



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

FACULTAD DE ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

PROYECTO DE MATERIA INTEGRADORA

**EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE METODOLOGÍAS  
APLICADAS AL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LA  
BIOMASA PRESENTE EN LOS EFLUENTES DE UNA  
PLANTACIÓN ECUATORIANA DE PALMA ACEITERA  
MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN PROCESO  
BIODIGESTIVO**

Presentado por:

Jorge Enrique Valverde Burneo

Ana Belén Albán Tapia

Previo a la obtención del título de

**Ingeniero/a en Electricidad**

---

Supervisado por:

PhD. Miguel Alberto Torres Rodríguez

Guayaquil-Ecuador

Año

2020

# DEDICATORIA

*Quiero dedicar este trabajo y mi culminación de la carrera a toda mi preciada familia que, durante todos estos años, me han apoyado y tolerado tanto en los buenos como en los malos momentos. A mi madre, Jessenia Burneo Gonzabay, quien siempre ha sido el pilar emocional de la familia y mi ejemplo a seguir por su liderazgo y fe en la superación personal; a mi padre, Jorge Valverde Román, quien ha sido mi guía y maestro a lo largo de este escalón de mi vida profesional; a mis hermanos mayores, David Enrique y María Belén, quienes constantemente me motivaron para seguir adelante pese a las desafortunadas adversidades que se presentaron en diferentes ocasiones; a mis profesores, quienes lograron marcar mi madurez mental y con quienes algunos concreté una sana amistad; y, finalmente, a mis queridos camaradas a lo largo de la carrera, con quienes disfruté, peleé, reí, lloré, y atravesé los diferentes retos que se nos fueron imponiendo con cada peldaño que superábamos. Gracias a ellos, mi vida universitaria fue una aventura inolvidable.*

*Jorge Enrique Valverde Burneo*

*El presente proyecto de carrera es dedicado a mis padres, Rosa Elena Tapia y José Luis Albán, por el apoyo recibido durante mis estudios y por todos los consejos y valores impartidos, a mis hermanas, María Elena y Daniela Elizabeth, por ofrecerme motivación y ánimos en cada momento, recordándome siempre cuan capaz puedo ser, y a mis padrinos, Victoria Albán y Segundo Guerrero, quienes con su ejemplo han sembrado en mi la perseverancia y el esfuerzo, finalmente, a mis amigos, quienes han hecho de la vida universitaria una inolvidable*

*aventura.*

*Ana Belén Albán Tapia*

# AGRADECIMIENTOS

*Agradecemos a Dios por ser pilar de nuestra vida espiritual, por guiar nuestro camino en valores y darnos la oportunidad de desarrollar esta vocación. Queremos expresar nuestro agradecimiento primero al Sr. Fabricio Espinoza Valverde y el Ing. Irwin Mendina por la cálida recepción brindada en las instalaciones de la empresa PROPALMIN CIA.LTDA., y su colaboración con información y datos que fueron imprescindibles para el desarrollo y culminación de nuestro proyecto. También agradecemos a nuestros queridos tutores, el PhD. Miguel Torres y el Msc. Otto Alvarado, por su tiempo, dedicación, conocimientos y experiencias que influenciaron en el desarrollo de un trabajo de final de carrera bien estructurado. Finalmente, agradecemos a la Msc. Valeria Zambrano, por su habilidoso asesoramiento en las estrategias empleadas en la sustentación de nuestra propuesta de valor.*

# DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Jorge Enrique Valverde Burneo y Ana Belén Albán Tapia damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

---

Jorge Enrique Valverde Burneo

---

Ana Belén Albán Tapia

# EVALUADORES

---

Msc. Fernando Vaca Urbano  
Profesor de la materia

---

Msc. Otto Alvarado Moreno  
Profesor co-tutor

---

PhD. Miguel Torres Rodríguez  
Profesor tutor

---

## RESUMEN

El cultivo de palma aceitera puede traer consigo irremediables consecuencias ambientales como la deforestación, polución del aire y contaminación de los cuerpos hídricos aledaños. Esta contaminación se debe a uno de los subproductos indeseados del procesamiento de extracción del aceite de palma, correspondientes a efluentes o también denominados como POME, los cuales presentan bajos niveles de pH, elevadas temperaturas y una alta proporción de carga orgánica, que incumplen las normativas ambientales vigentes en el país. Con el desarrollo tecnológico, se han encontrado alternativas que consisten en el tratamiento y aprovechamiento de estos desechos para la generación de energía y reducción de contaminantes, basándose en la implementación de un sistema biodigestor en conjunto con un sistema de lagunaje aeróbico. Este trabajo propone evaluar las metodologías orientadas al aprovechamiento energético de POME, cuantificando cada uno de los beneficios que se obtienen tras la implementación de estos sistemas, acorde con las características productivas de nuestro caso de estudio ecuatoriano, la empresa extractora de aceite de palma PROPALMIN CIA.LTDA. Se desarrolló un programa que toma todas las ecuaciones y consideraciones que se encontraron tras una extensa revisión bibliográfica, para el diseño y dimensionamiento de una planta biodigestora productora de biogás, mostrando como datos más relevantes, la energía que puede generarse y aprovecharse del POME, para el autoconsumo eléctrico y térmico; anexando a ello una evaluación financiera para determinar la rentabilidad y sus beneficios. La investigación concluyó con resultados factibles al presentarse en sus indicadores económicos valores que justifican su inversión y dan gala a su rentabilidad. **Palabras clave:** POME, generación de energía, Ecuador, biodigestor, palma aceitera

---

# ABSTRACT

The cultivation of oil palms can bring with it irremediable environmental consequences such as deforestation, air pollution and contamination of surrounding water bodies. This contamination is due to one of the undesirable by-products of palm oil extraction processing, corresponding to effluents or also known as POME, which have low pH levels, high temperatures and a high proportion of organic matter, which do not comply with the environmental regulations in force in the country. With technological development, alternatives have been found that consist of the treatment and use of this waste for energy generation and reduction of pollutants, based on the implementation of a biodigester system in conjunction with an aerobic lagooning system. This work proposes to evaluate the methodologies oriented to the energy use of POME, quantifying each of the benefits obtained after the implementation of these systems, according to the productive characteristics of our Ecuadorian case study, the palm oil extraction company PROPALMIN CIA.LTDA. A program was developed that takes all the equations and considerations that were found after an extensive bibliographic review, for the design and sizing of a biodigester plant producing biogas, showing as the most relevant data, the energy that can be generated and taken advantage of the POME, for the electrical and thermal self-consumption; annexing to it a financial evaluation to determine the profitability and its benefits. The research concluded with feasible results, since its economic indicators show values that justify its investment and show its profitability. **Keywords:** POME, energy generation, Ecuador, biodigester, oil palm



# Índice general

<b>Índice de figuras</b>	<b>XII</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XIII</b>
<b>Acrónimos</b>	<b>XIV</b>
<b>1. PLANTEAMIENTO Y ESTRUCTURA DEL PROYECTO INTEGRADOR</b>	<b>1</b>
1.1. Descripción del problema . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo general . . . . .	2
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	2
1.3. Justificación del problema . . . . .	2
1.4. Estructura del proyecto . . . . .	3
<b>2. MARCO TEORICO</b>	<b>5</b>
2.1. Cultivo de palma africana . . . . .	5
2.1.1. Evaluación productiva . . . . .	5
2.1.2. Impacto ambiental . . . . .	6
2.2. Aceite crudo de palma africana . . . . .	6
2.2.1. Evolución de los precios del aceite de palma . . . . .	7
2.2.2. Extracción de aceite de palma . . . . .	7
2.3. Manejo y tratamiento de efluentes . . . . .	8
2.3.1. POME . . . . .	8
2.3.1. POME . . . . .	8
2.3.1. POME . . . . .	8
2.3.2. Tratamiento del POME . . . . .	9
2.4. Biodigestor . . . . .	10
2.4.1. Parámetros para el dimensionamiento de un biodigestor . . . . .	11
2.4.2. Proceso de digestión anaeróbica . . . . .	11
2.4.3. Componentes de un biodigestor . . . . .	12
2.4.4. Modelos operacionales . . . . .	14
2.4.5. Modelos de diseño . . . . .	15
2.5. Biogás . . . . .	16
2.5.1. Aplicaciones del Biogás . . . . .	16

2.5.2.	Clasificación de las plantas de biogás . . . . .	17
2.5.3.	Tecnología para la Generación Eléctrica . . . . .	17
2.6.	Bioabono . . . . .	19
<b>3.</b>	<b>METODOLOGÍA Y CASO DE ESTUDIO</b>	<b>20</b>
3.1.	Resumen ejecutivo . . . . .	20
3.2.	Antecedentes . . . . .	21
3.2.1.	Climatología . . . . .	21
3.2.2.	Hidrología . . . . .	21
3.2.3.	Topografía . . . . .	22
3.3.	Situación actual de la planta extractora de aceite . . . . .	22
3.3.1.	Descripción del proceso de extracción de la planta . . . . .	22
3.3.2.	Demanda eléctrica de la planta . . . . .	24
3.4.	Descripción del proceso de tratamiento del POME . . . . .	26
3.4.1.	Requisitos para descarga de efluentes . . . . .	27
3.4.2.	Tratamiento del POME . . . . .	28
3.4.3.	Productos del biodigestor: . . . . .	29
3.5.	Metodologías para el aprovechamiento energético del POME . . . . .	30
3.5.1.	Generación de Biogás . . . . .	30
3.5.2.	Tiempo de retención hidráulico . . . . .	31
3.5.3.	Dimensionamiento de la laguna . . . . .	31
3.5.4.	Aprovechamiento de energía térmica . . . . .	34
3.5.5.	Aprovechamiento de energía eléctrica . . . . .	37
3.5.6.	Dimensionamiento de la antorcha . . . . .	38
3.6.	Evaluación financiera . . . . .	39
3.6.1.	Costos de inversión . . . . .	39
3.6.2.	Costos de operación y mantenimiento . . . . .	40
3.6.3.	Costo nivelado de la energía . . . . .	40
3.6.4.	Valor Actual Neto . . . . .	41
3.6.5.	Tasa Interna de Retorno . . . . .	41
3.6.6.	Periodo de recuperación de inversión . . . . .	42
3.7.	Elaboración de herramienta computacional . . . . .	42
3.7.1.	Desarrollo de la base de datos . . . . .	43
3.7.2.	Interfaz del programa . . . . .	43
3.7.3.	Ingreso de información . . . . .	44
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>47</b>
4.1.	Resultados del programa . . . . .	47
4.1.1.	Parámetros de ingreso del biodigestor . . . . .	47
4.1.2.	Cantidad de biogás disponible . . . . .	47
4.1.3.	Dimensión efectiva del biodigestor . . . . .	48
4.1.4.	Calor de regulación de temperatura . . . . .	48

---

4.1.5.	Caso 1: Temperatura ambiental promedio . . . . .	49
4.1.6.	Caso 2: Temperatura ambiental crítica . . . . .	49
4.1.7.	Potencial energético del biodigestor . . . . .	49
4.1.8.	Dimensionamiento del agitador electromecánico . . . . .	49
4.1.9.	Dimensionamiento del compresor . . . . .	50
4.1.10.	Dimensionamiento de la bomba de recirculación . . . . .	50
4.1.11.	Dimensionamiento de la antorcha . . . . .	50
4.1.12.	Total consumo energético de la planta . . . . .	50
4.2.	Selección de la tecnología para la generación de electricidad . . . . .	51
4.2.1.	Turbina de Gas . . . . .	51
4.2.2.	Microturbina de Gas . . . . .	52
4.2.3.	Motor de combustión interna. . . . .	52
4.2.4.	Comparación de las tecnologías . . . . .	52
4.3.	Ahorro económico en el consumo de electricidad . . . . .	53
4.4.	Ahorro económico en el consumo de calor . . . . .	54
4.4.1.	Calor obtenido mediante electricidad . . . . .	54
4.4.2.	Calor obtenido mediante GLP . . . . .	54
4.4.3.	Calor obtenido mediante gas natural . . . . .	54
4.5.	Emisiones reducidas en la generación de energía eléctrica . . . . .	55
4.6.	Emisiones reducidas en la generación de energía térmica . . . . .	55
4.6.1.	Emisiones reducidas sin electricidad de la red . . . . .	55
4.6.2.	Emisiones reducidas sin GLP . . . . .	55
4.6.3.	Emisiones reducidas sin gas natural . . . . .	55
4.7.	Viabilidad económica del proyecto . . . . .	55
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>57</b>
5.1.	Conclusiones . . . . .	57
5.2.	Trabajos futuros . . . . .	58
	<b>Apéndice</b>	<b>64</b>
	<b>A. Evidencia fotográfica</b>	<b>64</b>
	<b>B. Reportes del programa</b>	<b>66</b>
	<b>C. Resultados de la evaluación financiera</b>	<b>79</b>

# Índice de figuras

2.1. Fruto de aceite de palma o aceite rojo . . . . .	6
2.2. Evolución del precio internacional del aceite (2010-2020) . . . . .	7
2.3. Proceso de extracción de aceite de palma africana . . . . .	8
2.4. Vista General de un biodigestor de grandes dimensiones. . . . .	11
2.5. Componentes generales de un biodigestor. . . . .	14
2.6. Modelos de diseños de reactores. . . . .	15
2.7. Composición química del biogás. . . . .	16
2.8. Tecnologías para la conversión de energía. . . . .	19
3.1. Ubicación de la planta. . . . .	21
3.2. Planta extractora en proceso de constructivo. . . . .	22
3.3. Datos de placa de la turbina de vapor. . . . .	24
3.4. Geometría del biodigestor . . . . .	32
3.5. Capas del biodigestor . . . . .	33
3.6. Ingreso de usuario y contraseña. . . . .	44
3.7. Interfaz del programa. . . . .	44
3.8. Ingreso de datos del proyecto. . . . .	45
3.9. Ingreso de datos productivos y ambientales . . . . .	45
3.10. Designación del biodigestor. . . . .	46
3.11. Designación de la tecnología de conversión eléctrica. . . . .	46
4.1. Diseño del biodigestor. . . . .	48

# Índice de tablas

2.1. Características fisicoquímicas de los efluentes. . . . .	9
2.2. Tipos de plantas de Biogás. . . . .	17
2.3. Información técnica de la turbina a gas. . . . .	18
2.4. Información técnica de la microturbina a gas. . . . .	18
2.5. Información técnica del motor de combustión interna. . . . .	19
3.1. Cargas de la Estación de Recepción de Fruto. . . . .	24
3.2. Cargas de la Estación de Esterilización. . . . .	25
3.3. Cargas de la Estación de Trilla y Prensado. . . . .	25
3.4. Cargas de la Sala de Calderas. . . . .	26
3.5. Capacidad instalada en la planta. . . . .	26
3.6. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce. . . . .	27
3.7. Criterios de calidad admisibles para aguas de uso agrícola o de riego. . . . .	28
3.8. Información química para la obtención de biogás . . . . .	31
3.9. Información de las capas de la laguna . . . . .	33
3.10. Información térmica de los materiales . . . . .	35
3.11. Información técnica del efluente . . . . .	36
3.12. Modelos de antorchas . . . . .	39
4.1. Características del biodigestor. . . . .	47
4.2. Dimensión de la laguna biodigestiva. . . . .	48
4.3. Calor para mantener la temperatura interna en condición promedio. . . . .	49
4.4. Calor para mantener la temperatura interna en condición crítica. . . . .	49
4.5. Consumo energético total del biodigestor. . . . .	50
4.6. Resultados para la opción de turbinas de gas. . . . .	51
4.7. Resultados para la opción de micro turbinas de gas. . . . .	52
4.8. Resultados para la opción de motor de combustión interna. . . . .	53
4.9. Matriz de decisión . . . . .	53

## Siglas y Acrónimos

$a_p$	Apotema
$dn$	Tasa de descuento
$Inv_t$	Costo de vida del proyecto
$A_{Bm}$	Área de la base menor
$A_{BM}$	Área de la base mayor
$A_{tcs}$	Área total de la laguna en contacto con el suelo
$A_t$	Área total
$C_{eff}$	Capacidad calorífica promedio de los efluentes
CH <sub>4</sub>	Metano
CIF	Coste & seguro & flete
CIP	Cámara de industrias y producción
cm	Centímetros
CNELEP	Corporación Nacional de Electricidad Empresa Pública
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
$d_{eff}$	Densidad relativa de los efluentes
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
$DQO_{in}$	Demanda química de oxígeno de ingreso al biodigestor
$DQO_{out}$	Demanda química de oxígeno de salida del biodigestor
$e_1$	Espesor de la primera capa del biodigestor
$E_{qd}$	Energía del quemador
$E_t$	Energía eléctrica generada en un año
$F_{as}$	Flujo de dinero del año siguiente
FFB	Racimos de fruta fresca
GLP	Gas licuado de petróleo
h	Horas
H <sub>2</sub> S	Ácido sulfhídrico
$h_{ext}$	Coefficiente de convección exterior
$h_{int}$	Coefficiente de convección interior
$H_l$	Altura de la laguna
HDPE	Poliétileno de alta densidad
HP	Horsepower (caballos de fuerza)
hrs	Horas
$I_0$	Costo de inversión del proyecto
ICTA	Instituto de ciencia y tecnología ambientales
IVA	Impuesto al valor agregado
K	Kelvin
$k_1$	Conductividad del polietileno de alta densidad

$k_2$	Conductividad del geotextil
kg	kilogramos
kW	Kilovatios
kWh	Kilovatios hora
L	Litros
$L_l$	Longitud de la laguna
LCOE	Costo nivelado de la energía
m	Metros
$m_s$	Caudal másico de los efluentes
mg	Miligramos
min	Minutos
MJ	Megajoule
mm	Milímetros
MMBTU	Million BTU (British Thermal Unit)
msnm	Metros sobre el nivel del mar
MW	Megavatios
MWh	Megavatios hora
n	Periodo de tiempo (años)
$n_{cal}$	Eficiencia del intercambiador de la caldera
$n_{int}$	Eficiencia del intercambiador del biodigestor
Nm <sup>3</sup>	Normal metro cúbico
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrógeno
OyM <sub>t</sub>	Costo de operación y mano de obra
p	Presión requerida [BAR]
$P_{agi}$	Potencia requerida por el agitador
$P_{gen}$	Potencia generada por el biogás disponible
$P_l$	Profundidad de la laguna
$P_r$	Potencia de recirculación
$P_{sal}$	Potencia de salida de los compresores y sopladores
PCI <sub>bio</sub>	Potencial Inferior del Biogás
pH	Potencial de hidrógeno
POME	Aguas residuales de plantas de beneficio de aceite de palma
PRI	Periodo de recuperación de la inversión
$Q_{afl}$	Caudal de los afluentes
$Q_{bc}$	Caudal de biogás para combustión
$Q_{bio}$	Caudal de biogás generado
$Q_{efl}$	Caudal de los efluentes
$Q_{gnd}$	Calor transferido al suelo
$Q_{int}$	Calor requerido para mantener la temperatura interior
$Q_{max}$	Caudal máximo de biogás quemado por la unidad
$Q_{tot}$	Calor total a suministrar

%R	Porcentaje de remoción
$R_{nr}$	Reembolso no recuperado de la inversión al iniciar el año
$R_{ter}$	Resistencia térmica
SI	Sistema internacional de medidas
SST	Sólidos Suspendidos Totales
$T_{gnd}$	Temperatura del suelo
$T_{int}$	Temperatura interna requerida
$t_R$	Tiempo de recuperación total
TIR	Tasa interna de retorno
TRH	Tiempo de retención hidráulico
UAB	Universidad autónoma de Barcelona
UPME	Unidad de planeación minero energética
$V_t$	Volumen total del biodigestor
VAN	Valor actual neto
VB	Visual Basic
W	Vatios

# Capítulo 1

## PLANTEAMIENTO Y ESTRUCTURA DEL PROYECTO INTEGRADOR

### 1.1. Descripción del problema

En la actualidad, varias empresas enfocadas a la agroindustria o ganadería ecuatoriana no disponen de un manejo adecuado de sus efluentes, los cuales, sin un previo tratamiento facultativo, representan un considerable riesgo e impacto negativo para los cuerpos hídricos aledaños, reflejándose en un deterioro para el medio ambiental [1]. Por ello, tanto empresas nacionales como internacionales se han dedicado a la implementación de alternativas para el tratamiento de estos desechos y contribuir al cumplimiento de las normativas ambientales existentes como la norma técnica para el control de descargas líquidas de sectores productivos, propuesta por la Cámara de Industrias y Producción (CIP), la cual busca limitar la concentración de contaminantes presente en los efluentes líquidos de origen tanto industrial, comercial como de servicios, que son vertidos a cuerpos de agua [2].

