recurso*. Palmas, 37(Especial Tomo II).
2. Arroyo P, y Vásquez R., (2016). *Ingeniería económica: ¿cómo medir la rentabilidad de un proyecto?* Fondo Editorial Universidad de Lima, Perú.
3. Briceño P. (2021) *Evaluación de proyectos de inversión*. Universidad Peruana de ciencias aplicadas.
4. Carrillo L. (2003). *Microbiología Agrícola*. Capítulo 5. Rumen y biogás.
5. Carvajal, D. D., Mena, A. M. M., Ruiz, J. A., Peláez, C., y Vásquez, M. P. (2019). *Biodigestión del pome como alternativa energética y ambiental en las extractoras de aceite de palma*. Actas de memoria CIIISOL.
6. Chaparro, D. C., Ramírez, N. E., Núñez, J. A. G., Cammaert, C., y Rincón, S. A. (2021). *Mejores prácticas en tratamiento de efluentes de la planta de beneficio y captura de biogás*. Boletín El Palmicultor, 590(abril).
7. Contreras Gomez, J. A., y Herazo Witt, W. J. (2020). *Análisis del potencial energético del biogás extraído de los efluentes líquidos de una planta extractora de aceite*. <http://hdl.handle.net/10584/9350>

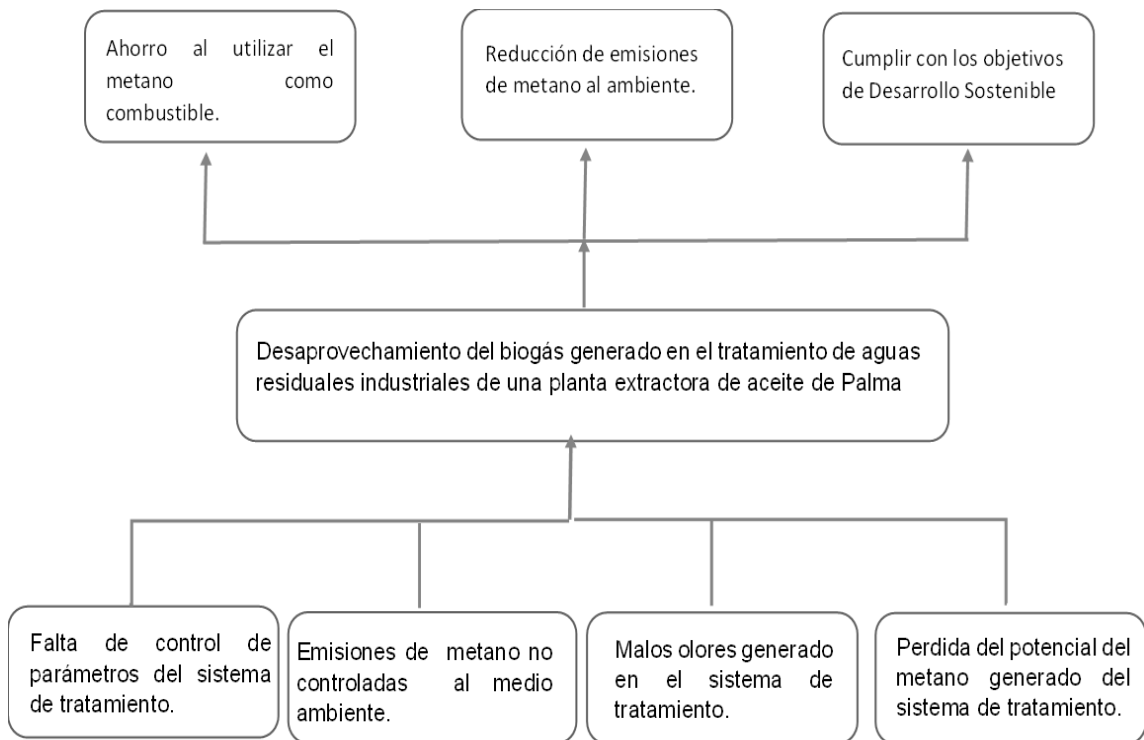
8. Deublein D., Steinhauser A. (2008). *Biogas from waste and renewable resources: An Introduction*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim.
9. Dzulkiflee, M. R. (2019). *Desarrollo de proyectos de biogás en Felda Palm Industries. Reflexiones, camino a seguir y oportunidades de generación de valor para el biogás a base de aceite de palma–Bio CNG y biogás para generación de energía fuera de la red*. Revista Palmas, 40(Especial T).
10. García N., J.A. y Uribe M., L.D. (1997) *Manejo de Efluentes de Plantas Extractoras. Diseño de lagunas de estabilización*. CENIPALMA Boletín Técnico No. 11.
11. GREMIAL DE PALMICULTORES DE GUATEMALA (2019). *Anuario Estadístico 2018 – 2019*. [http: \\ www.grepalma.org](http://www.grepalma.org).
12. Lagrange, B. (1979). *Biomethane. Principes, Techniques, Utilisation*. Vol.2. Edisual / Energies Alternatives.
13. Loh, S. K., Nasrin, A. B., Azri, S. M., Adela, B. N., Muzzammil, N., Jay, T. D., y Kaltschmitt, M. (2017). *First Report on Malaysia's experiences and development in biogas capture and utilization from palm oil mill effluent under the Economic Transformation Programme: Current and future perspectives*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