En Ecuador, las agroindustrias dedicadas al cultivo de palma africana representan cerca del 4% del producto interno bruto. De igual manera, el aceite que se extrae constituye el séptimo producto agrícola de exportación en el país. La producción de palma africana en el año 2018 fue de cerca de 2,785,756 ton [3]. Los cultivos más significativos se encuentran en la provincia de Los Ríos, Esmeraldas y Sucumbíos. Con esta actividad se generan aproximadamente 6,872,469 ton de residuos de palma africana al año [4].

El sector agroindustrial dedicado al cultivo de palma africana ha presenciado en los últimos años problemas de rentabilidad, causado por plagas en los cultivos, ausencia de regulación en el precio de comercialización y la escasez en inversión y financiamiento para aplicaciones de tecnología.

Otro punto negativo es el impacto ambiental que presenta el procesamiento de la palma aceitera. En varios estudios se determinó que el procesamiento de la palma aceitera emite residuos en los tres estados de la materia: gaseosos (gases

contaminantes), líquidos (efluente de las fábricas de aceite de palma o POME), y sólidos (fibra resultado de la prensa de palma, paja, cáscara de almendra de palma, e incluso racimo de fruta vacío) [5].

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

Analizar las metodologías aplicadas al aprovechamiento energético de la biomasa de los afluentes, mediante la implementación de un proceso biodigestivo en una plantación ecuatoriana productora de aceite de palma, para el conocimiento de la factibilidad del proceso

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Identificar las metodologías existentes en el aprovechamiento energético para la selección de la tecnología apropiada al caso de estudio.
- Diseñar un biodigestor con las dimensiones requeridas para el máximo aprovechamiento energético de la planta.
- Proponer la metodología que mejor se adapte al caso de estudio para la optimización de recursos ambientales y económicos mediante el desarrollo de una herramienta computacional.

## 1.3. Justificación del problema

La agroindustria palmicultora tiene la necesidad de dar tratamiento a sus desechos, puesto que en promedio generan alrededor de 0.84 m<sup>3</sup> de aguas residuales por cada tonelada de fruto fresco, que terminan en cuerpos hídricos, contribuyendo a la contaminación medioambiental [6]. Debido a ello, una solución que se ha implementado en los últimos años, a nivel internacional, para el tratamiento de estos desechos, consiste en el aprovechamiento energético que se puede obtener al tratar el POME [7]. Con el desarrollo de esta tecnología, las industrias de la palma han logrado poco a poco opacar los puntos negativos que presentan, llegando a ser considerado un rubro rentable, por los beneficios que resultan de su implementación (los cuales pueden ser cuantificados), y un sistema más amigable con el medio ambiente [8].

Se obtiene un doble beneficio: el tratamiento y descontaminación de estos líquidos residuales y, como subproducto, un combustible compuesto mayoritariamente por una mezcla de metano y dióxido de carbono, catalogado como biogás. Este combustible posee un elevado potencial energético, que lo vuelve una atractiva fuente de energía alternativa para la generación tanto de electricidad como de calor.

En proyectos anteriores o similares, la energía generada se ha utilizado para autoconsumo de la demanda energética que se comprende tanto en los procesos de extracción del aceite del fruto de la palma, como en la instrumentación involucrada en el correcto funcionamiento del sistema. La energía excedente puede ser vendida y suministrada a la red eléctrica, como se ha realizado en otros países latinoamericanos tales como Colombia, Perú, Brasil, Guatemala y Honduras [9].

Esta investigación propone analizar las metodologías orientadas al aprovechamiento energético de POME, cuantificando cada uno de los beneficios que se obtienen tras la implementación de un sistema de tratamiento acorde con las características productivas de nuestro caso de estudio ecuatoriano, la empresa extractora de aceite de palma PROPALMIN CIA.LTDA. Por otro lado, desde un parorama general, con este trabajo se pretende presentar al sector palmero ecuatoriano una información actualizada y detallada que le facilite la toma de decisiones a la hora de invertir en sistemas alternativos de energía y tratamiento de efluentes.

Se desarrollará una herramienta computacional sencilla y fácil de utilizar, con la finalidad de facilitar el dimensionamiento del biodigestor, los parámetros constructivos que comprende su sistema de control, y la cuantificación de cada uno de los beneficios que se obtienen en la implementación de las metodologías basadas en el aprovechamiento energético.

## **1.4. Estructura del proyecto**

Para el desarrollo del presente proyecto, se ha estructurado un formato que constará de cinco capítulos cuyos contenidos se describen de manera sustancial a continuación.

En el capítulo 1, se expone la información concerniente al planteamiento y descripción de la problemática de la investigación, así como también los posibles alcances y objetivos que se cumplirán al finalizarlo.

En el capítulo 2, se expone el marco teórico para una mayor comprensión del proyecto, explorando diferentes literaturas que permitan contextualizar el estudio realizado. Además, se realiza una introducción sobre los conceptos y procesos que hacen referencia al cultivo de la palma africana, con la finalidad de exponer de manera clara las fases que se ejecutan para la extracción del aceite y el aprovechamiento del POME. Posteriormente, se expondrá acerca del proceso involucrado en la producción de biogás mediante el uso del POME; el funcionamiento de los biodigestores, los tipos de construcción y operación existentes, y la instrumentación necesaria en su desempeño. Con este preámbulo, se dará a conocer las tecnologías aplicables para el aprovechamiento del POME, detallando los diversos tipos de convertidores eléctricos que pueden implementarse.

En el capítulo 3, se expondrán los antecedentes de la empresa extractora de aceite

de palma, que constituye nuestro caso de estudio, identificando las metodologías existentes en el aprovechamiento energético para la selección de la tecnología apropiada para esta empresa; también, se diseñará un biodigestor con las dimensiones requeridas para el máximo aprovechamiento energético de la planta, y finalmente, se hará la propuesta que mejor se adapte para el caso de estudio para la optimización de recursos ambientales y económicos, mediante el desarrollo de una herramienta computacional.

En el capítulo 4, se realiza el análisis de los resultados sobre las metodologías aplicadas al aprovechamiento energético, así como también la implementación de un proceso biodigestivo de una plantación ecuatoriana de palma de aceite, y el conocimiento de la factibilidad de este proceso.

En el capítulo 5, se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo de materia integradora, estableciendo conocimientos valiosos y aportaciones de nuestro caso de estudio.

# Capítulo 2

## MARCO TEORICO

### 2.1. Cultivo de palma africana

La palma africana, también llamada palma aceitera o *Elaeis guineensis*, es un recurso vegetal oleaginoso con altos niveles de triglicéridos, perteneciente a la familia de los Palmaceae y originaria de países africanos, cuya popularidad y potencial energético se deriva en la producción de la mayor cantidad de aceite por unidad de superficie [10].

Para tener un buen nivel de productividad, esta planta requiere ser cultivada en suelos profundos y de alto drenado, en altitudes de hasta 400-500 msnm, en zonas tropicales cálidas-húmedas cuya temperatura se encuentre rondando los 22 - 28 °C. Para su crecimiento, se necesita de grandes cantidades de agua, por lo cual, es conveniente que la precipitación pluvial anual sea de por lo menos 1,800 mm [11].

En estado natural, estas plantas pueden alcanzar alturas de hasta 40 m cuando el tronco se encuentra completamente erecto. No obstante, en cultivos industriales enfocados a la extracción del aceite, su crecimiento se limita a alturas de hasta 10-15 m. El tronco se desarrolla en un periodo de entre 3 años a 4 años, y su tasa de crecimiento anual varía entre los 25-45 cm [12]. En condiciones ideales, una palma africana puede producir entre 80-230 kg de racimos por cosecha y engendrar frutos en periodos de 3 años. Su productividad puede llegar a durar 50 años, llegando a sus puntos cúspides entre los 7-10 años de vida [10].

#### 2.1.1. Evaluación productiva

Para que su cultivo sea económicamente rentable, es requerible que sea cultivado en grandes extensiones de tierra, considerando que en una hectárea de terreno es posible plantar en promedio 140 unidades, los cuales en condiciones óptimas, pueden llegar a producir hasta 20 toneladas por año, de los cuales se puede llegar a extraer el 25 % de aceite, es decir, cerca de 5 toneladas.

Este cultivo debe garantizar una alta productividad, con lo cual se pueda justificar los costos que comprenden la inversión inicial, la inserción de la plantación, su

cosecha y transporte, redes de distribución del producto, el posible establecimiento de plantas procesadoras; entre otros eventuales costos [10].

### 2.1.2. Impacto ambiental

La expansión de las plantas de palma africana, según un estudio realizado en el año 2017 en la ICTA-UAB de Guatemala [13], se ha convertido en una problemática de impacto ambiental, a nivel global, por los efectos que conlleva su cultivo a gran escala. Los científicos advierten que este tipo de cultivos producen daños devastadores en los suelos, provocando que grandes áreas de terreno se vuelvan infértiles en un periodo que ronda los 25 años o que, en el peor de los casos, se conviertan en tierras completamente inutilizables. Este crecimiento puede observarse más específicamente en países que comprenden el Sudeste Asiático y América Latina, en donde las plantaciones están substituyendo en un 40 % a los bosques tropicales, y un 32 % en lo que respecta a pastos naturales y áreas en donde se cultivan granos [13].

## 2.2. Aceite crudo de palma africana

El aceite es extraído del fruto de la palma, más específicamente, de su mesocarpio; mediante una serie de procesos mecánicos. Este líquido está compuesto por una mezcla de triglicéridos, ácidos grasos saturados e insaturados, vitaminas, cierta cantidad de agua y antioxidantes tales como el caroteno. El aumento gradual de su productividad a nivel mundial lo han posicionado como una opción factible que cumple con las especificaciones de producto requeridos en el campo de fabricación de combustibles, plásticos, cosméticos, entre otros; convirtiéndolo en un recurso de gran interés para el desarrollo de las industrias de manera general [11]. El biodiesel es un combustible derivado del aceite de palma que ha despertado el interés en las grandes industrias en los últimos años debido por el gradual aumento en la escasez de combustibles fósiles [14].



Figura 2.1: Fruto de aceite de palma o aceite rojo  
Fuente: [Elaboración propia]

### 2.2.1. Evolución de los precios del aceite de palma

Una de las principales razones por las que empresas durante la última década realizaron sus aportaciones en el negocio de la palma africana, es la rentabilidad económica tanto por sus características (véase tiempo de vida, tecnologías involucradas, etc.), como por el incremento de la demanda a nivel mundial [10]. Según los datos de la CIF [15], el precio internacional del aceite crudo de palma alcanzó su punto cúlmine de 1,300 US\$ en enero del 2011. En la Figura 2.2 se puede observar la evolución y decadencia de los precios, los cuales han estado oscilando entre un valor de más de 400 US\$ a menos de 1,200 US\$. También se puede observar que para la fecha actual (junio del 2020), el precio de este aceite vegetal se encuentra rondando los 600 US\$.



Figura 2.2: Evolución del precio internacional del aceite (2010-2020)

Fuente: [15]

### 2.2.2. Extracción de aceite de palma

En Latinoamérica, Ecuador se ubica como el segundo país con mayor producción de aceite de palma africana [16]. Esta actividad es desarrollada por alrededor de 68,000 palmicultores, distribuidos en 54 cantones del país [17]. Cerca de 120,000 familias están relacionadas al sector palmicultor [3].

Las plantas de extracción de aceite de palma son instalaciones que procesan la fruta de palma mediante diversas operaciones, como se muestra en la siguiente Figura 2.4.

En la Figura 2.4, se visualiza un diagrama de flujo correspondiente a los procesos involucrados en la extracción de aceite mediante el cultivo de palma africana. En [18] se detalla cada parte del proceso:

- **Recolección:** Este proceso corresponde a la recopilación del fruto de la palma africana, para ser transportada en camiones desde los sembríos hasta las ins-

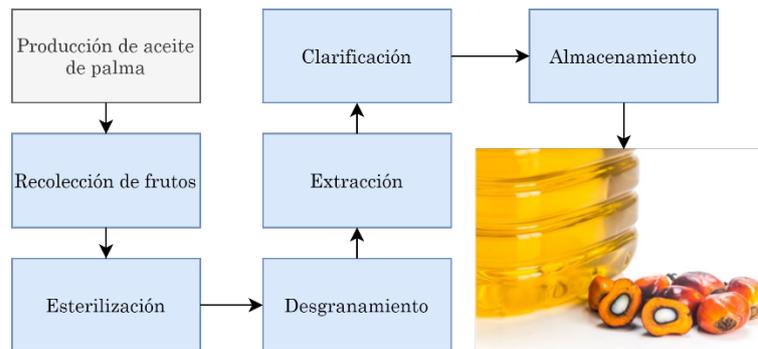


Figura 2.3: Proceso de extracción de aceite de palma africana

Fuente: [Elaboración propia]

talaciones de la planta extractora donde se realiza el registro del peso de la fruta.

- **Esterilización:** La fruta es expuesta a vapor de agua a alta presión. El tiempo de la exposición varía de acuerdo con el tamaño y estado de maduración de los racimos. El resultado de este proceso contribuye en mayor medida a la producción de efluentes que contienen impurezas de materia orgánica.
- **Desgranamiento:** Los racimos son des-frutados. El proceso se realiza por medio de un tambor separador compuesto por espigones para no desaprovechar el fruto.
- **Extracción:** Para obtener el aceite es preciso exponer a presión el fruto para romper la capa del mesocarpio. La presión a utilizar tiene que ser adecuada, caso contrario las nueces y almendras presentarán ruptura.
- **Clarificación:** Esta fase se desarrolla mediante una serie de subprocesos como son: la dilución del aceite crudo en agua, sedimentación estática para remover el lodo presente por las impurezas de la materia orgánica, deshidratación para cumplir con el rango de humedad sin que exista peligro de oxidación de los tanques.
- **Almacenamiento:** Consiste en mantener el aceite de palma en reservorios hasta que sea despachado, el tanque de almacenamiento debe tener limpieza periódica para evitar la acumulación de los residuos de materia sólida en el fondo.

## 2.3. Manejo y tratamiento de efluentes

### 2.3.1. POME

Según un estudio realizado por profesionales de la Universidad Central del Ecuador a cinco empresas extractoras de aceite de palma ubicadas en las provincias de Pichincha, Santo Domingo y Esmeraldas [19]; la producción de aguas residuales

varía en función de la capacidad de procesamiento y características de cada planta extractora.

Los efluentes o aguas residuales de plantas de beneficio de aceite de palma (catalogados por sus siglas en inglés como POME), requieren de un tratamiento previo a su uso ya sea si está destinado para riego o para descarga en los cauces de agua aledaños. Las plantas extractoras de aceite de palma producen grandes cantidades de estas aguas residuales, sobre todo en el proceso de esterilización del fruto y en la clarificación del aceite. En promedio, una planta típica produce un aproximado de 0.8 m<sup>3</sup> de POME /ton de racimos de fruta fresca (también denominado como FFB por sus siglas en inglés) [20].

Una planta extractora de mediano tamaño procesa en promedio unas 150,000 toneladas de FFB por año, los cuales producen aproximadamente 120,000 m<sup>3</sup> de POME en ese mismo periodo, lo cual equivale a 450 m<sup>3</sup> por día. Este volumen comprende una producción de más de cuatro piscinas de tamaño olímpico de dimensiones 50 x 25 x 2 m<sup>3</sup> por mes [20].

Entre las características cualitativas del POME, se encuentra su color, el cual denota una combinación entre marrón y amarillo. Los problemas que presenta el POME son el bajo nivel de pH, elevada temperatura y carga excesiva de sólidos. En lo concerniente a sus características más agresivas, se encuentra la presencia de una alta proporción de carga orgánica.

La contaminación que causan estos efluentes se mide en términos de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), que representa la cantidad de oxígeno requerido para que la actividad bacteriana pueda oxidar toda la materia orgánica que contiene dicho efluente, o por la demanda química de oxígeno (DQO), la cual presenta generalmente proporciones similares a la DBO, y es más sencilla su medición.

Tabla 2.1: Características fisicoquímicas de los efluentes.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Valores promedios
Demanda bioquímica de oxígeno (5 días)	DBO	mg/L	25,000
Demanda química de oxígeno	DQO	mg/L	55,000
Potencial de Hidrógeno	pH		4-5
Temperatura		°C	80

Fuente: [20] [21]

### 2.3.2. Tratamiento del POME

Los tratamientos más típicos son realizados en lagunas abiertas. Estos sistemas, mediante un buen diseño y mantenimiento, pueden reducir la DQO de los efluentes a valores de rondan los 1,500 mg/L, es decir, una pequeña fracción de lo que se tuviese

sin un previo tratamiento. Su principal ventaja es su bajo costo en comparación con sistemas semejantes con mayor complejidad. Son estáticos, en general, sin mezcla interna ni temperatura controlada. Por ello, este sistema no dispone de las condiciones ideales para que las bacterias que comprenden los efluentes puedan interactuar en el proceso de digestión anaeróbica, lo cual lo convierte en una propuesta ineficiente, considerando además la alta emisión de gases de efecto invernadero al no presentar las piscinas una cubierta o corona que las retenga. Los tratamientos modernos son más sistemáticos y automatizados, los cuales han evolucionado desde comprender sistemas simples de lagunas carpadas hasta sistemas más avanzados de múltiples etapas [20].

En el tratamiento para mejorar las características del POME se emplean cubiertas construidas con plástico de polietileno de alta densidad [22], o por sus siglas en inglés, HDPE (High Density Polyethylene); con el objetivo de poder capturar el mayor volumen de biogás. Este tratamiento es considerado como un sistema simple con la mejor relación calidad y cantidad de biogás. La vida útil es de alrededor de 7 a 10 años.

Otro de los tratamientos aplicados al POME es la utilización de elementos para la remoción constante de lodos, estos reactores están contruidos de hormigón, permiten mejorar la calidad y cantidad del biogás, sin embargo, no son comúnmente empleados por la gran inversión inicial.

El tratamiento multietapas permite mejorar la eficiencia en la captación del biogás. Emplea un reactor de mezcla continua para reducir la demanda química de oxígeno, y después dirigir el POME a un reactor ascendente para la incorporación de bacterias. El proceso es eficiente, sin embargo, el estudio para la aplicación de esta tecnología es complejo.

## 2.4. Biodigestor

Un biodigestor es una estructura hermética que permite el tratamiento de materia orgánica sin presencia de oxígeno. Pueden ser desde tanques de concreto o metal, hasta lagunas de tierra cubiertas de geomembranas que generalmente son de HDPE [7] [22]. En el recipiente es posible realizar la carga y descarga, con el objetivo de fermentar de manera anaeróbica los residuos orgánicos producto de las actividades ganaderas o agrícolas, para obtener biogás y abono capaz de enriquecer al suelo de nutrientes.

El uso de biodigestores contribuye a solucionar el problema de gases de efecto invernadero, debido al reciclaje de desperdicios orgánicos, ya que, con el aprovechamiento de este, se logra minimizar los olores, gérmenes y patógenos, mejorar las condiciones sanitarias, reducir la afectación de cuerpos de agua a causa del vertimiento de desechos, y proteger al suelo por medio del bioabono [23].



Figura 2.4: Vista General de un biodigestor de grandes dimensiones.

Fuente: [22]

### 2.4.1. Parámetros para el dimensionamiento de un biodigestor

Para realizar el dimensionamiento del biodigestor es necesario conocer los siguientes aspectos:

**Tiempo de retención hidráulico:** Es el tiempo en que tardan los sustratos en permanecer dentro del biodigestor, que depende del volumen de la carga orgánica y la temperatura del proceso, donde este último es inversamente proporcional [24].

**Volumen del biodigestor:** Este se determina a través del tiempo de retención hidráulica y el caudal de la carga orgánica a introducir. Para el análisis se considera un porcentaje de seguridad del 20 % para el volumen calculado [25].

### 2.4.2. Proceso de digestión anaeróbica

Según el manual del biogás [26], el proceso de digestión anaeróbica comprende la degradación de la materia orgánica por medio microorganismos para la obtención del biogás. La materia orgánica reciclada empleada en el proceso son los residuos de las actividades agrícolas, estiércol de ganado, y efluentes de diversas industrias, el tratamiento de estos resulta los subproductos.

La etapa de fermentación consiste en catabolizar de los residuos orgánicos en un ambiente sin oxígeno atmosférico por medio de microorganismos o por medio de reacciones químicas. Para la ejecución de las etapas se requiere controlar los parámetros ambientales en especial la temperatura. Los procesos que involucran la etapa de fermentación son los citados a continuación:

#### 2.4.2.1. Hidrólisis

El inicio de la fermentación se da con la hidrólisis, consiste en solubilizar los sustratos por medio de microorganismo hídricos para lograr la desintegración de

lípidos y polímeros, la velocidad del proceso depende del contenido sólido del sustrato. En este proceso, a partir de las proteínas, carbohidratos y lípidos presentes en la materia orgánica, se obtienen aminoácidos, azúcares, ácidos grasos, dióxido de carbono y alcoholes. Un aspecto importante a considerar para el desarrollo de la hidrólisis es mantener el pH dentro del rango de 5.3 a 6.7 [26].

### 2.4.2.2. Acidogénesis

En esta parte de la fermentación intervienen las bacterias hidrolíticas-acidogénicas y las acetogénicas para obtener ácidos orgánicos, esto sirve como alimento para el grupo de bacterias y para eliminar cual cantidad de oxígeno existente [23]. Para el desarrollo de este proceso es necesario tener el potencial de hidrógeno en el rango de 5.5 a 6.7. Como resultado del proceso se obtiene la aparición de gases como dióxido de carbono, ácido sulfhídrico y amoníaco.

### 2.4.2.3. Acetogénesis

En esta etapa el etanol, ácidos grasos volátiles y compuestos amoníacos son transformados en productos más sencillo como los acetatos e hidrógenos, gracias a las bacterias acetogénicas [27].

### 2.4.2.4. Metanogénesis

Las bacterias arqueas metanogénicas se encarga de obtener metano y dióxido de carbono del material resultante de las etapas anteriores, para mantener el crecimiento de estas bacterias adecuadas se precisa tener un pH en el rango de 6.6 a 7.6. Después del proceso de fermentación, el producto resultante contiene entre 40 % a 70 % de metano y dióxido de carbono acompañado con otros gases en menor medida [28].

## 2.4.3. Componentes de un biodigestor

Para poder desarrollar el proceso de digestión anaeróbica para obtener biogás a partir de los efluentes, es necesario identificar los elementos de un biodigestor, según el manual del biogás [26] los biodigestores están compuestos por:

### 2.4.3.1. Reactor

El reactor es la estructura donde se desarrolla la digestión anaeróbica, tiene como objetivos mantener la materia orgánica en su interior libre de oxígeno con la temperatura apropiada para el desarrollo de todas las etapas de fermentación y recopilar los gases generados.

#### **2.4.3.2. Cámara de entrada**

La cámara de entrada permite el ingreso de los materiales orgánicos para ser incorporados en el reactor para el proceso de digestión, generalmente se encuentran ubicadas a un nivel superior que el reactor

#### **2.4.3.3. Cámara de salida**

En la cámara de salida se obtiene material fertilizante obtenido a partir de los procesos en el reactor, generalmente está ubicado a menor nivel que el reactor.

#### **2.4.3.4. Extracción de lodos**

En el centro del reactor existen conductos para extraer el lodo al sistema de evacuación.

#### **2.4.3.5. Sistema de gas**

El producto de la digestión anaeróbica son distintos tipos de gases, está compuesto por varios elementos en los que cabe mencionar:

- Cúpula: Lugar donde se almacena el biogás generado.
- Válvulas de seguridad: Permiten la regulación de la presión dentro del tanque para evitar colapsos del sistema.
- Apagallamas: Permite proteger de posibles riesgos de explosión o incendio, eliminando las fuentes de ignición por medio de enfriamiento a través de deflectores.
- Condensador: Se emplean sistemas que recojan el vapor de agua generado para permitir la circulación del gas en el digestor
- Separador de sedimentos: Permite la retención de sedimentos para evitar que ingresen en el almacenamiento del gas.
- Antorcha: Es un elemento de seguridad que permite que los excesos de gas sean eliminados por medio de la quema controlada.

#### **2.4.3.6. Muestreador**

Es una tubería destinada para realizar el muestro de los lodos del biodigestor sin afectar la presión y el estado anaeróbico.

#### **2.4.3.7. Sistemas de calentamiento**

El tiempo para la digestión depende de la temperatura, el sistema de calentamiento se encarga de mantener las condiciones óptimas en el proceso por medio de la recirculación de lodos por intercambiadores de agua.

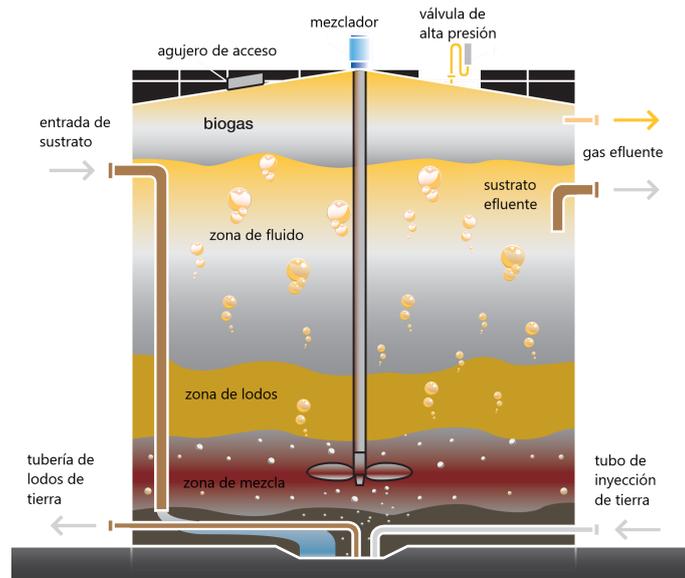


Figura 2.5: Componentes generales de un biodigestor.

Fuente: [29]

### 2.4.4. Modelos operacionales

Existen diversas aplicaciones para los biodigestores, puesto que pueden tratar distinta materia orgánica. A continuación, se presentan los tipos de biodigestores de acuerdo al manual del biogás [26].

#### 2.4.4.1. Continuo

Estos tipos de biodigestores son empleados para tratar materia orgánica proveniente del sector ganadero o industrial, porque permite la entrada de cargas poco diluidas, y no requiere de estudio exhaustivo para la puesta en marcha.

#### 2.4.4.2. Discontinuo

La materia orgánica es ingresada para dirigirse al reactor para cumplir con el proceso de digestión. A término del proceso el biodigestor es vaciado, y la carga se realiza por lote. Este tipo de digestor es también llamado Batch, el cual es denominado para referirse a un proceso realizado por lotes.

#### 2.4.4.3. Semi-continuo

Es empleado para industrias con cantidades de efluentes mayores. La materia orgánica se adiciona de manera gradual funcionando como tipo discontinuo, donde una vez lleno, opera como digestor continuo. Posee menor rendimiento en comparación con los dos tipos presentados anteriormente.

### 2.4.5. Modelos de diseño

Considerando los modelos expuestos por el Ministerio de Agricultura de Argentina [30], se presentan los siguientes tipos de diseño para transformar la biomasa de los residuos en biogás:

#### 2.4.5.1. Flujo Pistón

Son empleados para sustratos viscosos con altas cantidades de sólidos. Están compuestos por tanques rectangulares o tubulares, y trabajan circulando materia digerida con fresca realizado con o sin agitación mecánica.

#### 2.4.5.2. Mezcla Completa sin Recirculación

Es un biodigestor cilíndrico con la característica de permitir la distribución uniforme del sustrato y las bacterias, ya que posee un mecanismo para la agitación. Es utilizado para el tratamiento de biomasa residual, y el tiempo de retención hidráulico es mayor debido a que se encuentra estacionario por no existir circulación.

#### 2.4.5.3. Mezcla Completa con Recirculación

Estos tipos de biodigestores son llamados también de contacto. La recirculación permite reducir el tiempo de retención hidráulico y ser aplicado para grandes cargas orgánicas.

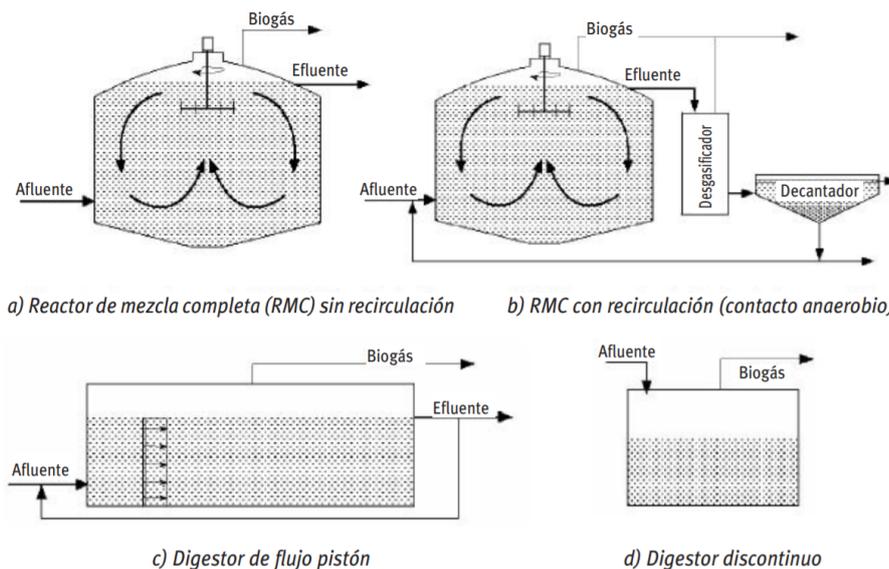


Figura 2.6: Modelos de diseños de reactores.

Fuente: [31]

## 2.5. Biogás

El biogás es un gas compuesto obtenido a partir de la materia orgánica como materia prima. La conversión se realiza a través de un proceso de biodegradación en medio anaeróbico. Comúnmente se emplea la digestión anaeróbica, ya que mejora la obtención de energía y la producción de fertilizantes. A continuación, se presenta una figura que diversifica la proporción de los gases que lo conforman:

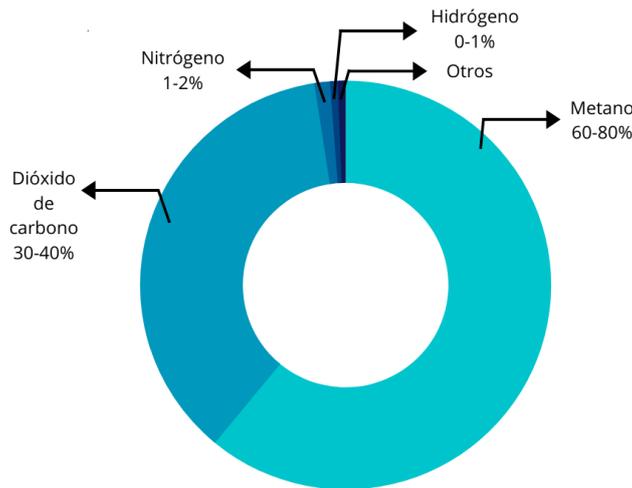


Figura 2.7: Composición química del biogás.  
Fuente: [Elaboración propia]

### 2.5.1. Aplicaciones del Biogás

#### 2.5.1.1. Generación de Calor

El biogás sirve de combustible para generar calor, siendo empleado en hornos y calderas. Es ideal para lugares con carencia de combustibles. La energía térmica disponible puede ser aplicada tanto para la cocina como para calefacción, considerando que para poder emplearse en quemadores, el biogás debe ser de alta calidad [26].

#### 2.5.1.2. Generación de energía eléctrica

Existe potencial para generación de electricidad, a partir del biogás que puede obtenerse a partir de sector pecuario y agroindustrial. Mediante ciclos combinados es posible la obtención de la electricidad producida por el biogás y el calor por el proceso de combustión. De acuerdo a la aplicación, se define si se requiere generar principalmente electricidad o calor. Cuando se emplea este tipo de sistema la eficiencia aumenta en comparación con la ejecución de los procesos por separado.

Existen distintos métodos para la obtención de energía eléctrica, entre los cuales

se encuentran: la turbina o micro-turbina de gas y los motores de combustión interna [25].

### 2.5.1.3. Iluminación

Es posible obtener iluminación por medio de lámparas domésticas con eco-combustible, reemplazando el uso del queroseno principalmente en el sector rural, contribuyendo a reducir la contaminación [25].

### 2.5.1.4. Transporte

Esta tecnología en desarrollo permite emplear el biogás como combustible para vehículos, se emplea biogás de alta calidad con vehículos acondicionados para funcionar con este combustible pudiendo ser motores de combustión interna, el problema de esta aplicación radica en la autonomía [26].

## 2.5.2. Clasificación de las plantas de biogás

Las plantas de biogás se clasifican de acuerdo a la potencia generada, esto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2.2: Tipos de plantas de Biogás.

Plantas de Biogás	
Pequeña	Potencia $\leq 180kW$
Mediana	$180 kW \leq Potencia \leq 900kW$
Grande	Potencia $>900 kW$

Fuente: [26]

En la Tabla 2.2, se detalla el rango de potencias para considerar el tamaño de la planta. Para determinar la potencia generada, se debe conocer el caudal del biogás y el potencial calorífico inferior del CH<sub>4</sub>, que según [32], es de 11.08 kWh/m<sup>3</sup>. El poder calorífico del biogás corresponde al porcentaje de CH<sub>4</sub> que presente en su composición.