14. Mohammad, S.; Baidurah, S.; Kobayashi, T.; Ismail, N.; Leh, C.P. (2021) *Palm Oil Mill Effluent Treatment Processes—A Review*. <https://doi.org/10.3390/pr9050739>.
15. Moncayo-Romero G. (2005). *Digestión Anaerobia y diseño de biodigestores*. Ecuador.
16. Moncayo-Romero G. (2017). *Que es biogás*. <https://www.aqualimpia.de>.
17. Ortega L., Rodríguez S., Fernández E., y Bárcenas L. (2015). *Principales métodos para la desulfuración del biogás*. Ingeniería hidráulica y ambiental, VOL. XXXVI, No. 1.
18. Pavlostathis S. y Giraldo – Gomez E. (1991). *Kinetics of anaerobic treatment: A critical review*. Critical reviews in environmental control. Vol. 21.
19. Rahayu A.S., Karsiwulan D., Yuwono H., Trisnawati I., Mulyasari S., Rahardjo S., Hokermin S., y Paramita V. (2015). *Handbook POME-to-Biogas Project Development in Indonesia*. Winrock International.
20. Ramírez C., N. E., Munar F., D. A., García Núñez, J. A., Mosquera Montoya, M., y Faaij, A. P. C. (2021). *Emisiones de GEI y desempeño económico del sector palmero en Colombia: escenario actual y perspectivas a largo plazo*. Revista Palmas, 42(2).
21. Speece, R. E. (1996). *Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatments*. Archae Press, Nashville, TN, USA.

22. Varnero Moreno M.T. (2011). *Manual de biogás*. MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, Santiago, Chile.
23. Varnero, M.T. (1991). *Manual de Reciclaje Orgánico y Biogás*. Ministerio de Agricultura (FIA) – Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Santiago, Chile.
24. Varnero M.T., Carú M, Galleguillos K., y Achondo P. (2012). *Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica*. Información Tecnológica Vol. 23(2), Santiago, Chile.

## 14. APÉNDICE

### Apéndice 1. **Árbol del problema**



Fuente: elaboración propia, utilizando Word.

Apéndice 2. **Matriz de coherencia**

<b>Objetivos</b>	<b>Nombre de variables</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Técnicas e instrumentos</b>	<b>Metodología</b>
Diagnosticar el sistema de lagunas de tratamiento de aguas residuales existente.	Diagnóstico del sistema de lagunas de tratamiento de agua.	Volumen de Aguas Residuales: metros cúbicos de flujo. Operación del tratamiento, % de degradación. Cantidad de Gases emitidos, Toneladas de Metano. Metros cuadrados disponibles para instalación de equipo.	Análisis de información documental existente. Recorridos de Campo a las lagunas de tratamiento. Revisión de cálculos y parámetros de emisiones mediante calculadora ambiental.	Lectura y análisis de informes. Visita de revisión de proceso y procedimiento. Cálculo de emisiones a través de Calculadora de emisiones de GEI.
Desarrollar un diseño de captación de metano para producción de biogás en el sistema de tratamiento de aguas industriales.	Diseño del sistema	Identificación de equipos idóneos. Sistema de captación del metano. Sistema de transformación a Biogás. Sistema de transformación a electricidad.	Evaluación y comparación de especificaciones de equipos. Cálculos y evaluaciones de diseños para la captación y transformación	Diseño esquemático
Determinar los beneficios al utilizar el biogás como generador de energía.	Evaluación de los beneficios del diseño.	Eficiencia energética. % de aprovechamiento. Emisiones de GEI. % de reducción. Fuente sostenible de combustible. Volumen de metano disponible. Eficiencia en el tratamiento de aguas residuales industriales. % de degradación.	Análisis y comparación de valores de emisiones y producción de metano. Valores de funcionamiento de las lagunas. Medición de Biogás.	Mediciones de parámetros.

Continuación del apéndice 2.

<b>Objetivos</b>	<b>Nombre de variables</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Técnicas e instrumentos</b>	<b>Metodología</b>
Desarrollar un análisis financiero que permita establecer la viabilidad del sistema, así como sus impactos en el ahorro en otras fuentes energéticas.	Análisis financiero del sistema.	Consumo de equipos. Cantidad de energía requerida vrs producida. Costos operativos con energía convencional. Costos operativos con Biogás. Análisis costo beneficio, VPN, VAN, TIR.	Análisis Económico. Gráficas de barras.	Análisis Económico

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Recolección de parámetros actuales**



Universidad de San Carlos de Guatemala  
 Facultad de Ingeniería  
 Escuela de Estudios de Postgrado  
 Maestría en Gestión Industrial

**FUNCIONAMIENTO ACTUAL DE SISTEMA DE TRATAMIENTO**

Laguna	Cantidad	Volumen (m3)	T °C	pH	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	Solidos Sedimentables (ml/L)
Enfriamiento							
Metanogénica							
Anaerobia							
Facultativa							
Aireación							
Sedimentación							

**Observaciones de recorrido en Campo:**

---



---



---



---



---



---



---



---



---



---



---



---



---



---



---



---

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.



Apéndice 4. **Beneficios de biogás**



Universidad de San Carlos de Guatemala  
 Facultad de Ingeniería  
 Escuela de Estudios de Postgrado  
 Maestría en Gestión Industrial

**BENEFICIOS DE BIOGAS APLICADOS A INDUSTRIA**

<b>BENEFICIOS COMO FUENTE ENERGETICA</b>	<b>% Aprovechamiento energético</b>	<b>% Reduccion de GEI</b>	<b>Fuente sostenible</b>	<b>% Degradación de Tratamiento</b>

Según datos Comparativos se determinan si aplican a la Industria de aceite de palma

Observaciones:

---



---



---



---



---



---

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