## 2.5.3. Tecnología para la Generación Eléctrica

### 2.5.3.1. Turbinas a gas

Las plantas que emplean turbinas de gas comprenden como principal elemento motriz una turbina axial. El movimiento se da gracias al ingreso del biogás como combustible a elevados valores de temperatura y presión, logrando una eficiencia de hasta 40 %, que puede mejorar al emplear ciclo combinado. En la Tabla 2.3, se presenta información técnica sobre las turbinas de gas que utilizan biogás, catalogando el

tamaño con respecto a la capacidad de generación. Esta tecnología puede aplicarse para cualquier tipo de planta de biogás.

Tabla 2.3: Información técnica de la turbina a gas.

Eficiencia	25 a 40 %
Tamaño	100 kW - 50 MW
Emisiones de CO <sub>2</sub>	545-700 (kg/MWh)
Emisiones de NO <sub>x</sub>	2-5 (kg/MWh)

Fuente: [32]

### 2.5.3.2. Microturbinas a gas

Son turbinas de pequeñas dimensiones con la característica particular de poseer poca inercia, lo cual permite alcanzar mayores cargas en tiempos menores [33]. La obtención de energía se realiza a través de la combustión del biogás inyectado con mezcla de aire a altas presiones para obtener trabajo mecánico. La información técnica de esta tecnología se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 2.4: Información técnica de la microturbina a gas.

Eficiencia	25 a 35 %
Tamaño	20 kW - 500 kW
Emisiones de CO <sub>2</sub>	600-800 (kg/MWh)
Emisiones de NO <sub>x</sub>	0.01-0.07 (kg/MWh)

Fuente: [32]

### 2.5.3.3. Motor de combustión interna

El motor de combustión interna es la tecnología más usada para la obtención de energía eléctrica al partir del biogás porque posee mayor adaptación a otras aplicaciones.

Existen tipos de ciclos para el motor de combustión interna. Los que emplean ciclo Otto pueden operar sólo con biogás, sin embargo, para el arranque requieren de otro combustible, mientras que el ciclo diésel usa el biogás y diésel en diferentes proporciones siendo 60 % y 40 % correspondientemente [34].

En la Tabla 2.5, se observa que las emisiones son mayores en comparación con las demás tecnologías si se considera solo el límite superior expuesto.

Tabla 2.5: Información técnica del motor de combustión interna.

Eficiencia	35 a 45 %
Tamaño	100 kW - 3 MW
Emisiones de CO <sub>2</sub>	550-850 (kg/MWh)
Emisiones de NO <sub>x</sub>	2-20 (kg/MWh)

Fuente: [32]



Figura 2.8: Tecnologías para la conversión de energía.

Fuente: [35]

## 2.6. Bioabono

La producción de lodo biológico en los digestores es alta, por lo que en el caso de no purgarse, se puede apelmazar, afectando a lagunas siguientes, y saturando completamente el sistema. Por ello, en un artículo de la Revista Palmas [7], se proponen diferentes formas de aprovecharlo para aumentar la productividad del cultivo de palma.

Entre las principales técnicas de manejo y aprovechamiento de estos lodos resultantes del proceso de digestión anaeróbica se encuentra la fertirrigación. Este método consiste en aplicar simultáneamente agua y fertilizante a las plantaciones de palma aceitera, de esta manera, logrando una nutrición constante del suelo. El fertilizante correspondería al lodo tratado, pasando a llamarse bioabono.

Para la recuperación y mejora de los suelos, también se puede emplear otro de los residuos agroindustriales de palma africana: los racimos vacíos de la palma [7]. Esta alternativa complementa a la utilización del bioabono resultante del tratamiento de lodos residuales.

## Capítulo 3

# METODOLOGÍA Y CASO DE ESTUDIO

En el presente capítulo, se expone brevemente el proceso que comprende la extracción del aceite de palma de la planta de la empresa “PROPALMIN CIA.LTDA”, correspondiente a nuestro caso de estudio, y se plantean las metodologías que pueden utilizarse para el aprovechamiento energético del POME, partiendo desde los requerimientos para someter el POME a un proceso de digestión anaeróbica, hasta las tecnologías que permiten la generación de energía a suministrarse hacia los puntos de demanda eléctrica.

Se describirá el proceso de operación de la planta extractora, tomando como punto de partida la extracción de los racimos de fruto fresco (FFB), seguidos por la selección y descargue del mismo para su posterior esterilización. Se incluirá los equipos y las características eléctricas de cada equipo usado en los respectivos procesos, convergiendo a un resumen de la demanda total que comprende las instalaciones de la planta.

De la misma manera, se describen las etapas que comprende el proceso de digestión anaeróbica, las características y consideraciones del biodigestor, los componentes eléctricos/térmicos utilizados en el proceso y, finalmente, las metodologías basadas en el aprovechamiento energético del POME, las cuales serán introducidas en un programa que se elaborará mediante una programación VB (Virtual Basic) en la herramienta computacional Excel.

### 3.1. Resumen ejecutivo

PROPALMIN CIA.LTDA, es una empresa campesina agroindustrial ubicada dentro de los terrenos de la hacienda cacaotera con 100 años de vigencia, conocida como Bola de Oro, en la parroquia Santa Rosa de Flandes, cantón Naranjal, provincia del Guayas [36]. Esta empresa fue creada con la finalidad de producir y comercializar palma de aceite africana.

En la actualidad, la empresa dispone de 370 ha dedicadas al cultivo de palma africana, pero se proyecta que para el año 2021, tendrá cerca de 2100 ha de terreno entre cultivo de palma y de cacao. La inversión de la fase constructiva en la planta destinada al proceso de extracción del aceite, esta prevista en 30,000,000 US\$, con un costo anual tentativo de la fase de operación y mantenimiento de 20,000,000 US\$ [36].

El agua que provenga del proceso de extracción de aceite de palma se direccionará a un pozo de oxidación desde el primer día de operación de la planta.

El agua destinada para riego se captará de los ríos aledaños conocidos, mediante los respectivos sistemas de bombeo. Se estima que la planta consumirá un aproximado de 30 FFB/h, en turnos de 8 horas solo durante los primeros meses de operación, operando después de manera continua [36].

## 3.2. Antecedentes

### 3.2.1. Climatología

En el área del proyecto, la temporada de lluvia es muy caliente, opresiva y nublada y la temporada seca es caliente, húmeda y parcialmente nublada. Durante el transcurso del año 2019, según el informe ambiental expuesto en [36], la temperatura generalmente varió en un rango de 22°C a 32°C y rara vez bajó a menos de 20°C.

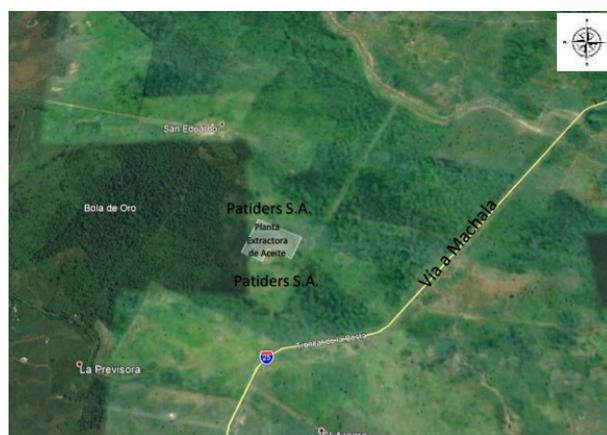


Figura 3.1: Ubicación de la planta.

Fuente: [36]

Según el informe expuesto en [37], la temperatura medioambiental máxima del aire a la sombra, durante la última década, fue de aproximadamente 31.4 °C, y la temperatura mínima de 20.8 °C, con una temperatura media de 25.7 °C. Estos datos se tomarán a consideración en el diseño del sistema biodigestor.

### 3.2.2. Hidrología

En el área de influencia del proyecto existe un estero llamado Estero Mina. Su ancho es de aproximadamente 30 m, con una profundidad menor a los 3 m, y con un

caudal relativamente bajo [36].

#### 3.2.3. Topografía

El cantón Naranjal dispone de tierras fértiles, ganado, maíz, banano y cacao, entre los productos más sobresalientes del país. Con respecto al sector donde se encuentra ubicado el proyecto, esta área tiene tierra agrícola [36].

### 3.3. Situación actual de la planta extractora de aceite

Actualmente, la planta extractora se encuentra en etapa constructiva. Se previó que el tiempo de construcción de la planta sería de aproximadamente doce meses, sin embargo, la suspensión del trabajo presencial dado por el decreto 1017, el 17 de marzo del 2020, ante la emergencia sanitaria contra la propagación de la pandemia del corona-virus Covid-19 en el país; ralentizó la construcción de la planta, posponiendo su culminación para al menos dos meses después del tiempo estimado.



Figura 3.2: Planta extractora en proceso de constructivo.

Fuente: [Elaboración propia]

El ciclo de vida que se prevé en la planta todavía es indefinido, ya que mientras su actividad genere ingresos y sea rentable para sus directivos, seguirá operando con normalidad, de manera continua.

#### 3.3.1. Descripción del proceso de extracción de la planta

A continuación, se describe brevemente las actividades que comprende cada fase del procesamiento de la planta extractora, desde la recepción del fruto hasta el almacenamiento y transporte de los productos resultantes.

##### 3.3.1.1. Recepción de fruto

Esta etapa consiste en la receptar y pesar los FFB del camión cargado, al entrar a los terrenos de la planta. De esta manera, los operadores tienen un control diario

sobre la materia prima disponible para procesar.

#### **3.3.1.2. Esterilización**

En esta etapa se somete el FBB a elevadas temperaturas y presión de vapor saturado durante periodos que fluctúan entre 65 - 90 min [38], dependiendo de la madurez que tenga el fruto. Durante este procedimiento, se obtienen los primeros efluentes, los cuales contienen residuos de aceite e impurezas como materia orgánica. La fruta esterilizada es evacuada a un transportador y llevada hacia digestores de fruto.

#### **3.3.1.3. Prensado**

Esta etapa consta de dos sub-etapas:

- La digestión, en donde el fruto esterilizado es sometido a una maceración a temperaturas que rondan los 90°C
- El prensado, en donde se extrae mecánicamente por presión el aceite contenido en la pulpa del fruto. En esta actividad, se adiciona agua muy caliente con el fin de ayudar a arrastrar el aceite y mantener la temperatura requerida. En esta sub-etapa, se produce una masa homogénea que consiste de fibra y nueces, los cuales son enviados mediante a una columna de separación una vez que se secan

La fibra seca es utilizada como combustible para la caldera, para producir vapor, que es utilizado para la generación de energía eléctrica mediante una turbina de vapor, permitiendo el auto abastecimiento energético de la planta. El calor del vapor es utilizado para los requerimientos térmicos de la planta (cogeneración). Las especificaciones de la turbina de vapor se muestran en la Figura 3.3.

#### **3.3.1.4. Clarificación**

En esta etapa, se retira el agua y las impurezas lodosas del aceite mediante un proceso de filtrado, decantación y centrifugación. Se precisan alcanzar en este procedimiento rendimientos altos de extracción de aceite con un mínimo de impurezas sólidas en el compuesto [36].

#### **3.3.1.5. Palmistería**

En esta etapa, se obtiene la almendra o palmiste del fruto de palma aceitera, para esto se somete la torta (fibra y nueces), que sale del proceso de prensado. La cascarilla es enviada a la caldera como combustible.

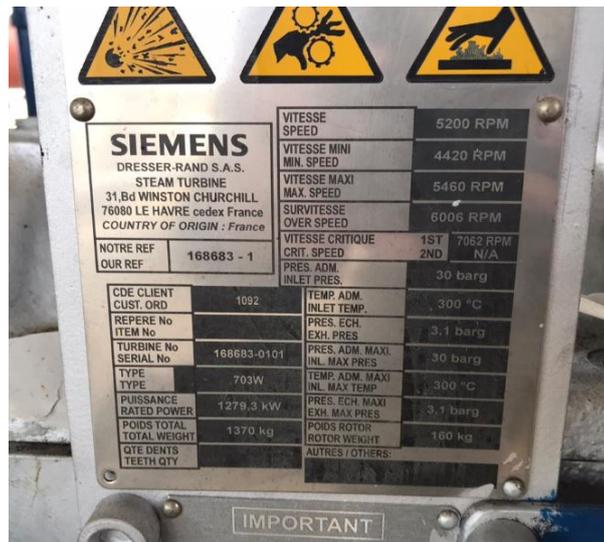


Figura 3.3: Datos de placa de la turbina de vapor.

Fuente: [Elaboración propia]

### 3.3.1.6. Almacenamiento y transporte del producto

El aceite crudo de palma obtenido del proceso de clarificación es almacenado en tanques, asegurando la más baja proporción de humedad, para que se preserve su calidad hasta la entrega a los respectivos distribuidores.

### 3.3.2. Demanda eléctrica de la planta

A continuación, se detallan los equipos que se van a utilizar durante la fase operativa de la planta, según las etapas de los procesos productivo presentados en el apartado anterior.

Tabla 3.1: Cargas de la Estación de Recepción de Fruto.

Estación de Recepción de Fruto				
Descripción	Cantidad	Potencia	Unidades	Conversion a kW
Rampa de Carga FFB	1	4	kW	4
Transportadores FFB	3	18.5	kW	18.5
Desgarrador	1	50	HP	37.3
Total en kW				59.8

Fuente: [36]

En la Tabla 3.5, se muestra un resumen de la demanda total que comprende la planta extractora por cada fase operativa presentada. La etapa con la mayor demanda energética es la de trilla y prensado.

Según [36], se establece una capacidad instalada en base a un factor de planta del 80 %. Esto resulta en una demanda que ronda los 500 - 800 kW, que será abastecida

Tabla 3.2: Cargas de la Estación de Esterilización.

Estación de Esterilización				
Descripción	Cantidad	Potencia	Unidades	Conversion a kW
Bomba de pozo condensado	2	5.5	HP	4.1
Transportador para Manojos Esterilizados	1	15	Kw	15
Total en kW				19.1

Fuente: [36]

Tabla 3.3: Cargas de la Estación de Trilla y Prensado.

Estación de Trilla y Prensado				
Descripción	Cantidad	Potencia	Unidades	Conversion a kW
Desfrutador	1	22.5	HP	16.8
Transportador para Manojos Esterilizados NO 1	2	22.5	kW	22.5
Trituradora de racimos vacíos	1	37	kW	37
Prensa de racimos vacíos	1	100	HP	74.6
Transportador debajo del desfrutador	1	4	HP	3
Elevador Fruta	1	7.5	HP	5.6
Transportador de Alimentación del Digestor	1	4	kW	4
Motor eléctrico del Digestor	2	45	Hp	33.6
Prensa de Tornillo	2	45	kW	45
Bomba de aceite en crudo	2	5.5	HP	4.1
Tamiz Vibrador	4	2.2	HP	1.6
Bomba de aceite residual	2	5.5	HP	4.1
Transportador Rompe Torta	2	7.5	HP	5.6
Exclusa de ciclón de fibra	1	4	HP	3
Tambor pulidor de nueces	1	4	kW	4
Elevador de nueces	1	4	HP	3
Sistema despedregador de nueces	1	15	kW	15
Molino de martillos	3	15	HP	11.2
Transportador de mezcla quebrada	1	3	HP	2.2
Elevador de mezcla quebrada	1	4	HP	3
Sistema de separación de mezcla quebrada en seco	1	2	HP	1.5
Transportador de granos mojados	1	3	HP	2.2
Elevador de granos húmedos	1	4	HP	3
Silo de Palmiste	1	25	HP	18.7
Transportador de granos secos	1	3	HP	2.2
Total en kW				326.5

Fuente: [36]

por el generador acoplado a la turbina de vapor. Vale la pena recalcar, que esta unidad generadora podrá suplir otras demandas externas o no a la planta, que no se consideraron en las tablas mostradas en este apartado.

Las instalaciones también dispondrán de un generador eléctrico a diésel que va a ser utilizado tanto para casos de emergencia como para dar arranque a la planta una vez que entre en operación.

Todo el POME resultante de la planta se direccionará a un pozo de oxidación

Tabla 3.4: Cargas de la Sala de Calderas.

Sala de Calderas				
Descripción	Cantidad	Potencia	Unidades	Conversion a kW
Transportador de fibra/conchas	1	5.5	HP	4.1
Transportador de combustible de la caldera	1	5.5	kW	5.5
Tanque de clarificación	1	4	HP	3
Pre-limpiador de lodos y bomba	4	15	HP	11.2
Separadores de lodo ALFA LAVAL	2	45	kW	45
Bomba de aceite recuperado	2	3	HP	2.2
Bomba de aceite recuperado del pozo	2	4	HP	3.0
Bomba de pozo de lodos	2	7.5	HP	5.6
Bomba de agua caliente del Tanque de equilibrio	1	3	HP	2.2
Decantador	1	55	kW	55.0
Bomba de despacho de aceite	4	10	CV	7.4
Bomba suavizadora de refuerzo	2	4	HP	3
Bomba dosificadora de químicos de caldera	2	0.5	HP	0.4
Bomba alimentadora de agua del deaerador	2	5.5	HP	4.1
Total en kW				151.7

Fuente: [36]

desde el primer día de operación, pasando por cada uno de los procesos requeridos para su tratamiento y aprovechamiento energético en un panorama eléctrico y agronómico.

Tabla 3.5: Capacidad instalada en la planta.

Fase operativa de la planta	Demanda en kW
Estación de Recepción de Fruto	59.8
Estación de Esterilización	19.1
Estación de Trilla y Prensado	326.5
Sala de Calderas	151.7
Total en kW	557
Factor de planta	0.8
Capacidad instalada en kW	445.6

Fuente: [36]

### 3.4. Descripción del proceso de tratamiento del POME

Al terminar el proceso de extracción, el resultado de la actividad produce POME, es decir, cantidades de agua con residuos de la materia orgánica que generalmente son devuelto al ambiente constituyendo una fuente de contaminación ambiental.

Para mitigar el impacto ambiental del POME es necesario darle un tratamiento por medio de microorganismos que permitan la degradación biológica para alcanzar

niveles de contaminación aceptables. De esta manera, se utiliza el lodo tratado como bioabono en los suelos que comprende en la plantación de palma. La otra alternativa es enviar estos residuos tratados al medio receptor de agua aledaño, siendo en este caso el Estero Mina. No obstante, para ello estos efluentes deben cumplir con los límites permisibles abogados por las normativas ambientales del país para la descarga hacia estos cuerpos de agua dulce [36].

### 3.4.1. Requisitos para descarga de efluentes

#### 3.4.1.1. Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua

Esta normativa es dictada bajo el amparo de la Ley de Gestión Ambiental y del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental [39]. Es de aplicación obligatoria y rige en todo el territorio nacional. Esta norma técnica determina o establece:

- Los límites permisibles, disposiciones y prohibiciones para las descargas en cuerpos de aguas o sistemas de alcantarillado
- Los criterios de calidad de las aguas para sus distintos usos
- Métodos y procedimientos para determinar la presencia de contaminantes en el agua

#### 3.4.1.2. Normas técnicas de descarga de efluentes a un cuerpo de agua o receptor de agua dulce

El artículo 4.2.3.1, correspondiente a las normas de descarga de efluentes a un cuerpo de agua o receptor de agua dulce, establece que toda descarga de origen industrial a un cuerpo de agua dulce debe cumplir con los valores establecidos en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Demanda bioquímica de oxígeno (5 días)	DBO	mg/L	100
Demanda química de oxígeno	DQO	mg/L	250
Sólidos suspendidos totales	SST	mg/L	100
Potencial de Hidrógeno	pH		5-9
Temperatura		°C	<35

Fuente: [39]

### 3.4.1.3. Criterios de calidad de aguas de uso agrícola o de riego

Se entiende por agua de uso agrícola a aquella que es empleada para el proceso de irrigación de cultivos y otras actividades complementarias que establezcan los organismos competentes.

El uso de aguas servidas para riego está completamente prohibido, exceptuándose las aguas servidas tratadas y que cumplan con los niveles de calidad establecidos en la siguiente norma. Los criterios de calidad admisibles para las aguas destinadas a uso agrícola se presentan en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Criterios de calidad admisibles para aguas de uso agrícola o de riego.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Limite máximo permisible
Sólidos disueltos totales		mg/L	3,000
Potencial de Hidrógeno	pH		6-9

Fuente: [39]

### 3.4.2. Tratamiento del POME

El POME saliente de la planta extractora en las condiciones señaladas en el apartado anterior, debe pasar por los varios tratamientos para su posterior descarga hacia los cuerpos de agua dulce y de uso agrícola.

Según [36], se estima que la planta extractora producirá cerca de 576 m<sup>3</sup>/día de POME a tratar, pero se comprobará la validez de dicho dato en la sección de resultados.

#### 3.4.2.1. Enfriamiento:

En esta etapa, se asegura que la temperatura sea la óptima para que los microorganismos sean funcionales. Por lo general, el POME de estas plantas tiene una temperatura promedio que ronda los 75°C, y la temperatura requerida para que los microorganismos alcancen su máxima eficiencia y longevidad se encuentra rondando los 31°C operativos [36].

Se utiliza una torre enfriamiento para el intercambio de calor del POME con el ambiente. En anexo a ello, también se utiliza una laguna de enfriamiento. Estas tecnologías permiten llevar el POME a temperaturas cercanas a la temperatura ambiental.

#### 3.4.2.2. Ecuilización:

En esta etapa, el POME por lo general tienen un pH que varía entre 3.5 - 4.5, el cual es un nivel demasiado ácido como para permitir que los microorganismos

subsistan y puedan realizar su actividad en el proceso biodigestivo. Su actividad máxima se alcanza con un pH de entre 6.5 - 8. Por lo cual, se realiza una remanencia de pocos días después del enfriamiento del POME, el cual permite regular y mejorar los niveles de pH a valores que rondan los 5.5 [36].

#### **3.4.2.3. Digestión:**

El POME pre-acondicionado por las etapas anteriores ingresa al biodigestor, en donde permanecerá en un periodo no menor a los 25 días [36], sometido al ataque de los microorganismos, que en el mejor de los casos, alcanzan una reducción del 90 % del nivel de contaminantes. Para el diseño a realizarse en los siguientes apartados, se considerará una reducción mínima del 70 %.

#### **3.4.2.4. Agitación:**

Este proceso comprende una red diseñada de bombas y tuberías colocadas en un patrón definido en el fondo del digestor, los cuales agitan el contenido del biodigestor, manteniendo en suspensión los SST contenidos e impidiendo el atascamiento del sistema. Esto permite mantener un material homogéneo en toda el área y volumen del biodigestor a disposición de los microorganismos [36].

#### **3.4.2.5. Eliminación de sólidos residuales:**

En salida del biodigestor, los efluentes todavía contienen una considerable cantidad de sólidos contaminantes. Por ello, un volumen predefinido de efluentes es tratado por una prensa que atrapa el 90 % de los sólidos suspendidos que sobrepasaron el biodigestor, dejando al efluente en parámetros dentro de las normativas presentadas en los apartados anteriores.

El POME estará preparado para su pulimento final en lagunas aeróbicas y anaeróbicas facultativas, en las cuales, con un tiempo de retención hidráulico idóneo, es posible hacer llegar a los valores de descarga exigidos por las normativas.

### **3.4.3. Productos del biodigestor:**

Como subproducto de la digestión de los contaminantes, los microorganismos producen gases como: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub> y partículas de agua. En un biodigestor de diseño moderno, es posible captar un aproximado de 25 - 30 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>, a una riqueza que ronda los 58 %/m<sup>3</sup> - 60 %/m<sup>3</sup> de POME tratado [36].

Este gas es expulsado del biodigestor por un sistema de captación superior y acumulado en una cúpula que cubre la superficie superior del biodigestor. En el caso de existir una sobreproducción de biogás, se dimensiona además un gasómetro para almacenar ese gas excedente. El gas es conducido a un equipo de soplado y finalmente a una antorcha de quemado que expulsará CO<sub>2</sub> como residuo de combustión.

Tal como se mencionó previamente, otro subproducto del biodigestor son los lodos, los cuales mediante un correcto tratamiento pueden ser utilizados para la fertirrigación. Estos lodos se pueden utilizar en la plantación de Palma africana dentro de la misma Hacienda Bola de Oro, en la propiedad de los mismos socios de la compañía PROPALMIN CIA.LTDA.

### 3.5. Metodologías para el aprovechamiento energético del POME

Las agroindustrias dedicadas a la extracción de aceite de palma en la búsqueda de mantener la rentabilidad de sus proyectos, recurren a diferentes tecnologías que permitan optimizar de manera eficiente el manejo de sus recursos, por esta razón, optan por valorizar los efluentes obtenidos del proceso de los FFB, mediante el aprovechamiento energético por la generación de calor y electricidad.

Para el tratamiento de los efluentes para el aprovechamiento energético mediante la generación de biogás, se presentan diversas tecnologías, sin embargo, la mejor alternativa en función de costo de inversión, operación, mantenimiento y complejidad del modelo, corresponde a la implementación de un digestor de laguna cubierta [7].

Cuando se dimensiona un biodigestor el objetivo principal es encontrar el diseño que permita aprovechar la máxima cantidad de efluentes, para lograr la producción de biogás que posibilite el auto-abastecimiento energético, cumpliendo con los requerimientos de la planta.

#### 3.5.1. Generación de Biogás

Uno de los parámetros requeridos para el dimensionamiento del digestor, es el potencial de generación de biogás en el procesamiento biodigestivo. La cantidad de POME que se puede obtener en el proceso de extracción de aceite según [20], se determina mediante el producto de un factor de 0.8 por la cantidad de racimos de frutos frescos diario (FFB/día):

$$Q_{afl} = FFB * 0.8 \quad (3.1)$$

Para cuantificar la cantidad que se puede producir, es necesario conocer el porcentaje de remoción de lodos, y el DQO de ingreso y salida del biodigestor. Para determinar esta cantidad de biogás, se toma como referencia los valores presentados en [36] [40], a la vez, considerando un valor de remoción mínimo.

Con la información de la Tabla 3.8, se puede cuantificar el biogás generado mediante la siguiente ecuación matemática:

$$Q_{bio} = \frac{DQO_{in} * Q_{afl} * \%R * DQO_{out}}{\%CH_4 * 1000} \quad (3.2)$$

Tabla 3.8: Información química para la obtención de biogás

Porcentaje de CH <sub>4</sub>	DQO ingreso [mg/L]	Remoción	DQO CH <sub>4</sub> [mg/L]
60 %	55,000	70 %	0.35

Fuente: [36] [40]

### 3.5.1.1. Poder Calorífico Inferior del Biogás

El biogás es una fuente de energía, para determinar la energía liberada en el momento de la combustión se tiene la ecuación siguiente [40]:

$$PCI_{bio} = \%CH_4 * PCI_{\%CH_4} \quad (3.3)$$

### 3.5.1.2. Potencia generada disponible

Del biogás se puede obtener energía a través del tratamiento de los efluentes por su potencial calorífico. Para conocer la potencia generada por el biodigestor, [40] nos presenta la siguiente expresión:

$$P_{gen} = Q_{afl} * PCI_{bio} \quad (3.4)$$

## 3.5.2. Tiempo de retención hidráulico

Otro parámetro que interviene en el dimensionamiento del biodigestor es el tiempo de retención hidráulico (TRH), es decir, el tiempo en el que estos efluentes permanecerán retenidos dentro de la laguna hasta completar su degradación y obtener biogás.

En la “Guía de Implementación de Sistemas de Biogás” de la UPME [41], mediante una simulación realizada a partir de datos diferentes fuentes bibliográficas, se obtuvo una ecuación que relaciona la temperatura interna requerida en el biodigestor (expresado como T°C), con el TRH. Esta relación presenta una tendencia logarítmica, tal como se observa en la siguiente ecuación:

$$TRH = -51.227 * \ln(T^{\circ}C) + 206.72 \quad (3.5)$$

## 3.5.3. Dimensionamiento de la laguna

### 3.5.3.1. Parámetros de diseño

Para el dimensionamiento del biodigestor, se debe considerar como mínimo un volumen útil que considere tanto el TRH como el caudal de efluentes de la planta extractora. De la misma manera, se considera un volumen de libre de seguridad y un

adicional para el almacenamiento del biogás, o dicho de otra forma, el volumen de la cúpula del digestor. En la ecuación 3.6, se presenta una expresión para el cálculo del volumen total de la laguna considerando un factor de seguridad del 20 %, tal como lo indica el "Curso de formación especializada en biogás para profesionales" [40].

$$V_t = 1.2 * (Q_{efl} * TRH) \quad (3.6)$$

Para determinar el volumen mínimo de almacenamiento de biogás en el digestor, se debe considerar un tiempo de producción diario. Para nuestro caso de estudio, se considera un tiempo de producción de 8 hrs al día, en otras palabras, 24 hrs. Por lo que la expresión para el cálculo según [40], queda expresado de la siguiente manera:

$$V_{gas} > Q_{efl} * \left(1 - \frac{8}{24}\right) * 0.24 \quad (3.7)$$

La laguna cubierta digestiva es construida mediante la remoción de tierra, de forma trapezoidal (más específicamente la de una pirámide trunca), con un ángulo de talud que no provoque deslizamiento en el suelo. Para facilitar el dimensionamiento de la laguna, de acuerdo a [42], seleccionamos un ángulo de talud de 45° obtenido a partir del conocimiento del tipo de suelo. También se debe tener en cuenta que el nivel freático se encuentra cercano a la superficie, por lo cual, se determina que la disposición del biodigestor debe ser superficial [43].

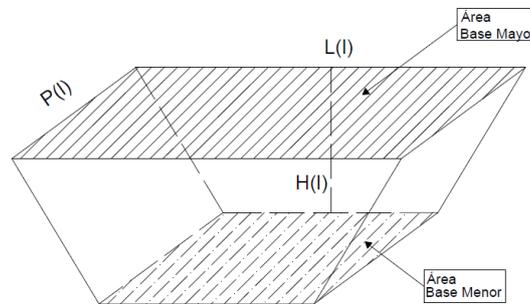


Figura 3.4: Geometría del biodigestor

Fuente: [Elaboración propia]

En la ecuación 3.8, se presenta una expresión para determinar el volumen total del biodigestor considerando como base la ecuación de una pirámide trunca regular.

$$V_t = \frac{H_l}{3} * (A_{BM} + A_{Bm} + \sqrt{A_{BM} * A_{Bm}}) \quad (3.8)$$

Donde:

- $H_L$ : altura de la pirámide trunca
- $A_{BM}$ : área de la base mayor de la pirámide trunca
- $A_{Bm}$ : área de la base menor de la pirámide trunca

Según la metodología expuesta en [44], la longitud de la laguna ( $L_l$ ), debe ser de por lo menos 3 veces su ancho ( $P_l$ ), y la altura ( $H_l$ ), recomendada por [45], de 5 m con un talud de 45°. En base a estas consideraciones, se modifica la ecuación 3.8 en la siguiente expresión:

$$V_t = \frac{5}{3} * \left[ 6P_l^2 - 40P_l + 100 + \sqrt{9P_l^4 - 120P_l^3 + 300P_l^2} \right] \quad (3.9)$$

A simple vista, se puede afirmar que utilizando la ecuación 3.9 para determinar las dimensiones del digestor, se presentarán ciertas complicaciones debido a la forma de su expresión algebraica. Por ello, también se puede optar por utilizar otra alternativa de cálculo, como la que presenta [46]. En este método, se considera el volumen de toda una pirámide con una determinada altura, al cual se le resta el volumen de pirámide deficiente, para obtener el volumen del tronco de pirámide, correspondiente al del biodigestor.

### 3.5.3.2. Aplicación de Geotextil y Geomembranas

Para disminuir las pérdidas de calor del digestor por contacto con el suelo, se utilizan capas de lonas de HDPE y Geotextil NT(2000), por su alta resistencia química y térmica.

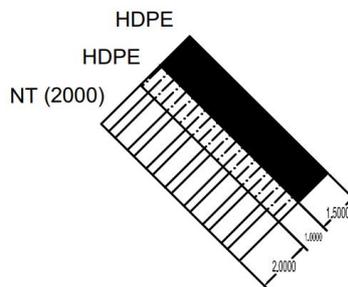


Figura 3.5: Capas del biodigestor  
Fuente: [Elaboración propia]

Tabla 3.9: Información de las capas de la laguna

Capa	Material	Espesor [m]
1	HDPE	0.0015
2	HDPE	0.001
3	NT (2000)	0.002

Fuente: [Elaboración propia]

En la Figura 3.5, se puede observar a detalle la configuración que comprenden de las geomembranas y el geotextil.

En la Tabla 3.9, se presenta el material seleccionado para cada capa de la laguna digestora en nuestro caso de estudio, con su respectivo espesor y ubicación, desde el punto más externo al más interno.

### 3.5.4. Aprovechamiento de energía térmica

Como la temperatura del POME que desemboca de la planta se encuentra a una temperatura promedio de 75°C, se requiere disminuya antes de conducirla hacia los digestores. Tal como se indicó previamente, este intercambio de calor se realizará mediante una torre y una piscina de enfriamiento, para alcanzar los 30°C - 35°C, que es una temperatura óptima para que los microorganismos operen correctamente en la degradación de la materia orgánica.

Por ello, se requiere mantener esa temperatura en el interior del biodigestor, por lo que se realiza un balance de energía para determinar el calor requerido por los sistemas de calentamiento para mantener dicha temperatura a lo largo de la operación de los microorganismos.

Para esta aproximación, como punto de partida, se calculan la dimensiones de los digestores como punto de partida para conocer las pérdidas por transferencia de calor del digestor y el calor requerido para mantener la temperatura interior. Para ello, se considera la temperatura promedio del ambiente y la temperatura mínima censada, para analizar el calor requerido en el peor de las situaciones.

#### 3.5.4.1. Pérdidas por transferencia de calor

Por las dimensiones del biodigestor, existen superficies que se encuentran en contacto tanto con el ambiente (cúpula), como con el suelo (laguna). Por ello, es necesario conocer estas áreas métricas para determinar cuanto calor se pierde o se transfiere por estos medios. En la ecuación 3.10, se presenta una expresión para calcular el área total de contacto con el suelo tomando en cuenta la geometría del biodigestor.

$$A_t = A_{Bm} + A_L \quad (3.10)$$

Donde,  $A_{Bm}$  se exploró previamente como el área que comprende la base menor de la laguna, mientras que  $A_L$ , corresponde al área de los laterales, el cual considera el apotema ( $a_p$ ) en su formulación. A continuación, se presentan las expresiones que se utilizarán para el cálculo de estas áreas [47], en base a las consideraciones expuestas en apartados anteriores:

$$A_{Bm} = (L_l - 10) * (P_l - 10) \quad (3.11)$$

$$A_L = (L_l + P_l - 20) * a_p \quad (3.12)$$

Para los cálculos de las pérdidas por transferencia de calor, se requiere la resistencia térmica que aportan los materiales. Para determinarlos se requiere conocer los coeficientes de convección y conductividades térmicas de los materiales que comprende la estructura del biodigestor. Las características térmicas se presentan con sus respectivas fuentes en la Tabla 3.10, donde se muestra la información necesaria para el cálculo de la resistencia térmica de los tres materiales en serie que componen el reactor.

Tabla 3.10: Información térmica de los materiales

Coefficiente	Conductividad [ W/m*K]
HDPE	0.6
HDPE	0.6
NT(2000)	0.038
Conv.int	4,000
Conv.ext	1.4

Fuente: [48] [49] [50]

De acuerdo con la información presentada, se analizan las pérdidas de calor para la temperatura promedio y la temperatura más baja. Para determinar esto, es necesario primero calcular la resistencia térmica total. Este término representa la oposición al flujo de temperatura presente en los materiales del biodigestor, lo cual juega un rol importante en la determinación de las pérdidas de calor [50].

Para cuantificar lo descrito previamente, se emplea la ecuación 3.13. Con el valor de resistencia térmica obtenida gracias a esta ecuación, es posible determinar las pérdidas de calor por contacto con el suelo [49]. La expresión se presenta a continuación 3.14:

$$R_{ter} = \frac{1}{h_{ext}} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_1} + \frac{e_3}{k_2} + \frac{1}{h_{int}} \quad (3.13)$$

$$Q_{gnd} = R_{ter} * A_{tcs} * (T_{int} - T_{gnd}) \quad (3.14)$$

Determinando estas pérdidas por transferencia de calor a suelo, se puede conocer la cantidad de energía real disponible para el aprovechamiento energético.

### 3.5.4.2. Calor requerido para mantener la temperatura interior

Para desarrollar los procesos de tratamiento del POME en el biodigestor es necesario mantener la temperatura constante en su interior, por lo tanto, parte de la

energía obtenida debe dirigirse a esta aplicación. Para esto, es necesario conocer las características del efluente que se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3.11: Información técnica del efluente

Capacidad calorífica promedio de los efluentes [J/kgK]	Densidad de los efluentes [kg/m3]
2,126.55	1,140

Fuente: [51]

El caudal másico representa la razón de cambio de la masa con respecto al tiempo considerando un área definida. Para el cálculo se requiere conocer la densidad relativa de los afluentes, además de la producción por carga horaria; para desarrollar la siguiente ecuación:

$$m_s = Q_{afl} * d_{eff} \quad (3.15)$$

Los procesos de fermentación deben mantener la temperatura interna constante, por esta razón, el calor requerido debe obtenerse de la capacidad calorífica de los efluentes y la variación de temperatura. Para cuantificar lo descrito se presenta la siguiente expresión [49]:

$$Q_{int} = m_s * C_{eff} * (T_{int} - T_{gnd}) \quad (3.16)$$

En los procesos involucrados en el biodigestor existen transferencias de energía, parte de esta energía calorífica se pierde en las paredes de la laguna por el contacto con el suelo, mientras que, la restante se destina a mantener la temperatura en el interior del biodigestor, por lo tanto, la cantidad de calor total requerida se puede calcular de la siguiente manera [49]:

$$Q_{tot} = Q_{int} + Q_{gnd} \quad (3.17)$$

#### 3.5.4.3. Energía del quemador

Para determinar la demanda energética que comprende el quemador, primero se requiere conocer la energía generada en la caldera. Para este cálculo, se requiere identificar el periodo de operación de la caldera de manera diaria, mensual y anual. Dado que la planta va a disponer de un servicio continuo una vez que entre en operación completa, se considera para el cálculo un factor de 8,760, correspondiente al producto de 24 hrs en un periodo 365 días.

Tomando como referencia el ejemplo detallado en el Curso de Formación Especializada en Biogás para Profesionales [40], se considera una eficiencia del intercambiador del biodigestor ( $n_{int}$ ), del 90 %.

Finalmente, para determinar la energía requerida por el quemador ( $E_{qd}$ ), en concordancia nuevamente con lo expuesto en [40], se considera una eficiencia de intercambio de calor en la caldera ( $n_{cal}$ ), del 85 %. Una expresión que resume todo lo anterior expuesto, se presenta en la ecuación 3.18.

$$E_{qd} = \frac{Q_{tot} * 8,760}{n_{int} * n_{cal}} \quad (3.18)$$

Para calcular la cantidad de biogás necesario para la combustión ( $Q_{bc}$ ), se requiere de su poder calorífico inferior, tal como se observa en la siguiente ecuación [52]:

$$Q_{bc} = \frac{E_{qd}}{PCI_{bio}} \quad (3.19)$$

### 3.5.5. Aprovechamiento de energía eléctrica

El biogás presenta un alto potencial energético, el cual puede ser aprovechado para el autoconsumo de toda la demanda energética que presenta el proceso de digestión del POME. Esta demanda comprende cargas dinámicas que permiten que el procesamiento se ejecute de la mejor manera posible, tales como: agitadores, bombas de agua, entre otras cargas considerables.

Para aprovechar esta energía, desde un panorama eléctrico, se requiere de una tecnología que permita convertir todo este biogás en la mayor cantidad de energía eléctrica posible, considerando paralelamente el impacto en el ambiente tras la liberación de gases contaminantes durante su procesamiento.

En el caso de presentarse un excedente de energía eléctrica, puede ser utilizado para alimentar cargas externas al proceso del biodigestor, o puede destinarse para completa venta a la red, siendo esta última opción, nuestro punto de enfoque.

#### 3.5.5.1. Tecnologías para la generación de electricidad

Tal como se expuso en el apartado 2.5.3, con los avances en la tecnología a pasos agigantados durante las últimas décadas, se han desarrollado diversas tecnologías de generación distribuida para ser aplicados en proyectos de aprovechamiento energético del biogás como combustible.

Para determinar la tecnología más adecuada para la generación de energía eléctrica, en nuestro caso de estudio, se realiza una evaluación considerando los criterios descritos en el preámbulo:

- Eficiencia eléctrica del equipo
- Ingresos por venta de energía
- Reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>

### 3.5.5.2. Potencia del agitador

Para el tratamiento del POME, es importante tener un mecanismo de agitación para realizar de manera correcta la transferencia de los microorganismos dentro del biodigestor. Parte del potencial energético del biogás es dirigido al mecanismo neumático o sistema de agitación a gas para realizar la agitación.

Según [40], como regla se considera que la potencia requerida por el motor debe ser 5 a 8 W/m<sup>2</sup>, la superficie superior de la laguna. La siguiente ecuación expresa la potencia del agitador:

$$P_{agi} = \frac{8 * P_l * L_l}{1,000} \quad (3.20)$$

### 3.5.5.3. Dimensionamiento de compresores y sopladores

El sistema de compresor y sopladores es importante para acondicionar el gas y elevarlo a grandes presiones, por el empleo de varias capas de membranas es necesario el uso de los sopladores porque permite la inyección de aire entre ellas, para dimensionar se debe usar la presión en pascales (Pa), y el caudal de biogás generado en m<sup>3</sup>/s.

Para el cálculo, se considera la eficiencia media de las bombas de pistones en 0.85 y la eficiencia mecánica de transmisión entre motor y bomba de 0.9 [53], para cuantificar la potencia hidráulica se presenta la siguiente ecuación:

$$P_{sal} = \frac{p * Q_{afl}}{0.9 * 0.85} \quad (3.21)$$

### 3.5.5.4. Dimensionamiento de las bombas de recirculación

Para la lograr mezcla apropiada es necesario el movimiento de biomasa dentro del biodigestor para esto se emplean bombas de recirculación adicional al agitador, porque al tratarse de una laguna digestiva resulta necesaria esta implementación por la gran cantidad de efluentes.

Según un artículo expuesto en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros [54], existe una relación entre la potencia de las bombas y el volumen del reactor que corresponde a 8 W/m<sup>3</sup>, la expresión que cuantifica la potencia requerida por cada de bomba de recirculación se presenta a continuación:

$$P_r = 0.8 * V_t \quad (3.22)$$

### 3.5.6. Dimensionamiento de la antorcha

La antorcha es un elemento importante en una planta de biogás, ya que permite liberar el exceso de existente por medio de la combustión considerando el máximo

volumen que puede generarse en un periodo de trabajo [40]. En nuestro caso de estudio, dicho periodo comprende a 8 hrs. En la ecuación 3.23, se presenta una expresión para definir el caudal máximo según el periodo de trabajo de la planta.

$$Q_{max} = \frac{Q_{afl}}{8} \quad (3.23)$$

Para seleccionar la antorcha, se verifica en que rango de caudal de biogás se encuentra nuestro caso de estudio, según la información presentada en la Tabla 3.12, en esta se muestran las características para cada modelo, y se presenta el calibre de las tuberías de gas necesario y la altura que comprende el quemador.

Tabla 3.12: Modelos de antorchas

Modelo	Tubería de gas	Altura	Caudal Mínimo	Caudal Máximo
	ØDN	mm	Nm <sup>3</sup> /h	Nm <sup>3</sup> /h
FAII 50 MP	50	3,850	20	80
FAII 100 MP	85	4,100	80	150
FAII 200 MP	80	4,340	150	250
FAII 300 MP	100	5,050	250	350
FAII 400 MP	125	5,340	350	430
FAII 500 MP	150	5,840	430	550
FAII 750 MP	200	7,000	550	850
FAII 1,000 MP	250	10,000	850	1,100

Fuente: [40]

En caso de superar el caudal máximo de los modelos presentados en la tabla, se debe seleccionar más de una antorcha para satisfacer dicha demanda de gas y cumplir con el diseño requerido.

## 3.6. Evaluación financiera

### 3.6.1. Costos de inversión

Los costos de inversión son valores monetarios necesarios para la ejecución del proyecto, contemplan rubros de estudios, planeamiento, construcción y adquisición de equipos y materiales. Para determinar el costo de inversión aproximado para el funcionamiento del caso de estudio, se emplea el costo por kW instalado en el Proyecto de Biogás Pichacay desarrollado en el país, siendo de aproximadamente 1,188 US\$/kW, según un estudio realizado en la ciudad de Cuzco [55]. Debido a la relación presentada se determina el costo de inversión con la siguiente expresión:

$$\text{Costo de inversión} = \text{Costo del kW Instalado} * \text{Potencia Instalada} \quad (3.24)$$

### 3.6.2. Costos de operación y mantenimiento

En el desarrollo del proyecto se presentan costos de operación y de mantenimiento. Según un estudio realizado por Iván Oswaldo Mena Venegas [56], los rubros que incurren las plantas de generación de biogás son los siguientes:

- Operaciones debido a la generación y sistemas de gases: 10,000 (US\$/año)
- Rubro por seguros: 10,000 (US\$/año)
- Mantenimiento del sistema de gases: 5 % de costo de inversión
- Operación de equipos de generación: 0.0173 (US\$ por kWh/año)
- Costos misceláneos: 2 (US\$/hora de operación)
- Tasa de inflación: 3.03 (% anual)

### 3.6.3. Costo nivelado de la energía

Para poder predecir qué tan viable, económicamente hablando, es un proyecto, es requerible conocer los ingresos o retribuciones por la venta de electricidad que puede generar la planta.

En el país, existía la regulación No. CONELEC 001/13, la cual fijaba un precio por venta a la red, en unidades US\$/kWh, para las plantas de biogás. No obstante, actualmente la regulación No. ARCONEL 031/16 deroga estos valores, eliminando los precios de referencia [57].

Para el cálculo de los ingresos, se requiere calcular el costo nivelado de la energía (o abreviado, LCOE), que indica los costos totales que la planta tendrá a largo plazo, es decir, a lo largo de su vida útil. Este costo nos permitirá realizar una comparación entre la tecnología utilizada en el proceso de conversión de energía de esta planta, con respecto a otras plantas que utilicen diferentes fuentes de energía, véase solar, hidroeléctrica, entre otras.

La siguiente ecuación permite calcular el costo nivelado de la energía:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n [Inv_t + OyM_t] * (1 + dn)^{-t}}{\sum_{t=1}^n [E_t * (1 + dn)^{-t}]}$$
 (3.25)

Donde:

- $Inv_t$ : costo del tiempo de vida del proyecto (US\$)
- $OyM_t$ : costo de operación y mano de obra (US\$)
- $E_t$ : energía eléctrica generada en un año (kWh)
- $dn$ : tasa de descuento (%)

- $n$ : periodo de tiempo (años)

La tasa de descuento depende del segmento productivo, el caso de estudio corresponde al sector agrícola y ganadero, considerando la tasa referencial presenta por el Banco Central del Ecuador en [58], se emplea al análisis económico como tasa de descuento 8.35 %.

### 3.6.4. Valor Actual Neto

El valor actual neto, conocido por sus iniciales como VAN, representa el flujo de efectivo de un proyecto. Este parámetro tiene como finalidad evaluar la riqueza del proyecto obtenida después de cubrir los costos [59].

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{f_t}{(1 + dn)^t} \quad (3.26)$$

Donde:

- $I_0$ : Costo de inversión del proyecto (US\$)
- $f_t$ : flujo de efectivo para el tiempo  $t$  (US\$)
- $dn$ : tasa de descuento (%)
- $n$ : periodo de tiempo (años)

Para el análisis del flujo de efectivo, se considera 15 años como la duración del proyecto, según un estudio de factibilidad técnica económica para la instalación de biodigestores [60]. Esta selección se realiza tomando en cuenta el tiempo de vida útil de la geomembrana por ser el material principal que compone el biodigestor laguna cubierta, siendo entre 15 a 20 años.

Para la decisión de aceptación del proyecto en términos del valor actual neto se presentan tres alternativas:

- $VAN > 0$ : el proyecto es factible
- $VAN < 0$ : el proyecto no es factible
- $VAN = 0$ : el proyecto no es factible

### 3.6.5. Tasa Interna de Retorno

Determinar la tasa interna de retorno es necesaria para conocer la rentabilidad, con esto es posible identificar el riesgo de la inversión. Matemáticamente, se representa como la el valor actual neto igualado cero, como se aprecia en la expresión siguiente:

$$TIR = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{f_t}{(1 + dn)^t} = 0 \quad (3.27)$$

Para la decisión de la aceptación del proyecto considerando la tasa de retorno se presentan tres alternativas:

- $TIR > dn$ : el proyecto tiene rentabilidad al superar la tasa de descuento
- $TIR < dn$ : el proyecto carece de rentabilidad al no superar tasa de descuento
- $TIR = dn$ : el proyecto no posee riesgo en su rentabilidad al ser igual a la tasa de descuento

### 3.6.6. Periodo de recuperación de inversión

Es un indicador de la cantidad de tiempo (generalmente en años), que se puede tardar en recuperar la inversión. Es una directriz importante a la hora de evaluar la rentabilidad de un proyecto propuesto [57].

Para el cálculo del período de recuperación de la inversión (PRI), se utiliza la siguiente ecuación:

$$PRI = t_R + \frac{|R_{nr}|}{F_{as}} \quad (3.28)$$

Donde:

- $t_R$ : tiempo de recuperación total (años)
- $R_{nr}$ : reembolso no recuperado de la inversión al iniciar el año (US\$)
- $F_{as}$ : flujo de dinero del año siguiente (US\$)

Según [57], para evaluar la rentabilidad de un proyecto de acuerdo al tiempo de recuperación de inversión se debe analizar lo siguiente:

- $PRI \leq 1$  año: el proyecto tiene alta rentabilidad
- $1 \text{ año} < PRI \leq 5$  años: el proyecto posee rentabilidad aceptable
- $PRI \geq 6$  años: el proyecto posee rentabilidad deficiente

## 3.7. Elaboración de herramienta computacional

Se modeló mediante una programación VB (Virtual Basic), en el paquete computacional Excel Office, una herramienta que toma todas las ecuaciones y consideraciones presentadas previamente, para el diseño y dimensionamiento de una planta de biogás, mostrando como datos más relevantes, la energía que puede generarse y aprovecharse del POME, para el auto-abastecimiento energético eléctrico y térmico del sistema.

Entre las principales características del programa, se enumeran las siguientes:

- Permite el dimensionamiento del biodigestor, con el cálculo de su volumen, considerando la producción de FFB que se ingrese.
- El programa utiliza el Sistema Internacional de Unidades (SI).
- Dimensiona los equipos eléctricos/térmicos que comprende la planta, tales como el agitador, la antorcha, la bomba de recirculación, entre otros.
- Cuantifica la reducción de emisiones de carbono al medio ambiente.
- Determina el tiempo que debe ser retenido el POME dentro del medio hermético para la conversión a biogás
- Produce un reporte que comprenda todo lo anterior dicho de manera resumida y tabulada
- Dispone de la posibilidad de expandir su uso a la valorización energético de otro tipo de desechos, ya sea de origen agrícola o provenientes del ganado.

### 3.7.1. **Desarrollo de la base de datos**

Las formulaciones que utiliza el programa para su funcionamiento se basa en las consideraciones descritas previamente en el apartado de metodologías, que van desde el dimensionamiento en el proceso tratamiento del POME en el digestor anaeróbico, la conversión del sustrato a biogás, su almacenamiento y transporte hasta las máquinas convertidoras de energía, culminando con la presentación de los diferentes beneficios cuantitativos resultantes de su aprovechamiento energético.

### 3.7.2. **Interfaz del programa**

Para acceder al programa, se presenta una ventana emergente denominada 'Iniciar Sesión'. Esta ventana permite identificar a los creadores del programa a través de usuario y contraseña. Ingresar esta información es de carácter obligatorio para la ejecución del programa brindando seguridad a la base de datos por permitir el acceso sólo a personal autorizado.

La pantalla principal presenta la función de **Iniciar Proyecto** nuevo, esta opción que posibilita iniciar un nuevo dimensionamiento en función de la cantidad de FFB producido en la planta extractora, y la temperatura ambiental del medio en donde se realice el proceso de tratamiento del POME.

En la Figura 3.7, se presenta la opción **Base de datos**, donde el usuario puede acceder a la página en donde se encuentran los diferentes datos referenciales que permiten al programa estimar de manera eficiente los diferentes parámetros requeridos para presentar las metodologías que existen actualmente para el aprovechamiento energético del POME. También es posible modificar dicha base de datos ingresando



Figura 3.6: Ingreso de usuario y contraseña.  
Fuente: [Elaboración propia]



Figura 3.7: Interfaz del programa.  
Fuente: [Elaboración propia]

información tabulada de otro tipo de residuos, es decir, el programa puede expandir su funcionamiento si el usuario lo requiere.

### 3.7.3. Ingreso de información

Como punto de partida se debe ingresar la información del proyecto, como: nombre del proyecto, ubicación específica, la provincia, y finalmente la ciudad. Estos datos se presentarán formando parte de un membrete en los reportes a generarse al culminar la ejecución del programa.

Los datos que también deben ingresarse corresponden a los FFB estimados que entrarán a la planta extractora de aceite, así como también, la temperatura medioambiental del área o zona en la que se realizará el posible montaje de las plantas (extractora y tratamiento, respectivamente). Estos valores afectarán en la energía que se requerirá para mantener el biodigestor dentro de su temperatura óptima.

Una vez que se ingresen dichos datos, una ventana emergente presentará el rango de la planta (pequeña, mediana, grande), basándose en la categorización presentada en [40]. Dependiendo de la categoría asignada, se presentarán las alternativas más

Figura 3.8: Ingreso de datos del proyecto.

Fuente: [Elaboración propia]

Figura 3.9: Ingreso de datos productivos y ambientales

Fuente: [Elaboración propia]

viables en el proceso de digestión anaeróbica, es decir, los tipos de biodigestores recomendados. En la Figura 3.10, se puede observar que para nuestro caso de estudio, la alternativa recomendada, vista desde una perspectiva económica, es mediante una laguna digestiva cubierta.

Lo que se presenta a continuación, es una ventana que permite seleccionar el tipo de tecnología que el usuario desee para la conversión a energía eléctrica, tal como se observa en la Figura 3.11. Esta decisión afectará en la aproximación de la valorización energética, debido a que cada tecnología presenta diferentes niveles de contaminantes al utilizar el biogás como fluido de trabajo, además de ello, un rendimiento en el proceso de conversión de energía.

Finalmente, el programa requiere que el usuario seleccione la dirección a la cual se desee guardar el reporte con los resultados basados en los datos ingresados, otorgándole su debido nombre. Se guardará en dicha dirección la documentación en

formato .xsl y se presentarán de manera emergente dos archivos en .pdf los cuales comprenderán los resultados tanto de manera detallada, como de manera resumida; con los nombres "SHORT\_REPORT", y "SUMMARY\_REPORT"; respectivamente. Estos reportes se mostrarán a detalle en la sección de Apéndices.



Figura 3.10: Designación del biodigestor.  
Fuente: [Elaboración propia]

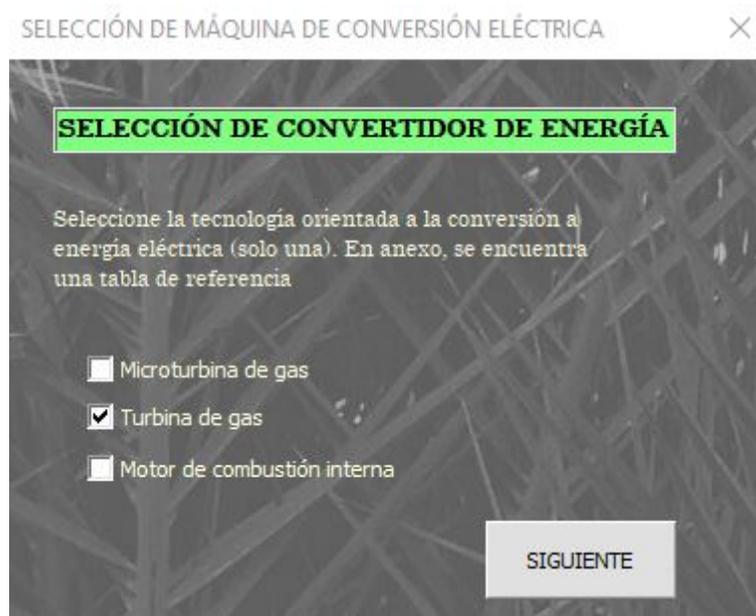


Figura 3.11: Designación de la tecnología de conversión eléctrica.  
Fuente: [Elaboración propia]

# Capítulo 4

## RESULTADOS

En esta sección, se muestran todos los resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto, en base a todas las consideraciones e información expuesta en los apartados anteriores.

### 4.1. Resultados del programa

Con el apoyo computacional del programa implementado, el cual generó dos reportes, se procede a presentar de manera tabulada todos los resultados concernientes al diseño de la planta de proceso biodigestivo, para el aprovechamiento energético de los productos del POME, en nuestro caso de estudio.

#### 4.1.1. Parámetros de ingreso del biodigestor

La empresa PROPALMIN CIA.LTDA estimó que a la planta extractora ingresarían 30 ton FFB/h al día, por lo que, considerando una operación continua de 24 hrs que tendrá desde su segundo año de operación, y la temperatura óptima de operación interna que debe tener el biodigestor (31°C), el programa determinó los siguientes resultados:

Tabla 4.1: Características del biodigestor.

Afluentes [m <sup>3</sup> /día]	THR [días]	Volumen útil digestor [m <sup>3</sup> ]
576	31	14,164

Fuente: [Elaboración propia]

#### 4.1.2. Cantidad de biogás disponible

La generación de biogás fue determinada considerando 60 % de CH<sub>4</sub> promedio [20], con remoción mínima de lodos del 70 %, DQO de ingreso de 55,000 mg/L y

DQO de metano de 0.35 mg/L, dando como resultado 12,936 m<sup>3</sup>/día de biogás disponible para ser destinado al aprovechamiento energético térmico o eléctrico.

### 4.1.3. Dimensión efectiva del biodigestor

Considerando el volumen requerido dado por el caudal y tiempo de retención hidráulico del POME, se optó por dimensionar dos biodigestores de iguales características, ajustado a cumplir con los requerimientos de la laguna cubierta obteniéndose como resultado las dimensiones detalladas en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Dimensión de la laguna biodigestiva.

Longitud mayor [m]	Altura mayor [m]	Ancho mayor [m]
90	5	30
Longitud menor [m]	Ancho menor [m]	Apotema [m]
80	20	7.07

Fuente: [Elaboración propia]

En la Figura 4.1 se aprecia visualmente el diseño resultante de las dos lagunas biodigestoras implementadas en la planta.

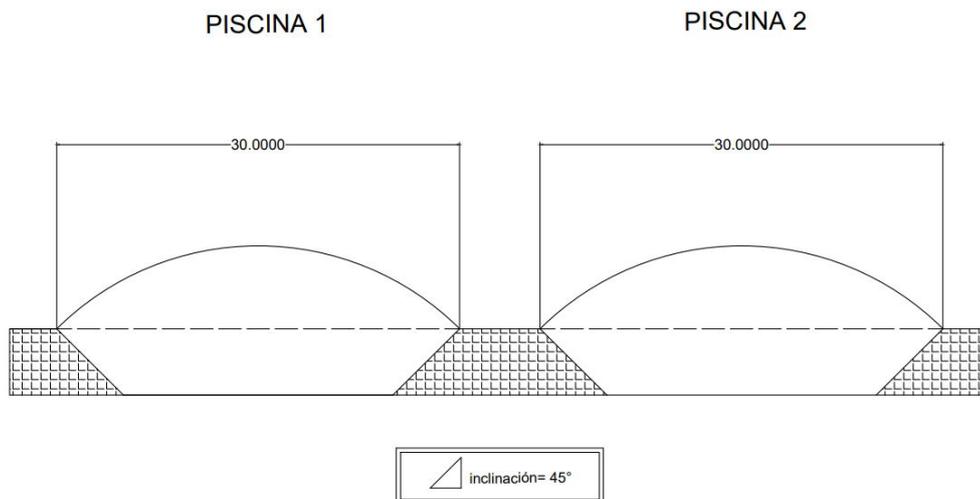


Figura 4.1: Diseño del biodigestor.

Fuente: [Elaboración propia]

### 4.1.4. Calor de regulación de temperatura

Para el dimensionamiento del biodigestor se consideró las condiciones climáticas del lugar, porque de este parámetro depende la cantidad de energía obtenida a ser dirigida para mantener la temperatura dentro del biodigestor, por lo antes descrito se estudiaron los requerimientos para la regulación con temperatura ambiente promedio y mínima.

#### 4.1.5. Caso 1: Temperatura ambiental promedio

Este caso consideró la temperatura ambiente promedio del lugar, el calor resultante para mantener la temperatura interna necesaria se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 4.3: Calor para mantener la temperatura interna en condición promedio.

Calor requerido con T ambiente media	
[MJ/día]	[kW]
7,400.80	85.66

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.6. Caso 2: Temperatura ambiental crítica

Para poder dimensionar el biodigestor se evaluaron las condiciones críticas, por esto determinamos el calor necesario para mantener la temperatura interna en el biodigestor cuyos resultados se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 4.4: Calor para mantener la temperatura interna en condición crítica.

Calor requerido con T ambiente media	
[MJ/día]	[kW]
14,243.05	164.9

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.7. Potencial energético del biodigestor

De acuerdo al poder calorífico inferior de metano obtenido mediante la ecuación 3.3, se determinó la cantidad de energía obtenida por el biodigestor a través de la aplicación de la ecuación 3.4, cuyo resultado corresponde a 3,583.27 kW.

#### 4.1.8. Dimensionamiento del agitador electromecánico

Para el movimiento de los efluentes dentro del biodigestor se consideró el área mayor utilizando la relación de 8 W/m<sup>2</sup>, con la aplicación de la ecuación 3.20 se obtuvo 86.4 kW como potencia necesaria para el agitador.

#### 4.1.9. Dimensionamiento del compresor

La potencia requerida para el sistema de compresor y sopladores se obtuvo a través de la ecuación 3.21 cuyo resultado corresponde a 23.49 kW, con esta potencia es posible el acondicionamiento del gas siendo necesario por el empleo de membranas en el biodigestor.

#### 4.1.10. Dimensionamiento de la bomba de recirculación

Como se mencionó en el apartado 3.5.5.4., para el dimensionamiento de las bombas de recirculación existe una relación entre la potencia y el volumen del reactor mediante la aplicación de la ecuación 3.22 se obtuvo como resultado 396 kW de potencia eléctrica dirigida al funcionamiento de las bombas de recirculación.

#### 4.1.11. Dimensionamiento de la antorcha

La antorcha permite la liberación de gases excedentes, por lo que se consideró el caudal máximo de biogás en un periodo de trabajo inicial de 8 hrs, a través de la ecuación 3.23 se determinó que es necesario quemar 1,617 m<sup>3</sup>/h de biogás, con este conocimiento y considerando las características de los modelos expuestos en la tabla 3.12 se seleccionó dos antorchas del modelo FAII 750 MP, estas son dimensionadas para operar con caudales mínimos de 550 Nm<sup>3</sup>/h y máximos de 850 Nm<sup>3</sup>/h.

#### 4.1.12. Total consumo energético de la planta

Para el desarrollo de los procedimientos involucrados en el tratamiento de efluentes dentro del biodigestor, se consume energía tanto térmica como eléctrica en los componentes requeridos, por esto, se determinó la demanda energética que conlleva su aplicación. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.5: Consumo energético total del biodigestor.

Calor requerido para mantener la temperatura interna [kW]	164.85	4.60 %
Pérdidas de calor [kW]	425.10	11.86 %
Potencia del agitador [kW]	86.40	2.41 %
Potencia compresor [kW]	23.49	0.66 %
Potencia recirculación [kW]	396.00	11.05 %
TOTAL [%]		30.58 %

Fuente: [Elaboración propia]

Analizando los resultados mostrados en la Tabla 4.5, se observó que el consumo total de energía corresponde al 30.58 %, de este porcentaje de energía el 14.12 % está

destinado a electricidad, mientras que el 16.46 %, se destina a consumo de energía térmica.

## 4.2. Selección de la tecnología para la generación de electricidad

En la evaluación de las tecnologías, se consideró el factor de planta de 80 % como se mencionó en el apartado 3.3.2., para los ingresos por venta de energía a la red se usó el valor de 11.04 cUS\$/kWh, obtenido del Informe Anual 2019 de CENACE [61], correspondiente a de las plantas de biogás.

Según [62], el factor de emisiones de CO<sub>2</sub> del sector ecuatoriano corresponde a: 0.6945 tonCO<sub>2</sub>/MWh, con esta consideración se determinó las emisiones y reducción de CO<sub>2</sub> para cada tecnología aplicada a la conversión de energía.

Para la selección de la tecnología empleada en la generación de electricidad se estudió las eficiencias máximas y mínimas de cada convertidor, con estas consideraciones se determinó la mejor opción a ser implementada en la planta.

### 4.2.1. Turbina de Gas

Para la conversión de energía se estudió la implementación de turbinas de gas por ser versátil siendo capaz de aplicarse a cualquier planta de biogás, los resultados para la selección de esta tecnología se presenta en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Resultados para la opción de turbinas de gas.

Turbinas de Gas		
Parámetros de selección	Min.Rend. (25 %)	Max.Rend. (40 %)
Potencia eléctrica útil [MW]	0.75	1.12
Potencia eléctrica de venta a la red [MW]	0.24	0.69
Energía eléctrica anual de venta a la red [MWh]	1,698.81	4,843.30
Ingresos por venta de energía por año [USD]	187,548.77	534,700.20
Emisiones de CO <sub>2</sub> min [ton/año]	3,572.53	5,714.72
Emisiones de CO <sub>2</sub> max [ton/año]	4,588.58	7,340.00
Emisiones con red [tonCO <sub>2</sub> ]	4,552.52	7,282.33
Reducción de [tonCO <sub>2</sub> ] con min	979.99	1,567.62
Reducción de [tonCO <sub>2</sub> ] con max	-36.05	-57.67

Fuente: [Elaboración propia]

### 4.2.2. Microturbina de Gas

Las microturbinas de gas tienen la ventaja de poseer menor inercia permitiendo alcanzar mayores cargas en menor tiempo, a pesar que, el tamaño de la planta no esté en el rango definido por la tabla 2.4, se estudió la aplicación de esta tecnología, en la Tabla 4.7 se presentan los resultados de los parámetros para la selección de la microturbina de gas.

Tabla 4.7: Resultados para la opción de micro turbinas de gas.

Microturbinas de Gas		
Parámetros de selección	Min.Rend. (20 %)	Max.Rend. (30 %)
Potencia eléctrica útil [MW]	0.60	0.90
Potencia eléctrica de venta a la red [MW]	0.09	0.39
Energía eléctrica anual de venta a la red [MWh]	650.41	2,747.91
Ingresos por venta de energía por año [USD]	71,805.54	303,368.92
Emisiones de CO2 min [ton/año]	3,146.77	4,719.89
Emisiones de CO2 max [ton/año]	4,195.69	6,293.18
Emisiones con red [tonCO2]	3,642.38	5,463.27
Reducción de [tonCO2] con min	495.62	743.38
Reducción de [tonCO2] con max	-553.31	-829.91

Fuente: [Elaboración propia]

### 4.2.3. Motor de combustión interna.

Esta tecnología es la más usada en la conversión de energía, debido a que posee mayor eficiencia frente a las otras tecnologías. Se estudiaron los parámetros de selección con la implementación, tal como se muestra en la Tabla 4.8.

### 4.2.4. Comparación de las tecnologías

Para seleccionar la mejor tecnología en la conversión de energía se realizó una matriz de decisión que evalúa los criterios más importante involucrados en la implementación de cada una de las alternativas (turbina de gas, microturbina y motor de combustión interna). Estas fueron evaluadas a través de escalas; para los ítem 1 y 2 que refieren a costos se otorgó la calificación de 1 al 5, siendo 1 para el valor más alto y 5 para el valor más bajo, mientras que los ítem 3, 4, 5, 6, 7 y 8 que refieren a criterios positivos se calificó considerando 5 como el valor más alto y 1 como el valor más bajo.

La realización de esta matriz permitió identificar de manera práctica la mejor opción para conversión de energía al sumar cada uno de los criterios, el mayor resultado conlleva a la mejor tecnología, de acuerdo a la Tabla 4.9, se alcanza 36

Tabla 4.8: Resultados para la opción de motor de combustión interna.

Motor de Combustión Interna		
Parámetros de selección	Min.Rend. (35 %)	Max.Rend. (45 %)
Potencia eléctrica útil [MW]	1.05	1.35
Potencia eléctrica de venta a la red [MW]	0.54	0.84
Energía eléctrica anual de venta a la red [MWh]	3,792.10	5,894.50
Ingresos por venta de energía por año [USD]	418,647.72	650,752.68
Emisiones de CO2 min [ton/año]	5,044.45	6,489.85
Emisiones de CO2 max [ton/año]	7,795.96	10,029.76
Emisiones con red [tonCO2]	6,369.76	8,194.91
Reducción de [tonCO2] con min	1,325.31	1,705.06
Reducción de [tonCO2] con max	-1,426.20	-1,834.86

Fuente: [Elaboración propia]

puntos para la implementación del motor de combustión interna, siendo mayor en comparación con las demás opciones presentadas.

Con esta alternativa, se consigue una potencia útil de 1.35 MW y una energía eléctrica anual de venta de 7,368.12 MWh, debido a que posee la mayor eficiencia frente a las otras tecnologías. Con esta elección se consiguen ingresos anuales de US\$ 650,752.68 por la venta de energía a la red.

Tabla 4.9: Matriz de decisión

Criterios		Turbina de Gas	Microturbina de Gas	Motor de combustión interna
1	Costo de inversión	5	2	3
2	Costo de operación y mantenimiento	5	4	3
3	Eficiencia sobre PCI%	4	3	5
4	Potencia eléctrica útil	4	2	5
5	Ingresos por venta de energía por año	4	2	5
6	Emisiones de toneladas CO2 al año	3	2	5
7	Emisiones de ton CO2 con red	3	2	5
8	Reducción de ton CO2	3	2	5
Total		31	19	36

Fuente: [Elaboración propia]

### 4.3. Ahorro económico en el consumo de electricidad

Para el cálculo del ahorro económico del consumo de la electricidad en la planta se requirió como punto de partida conocer el precio fijo en el mercado por kWh consumido. En el pliego tarifario vigente en el año 2020, en la unidad de negocios CNELEP-MILAGRO (empresa a la que se encuentra afiliado PROPALMIN CIA.LTDA.), se especifican los costos de consumo eléctrico, dependiendo del nivel

de voltaje y el sector al que esta orientada la energía [63]. El costo de la energía para una industria se encuentra en 8.9 cUS\$/kWh.

En el apartado 4.1.12, se expuso que el 14.12 % del potencial energético del biogás esta destinada para autoconsumo energético. Esta porción es de aproximadamente 505.89 kW, equivalente a cerca de 4,431,560 kWh/año. Por lo tanto, el ahorro económico anual es de 394,408 US\$.

## 4.4. Ahorro económico en el consumo de calor

Para cuantificar el ahorro en el consumo de energía térmica que comprende la planta, se comparó cuánto se gastaría por ese consumo térmico mediante el uso de otras fuentes de energía térmica no renovables convencionales nacionales, como: electricidad comprada a la red eléctrica, GLP (gas licuado de petróleo), y gas natural.

### 4.4.1. Calor obtenido mediante electricidad

Para calcular el ahorro económico en el caso de que se utilizase la energía eléctrica de la red para la calefacción de los biodigestores, se utilizó el costo por consumo energético para industrias del apartado 4.4. La energía requerida es de cerca de 5,168,001 kWh/año, por lo que el ahorro anual utilizando esta electricidad de venta es de 459,952 US\$.

### 4.4.2. Calor obtenido mediante GLP

Para calcular el ahorro económico en el caso de que se utilizase GLP como combustible para la calefacción de los biodigestores, se requirió conocer su costo nacional. Según lo publicado en la Agencia de Regulación y Control Hidrocarburiífero [64], el precio del GLP (incluido el IVA del 12 %), para el sector agroindustrial es de 0.1883 US\$/kg.

Tomando a consideración un poder calorífico inferior de 13.64 kWh/kg [65], y la energía requerida al año; se calculó la cantidad de GLP necesario para la generación de calor, utilizando la estructura de la ecuación 3.19, y realizando una debida conversión de m<sup>3</sup> a galones.

El ahorro económico al no utilizar GLP como combustible para la caldera resultó de 71,344 US\$.

### 4.4.3. Calor obtenido mediante gas natural

Para calcular el ahorro al no utilizar gas natural como combustible, se consideró un costo nacional de 2 US\$/MMBTU [64], y la energía anual de 5,168,001 kWh. El ahorro económico tras realizar la debida conversión resultó en 35,246 US\$.

## **4.5. Emisiones reducidas en la generación de energía eléctrica**

Se calculó la cantidad de CO<sub>2</sub> que se emitiría al ambiente si la electricidad no se generara en la planta y se comprase a la red de la unidad de negocios CNELEP-MILAGRO. Para ello, se tomó como referencia el factor utilizado en [62] para el cálculo de las emisiones en el caso de conectarse a la red para satisfacer la demanda, correspondiente a 0.6945 tonCO<sub>2</sub>/MWh. Esta reducción, considerando la tecnología seleccionada, resultó de 1,705 tonCO<sub>2</sub>.

## **4.6. Emisiones reducidas en la generación de energía térmica**

Tal como se expuso en los apartados previos, la energía requerida para la calefacción del digester es de cerca de 5,168,001 kWh/año. Considerando dicho requerimiento, paralelamente a lo que se realizó en el apartado 4.5, se evaluó la reducción de emisiones que comprendería el proyecto, en el caso de no utilizar los siguientes recursos: electricidad de la red, GLP y gas natural.

### **4.6.1. Emisiones reducidas sin electricidad de la red**

En base al factor de emisión de CO<sub>2</sub> de la electricidad destacado en el apartado 4.5.1, se determinó que el uso de electricidad de la red generaría 3,589 tonCO<sub>2</sub>/año.

### **4.6.2. Emisiones reducidas sin GLP**

Según un estudio realizado en la Universidad Carlos III de Madrid [49], el factor de emisión de CO<sub>2</sub> del GLP es de 0.254 kgCO<sub>2</sub>/kWh de la energía requerida. Por lo que se determinó que el uso de GLP como combustible para la generación de calor produciría 1,312 tonCO<sub>2</sub>/año.

### **4.6.3. Emisiones reducidas sin gas natural**

El factor de emisión de CO<sub>2</sub> del gas natural es de 0.252 kgCO<sub>2</sub>/kWh de la energía requerida [49], por lo tanto, se determinó que su uso como combustible produciría cerca 1,302 tonCO<sub>2</sub>/año.

## **4.7. Viabilidad económica del proyecto**

Para conocer la viabilidad del proyecto se interpretan los resultados de los indicadores económicos y el costo nivelado de la energía.

El desarrollo del análisis económico completa la realización del proyecto con tecnología seleccionada que corresponde al motor de combustión interna. Para la implementación del sistema biodigestivo en la planta extractora se determinó necesaria una inversión de *US\$ 1,600,236.00*, de acuerdo al tiempo de vida útil se estudian 15 años de operación. En el primer año sólo se considera el ingreso de una laguna cubierta, por lo que la energía a generar se considera la mitad de todo su potencial. A partir del segundo año se considera que operan los dos biodigestores. Para los costos de operación y mantenimiento, se cuantificó que serían de aproximadamente *US\$ 136,858.61* para el primer año y *US\$ 199,525.42* para los siguientes años (sin considerar la inflación por año).

Mediante el análisis del flujo de efectivo para el periodo proyectado, se determinó el costo nivelado de la energía como *US\$ 12.13*. Con este precio de venta de energía, se determinó un VAN de *US\$ 5,831,457.44*, que indica que el proyecto es capaz de obtener beneficios monetarios dando valor al desarrollo del proyecto. Por otro lado, el TIR calculado corresponde a 27.39 % estableciendo la rentabilidad del proyecto al superar a la tasa de descuento definida por el Banco Central del Ecuador, correspondiente a 8.35 %.

Finalmente, en lo referente al periodo de recuperación de la inversión, se determinó que es cerca de 4 años, más específicamente 3 años y 8 meses. Este resultado indica que el proyecto posee una rentabilidad media .

En el apéndice C, se presenta en detalle las tabulaciones correspondientes al flujo de efectivo y al cálculo del costo nivelado de la energía, orientado a nuestro proyecto.

# Capítulo 5

## CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 5.1. Conclusiones

Con el estudio realizado se logró concretar y evidenciar las siguientes conclusiones del proyecto.

- La valorización energética de los efluentes se determina a través de la cuantificación de la cantidad de biogás que puede producirse en un biodigestor con las dimensiones aptas para el tratamiento óptimo del caudal de salida de la planta extractora contribuyendo a disminuir el impacto ambiental al explotar los residuos generados por esta actividad.
- Las dos metodologías más factibles en la utilización de los efluentes de palma aceitera, son el aprovechamiento térmico y eléctrico del biogás resultante, que puede destinarse tanto para el autoconsumo energético de la planta como para la venta externa a las redes de distribución.
- El desarrollo de la herramienta computacional permitió estructurar y cuantificar de manera tabulada las diferentes metodologías basadas en el aprovechamiento de los efluentes, logrando de esta manera ampliar la aplicación a más plantas de extracción de aceite que requiera obtener un reporte sobre la valorización energética.
- La mejor tecnología para la generación de la mayor cantidad de energía eléctrica y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente, corresponde al motor de combustión interna, puesto que, con esta alternativa se alcanzaron mayores beneficios económicos en la venta de energía.
- La implementación de un sistema biodigestor en la plantación ecuatoriana PRO-PALMIN CIA.LTDA. resulta factible al presentar en sus indicadores económicos valores que justifican su inversión y dan gala a su rentabilidad.

## **5.2. Trabajos futuros**

Pensando en alternativas interesantes sobre la línea principal de este proyecto, se presentan diferentes temáticas que pueden ser desarrolladas en un futuro trabajo.

- Estudio técnico-ambiental del potencial energético del cultivo de palma africana en Ecuador
- Análisis económico-ambiental de la implementación de sistemas de biogás en plantaciones de palma de gran escala en Ecuador
- Estudio técnico en el desarrollo de nuevas tecnologías para el aprovechamiento energético del POME
- Estudio de factibilidad de un sistema de cogeneración para plantas extractoras de aceite de palma en Ecuador
- Análisis de sensibilidad de la matriz energética ecuatoriana con la penetración de plantas de biogás

# Bibliografía

- [1] Karol Estefanía Cuvi Quintana. Determinación de la factibilidad de utilizar sistemas de lodos activados para depuración de aguas residuales industriales procedentes de una fábrica de lácteos y una de confites. quito dm. B.S. thesis, 2017.
- [2] Cámara de industrias y producción. Resolución 002\_norma técnica, 2008.
- [3] Ministerio de Agricultura y Ganadería. Palmicultores presentan su aceite comestible, fruto de la asociatividad, sep 2019.
- [4] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable Instituto Nacional de Preinversión Ministerio Coordinador de Producción, Empleo y Competitividad. Atlas bioenergético del ecuador. 2014.
- [5] Sylvester Chibueze Izah, Tariwari CN Angaye, and Elijah Ige Ohimain. Environmental impacts of oil palm processing in nigeria. *Biotechnological Research*, 2(3):132–141, 2016.
- [6] Paul N Malacatus Cobos, Byron V Guerrero Rodríguez, and Gerardo M Llerena Carrera. Generación de efluentes en el proceso de extracción de aceite crudo de palma en el ecuador. *Dominio de las Ciencias*, 3(4):459–469, 2017.
- [7] Philippe Conil. Nueva generación de biodigestores para efluentes de palma, energía renovable y comercialización de certificados de carbono. *Revista Palmas*, 28(especial):173–179, 2007.
- [8] Raúl Zelaya. Aprovechamiento y valorización energética de biomasa y biogás. *Revista Palmas*, 37:157–162, 2016.
- [9] Ivonne Cristina Briceño Álvarez, Jaime Fernando Valencia Concha, and Mauricio Posso Vacca. Potencial de generación de energía de la agroindustria de la palma de aceite en colombia.
- [10] Fidel Mingorance, Flaminia Minelli, and Hélène Le Du. El cultivo de la palma africana en el chocó. *Legalidad Ambiental, Territorial y Derechos Humanos*, 2004.
- [11] Miriam Fontalvo Gómez, Rogelio Vecino Pérez, and Amadis Barrios Sarmiento. El aceite de palma africana *elae guineensis*: Alternativa de recurso energético

- para la producción de biodiesel en Colombia y su impacto ambiental. *Prospectiva*, 12(1):90–98, 2014.
- [12] infoAgro. El cultivo de la palma africana, may 2010.
- [13] Universitat Autònoma de Barcelona. Las plantaciones de palma aceitera provocan la infertilidad de los suelos tropicales, jun 2017.
- [14] Energía Verde. Biodiésel, jan 2019.
- [15] Palm Oil Analytics. Crude palm oil - cif rotterdam, 2020.
- [16] M y otros Potter. La industria del aceite de palma en Ecuador: ¿un buen negocio para los pequeños agricultores? 2011.
- [17] El Universo. Unos 6800 palmicultores esperan la aprobación de la ley de la palma aceitera, jan 2020.
- [18] María Bonomie and María Reyes. Estrategia ambiental en el manejo de efluentes en la extracción de aceite de palma. *Telos*, 14(3):323–332, 2012.
- [19] Jenny Patricia Sevillano Ormaza and Giovanny Francisco Mendoza Quinatoa. Estudio económico financiero del cultivo e industrialización de la palma africana en el Ecuador, en la primera década del siglo xxi. Tech, Universidad Central del Ecuador, <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/2131/1/T-UCE-0005-338.pdf>, 2013.
- [20] Markus Althausen. Tratamiento de efluentes de la planta de beneficio-convertir un residuo en un recurso. *Revista Palmas*, 37:31–37, 2016.
- [21] Eduard Ibañez Reyes. Estudio de la generación y composición de biogás en tratamiento de efluentes con biodigestores carpados en la industria de extracción de aceite de palma mediante simulación. 2019.
- [22] EG Ingeniería. Biodigestor con geomembranas.
- [23] Aqualimpia. Beneficios que aportan los biodigestores, aug 2017.
- [24] Andrea Moraga Paredes. Módulo 1: Curso de formación especializada en biogás para profesionales. nov 2017.
- [25] Miguel Á Barrera, Jorge L Maicelo, Oscar Á Gamarra, Manuel Oliva, Santos T Leiva, Luis Á Taramona, Milton Á Huanes, and Carla M Ordinola. Biogás: producción y aplicaciones. 2019.
- [26] María Teresa Varnero Moreno. *Manual de biogas*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 2011.

- [27] Ricardo Adolfo Parra Huertas. Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción+ limpia*, 10(2), 2015.
- [28] Programa de Energías Renovables y Eficiencia Energética en Centroamérica, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, and Programa energías renovables y eficiencia energética en centroamérica. Análisis de factibilidad de la producción de biogás con aguas residuales de la producción de aceite de palma (pome) en el plantel de coapalma e cara, tocoa. aug 2013.
- [29] AQUAFIX. The digester doc – anaerobic digester testing, jun 2015.
- [30] 'Ministerio de Agricultura de Argentina FAO, 'Ministerio de Energía y Minería de Argentina'. Biodigestores - transformar la biomasa en biogás. 2017.
- [31] SA Besel. Biomasa: digestores anaerobios. *Editorial Idea, Madrid, España*, 2007.
- [32] Hernan Quiroz Marchant. Módulo 7: Curso de formación especializada en biogás para profesionales. nov 2017.
- [33] ConectaBioEnergía. Microturbina para aprovechar vapor residual para producir electricidad, dec 2011.
- [34] Ramón Rodríguez Cussó. Analisis y adaptación de motores de ciclo otto y diésel operando con biogás. 2013.
- [35] ALIBABA. Catálogo de productos.
- [36] IPSOMARY. Estudio de impacto ambiental del proyecto construcción, operación y mantenimiento de la planta extractora de aceite de palma de la empresa propalmin cia ltda. may 2019.
- [37] Instituto tecnológico de meteorología e hidrología. Anuario meteorológico. Tech, República del Ecuador, 2015.
- [38] Induagro.com. Proceso de extracción de aceite, 2014.
- [39] Texto Unificado de Ley Ambiental Secundario. Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso agua. *Libro VI Anexo1, Anexo4*, 2000.
- [40] Hernan Quiroz Marchant. Módulo 4: Curso de formación especializada en biogás para profesionales. nov 2017.
- [41] Unidad de planeación minero energética. "guía para la implementación de sistemas de producción de biogás. Tech, Universidad Central del Ecuador, <https://n9.cl/0y3a>, mar 2003.
- [42] Tutoriales al día Ingeniería Civil. Estimación del volumen de material granular en pilas o montones, may 2014.

- [43] FIRCO SEMARNAT Secretaría de medio ambiente y recursos naturales, SAGARPA Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación. Especificaciones técnicas para el diseño y construcción de biodigestores en México. *SEMARNAT*, jan 2010.
- [44] Alejandro Treviño Cansino and Facundo Cortés Martínez. Método de diseño reducido para lagunas de estabilización. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(4):729–742, 2016.
- [45] Tsunao Matsumoto and Iván Sánchez. Desempeño de una laguna anaerobia con baffle divisor seguida de una laguna facultativa, posible afectación de la salud pública. *Revista universidad y salud*, 13(1):46–60, 2011.
- [46] Aulafacil. Volúmen del tronco de la pirámide.
- [47] Universo Formulas. Área de un tronco de pirámide.
- [48] Vilsa. El aislamiento térmico de fibra de poliéster.
- [49] Paula Estella Basés. Estudio de la producción energética a partir del aprovechamiento del biogás en una granja de ganado bovino. Tech, UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, oct 2016.
- [50] Lucas Elordi García et al. Diseño de un digestor para una planta de biogás agroindustrial. 2017.
- [51] Aracely Del Carmen Castillo Gonzales. diseño del proceso para la producción de 60 toneladas diarias de biodiesel a partir de aceite de palma refinado. B.S. thesis, 2007.
- [52] Click Renovables. Cómo calcular la potencia, las necesidades de combustible y el ahorro que obtienes con una instalación de biomasa (caso práctico y comparativa).
- [53] Hidraoil. La potencia hidráulica, 2020.
- [54] ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS. Optimización de la agitación de un digestor anaerobio mediante mecánica de fluidos computacional.
- [55] Alan Pio Ninancuro Cruz and Guido Mamani Quiñones. Estudio técnico-económico de una planta de generación eléctrica a base de biogas, aprovechando los residuos sólidos urbanos de la ciudad del cusco. 2017.
- [56] Iván Oswaldo Mena Venegas. Diagnóstico del potencial de la biomasa vertida en el botadero de basura de Latacunga, en relación con el volumen y energía asociada en el año 2013. y propuesta de un sistema eficiente para la generación de energía eléctrica. Master's thesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi: Dirección de Posgrados., 2015.

- [57] Jonathan Miguel Olmedo Ruiz and Jonnathan David Curillo Tigre. Valoración de la producción de energía eléctrica a partir del biogás que se genera en el relleno sanitario ceibales de la ciudad de machala. B.S. thesis, 2019.
- [58] Banco Central del Ecuador. Tasas de interés activas efectivas vigentes para el sector financiero privado, público y, popular y solidario, sep 2020.
- [59] Walter Andía Valencia. Indicador de rentabilidad de proyectos: el valor actual neto (van) o el valor económico agregado (eva). *Industrial data*, 14(1):15–18, 2011.
- [60] Matías Emiliano Ibarrola, Francisco López Saavedra, and Juan Manuel Quiroga. Estudio de factibilidad técnico-económica para la instalación de biodigestores en un feedlot. 2014.
- [61] OPERADOR NACIONAL DE ELECTRICIDAD CENACE. Informe anual 2019. Tech, CENACE, OPERADOR NACIONAL DE ELECTRICIDAD, mar 2019.
- [62] José Oscullo and Lenin Haro. Factor anual de emisión de co2 producido por el parque generador del sistema nacional interconectado del ecuador, mediante la aplicación de la metodología de la convención marco sobre el cambio climático unfccc, para el periodo 2009-2014. *Revista Politécnica*, 37(1):61–61, 2016.
- [63] AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD. Pliego tarifario para las empresas eléctricas de distribución. page 24.
- [64] Agencia de Control y Regulación Hidrocarburífero. Precios combustibles, sep 2020.
- [65] OSLNERGMIN. El gas natural y sus diferencias con el glp. page 2, 2012.

# **Apéndice A**

## **Evidencia fotográfica**

ENTREVISTA CON GERENTE GENERAL DE LA EMPRESA  
PROPALMIN CIA.LTDA

SR. FABRICIO ESPINOZA VALVERDE



ENTREVISTA CON JEFE DE OBRA DE LA PLANTA EXTRACTORA

ING. IRWIN MEDINA



# **Apéndice B**

## **Reportes del programa**

## REPORTE SUMARIO

### BIODIGESTOR TIPO LAGUNA CUBIERTA

#### CANTIDAD DE AFLUENTES

Conversión toneladas de fruto a afluentes	0.8
Toneladas de fruto al día	720
Afluentes (m3/día)	576

#### TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRAULICO

Días	31
------	----

#### VOLUMEN TOTAL DEL BIODIGESTOR

Volúmen total digestor (m3)	21294
-----------------------------	-------

#### OBSERVACIONES

Agitación mecánica (opcional)  
Pendiente de 45°  
Equipos de medición  
Altura de 5 m

#### DIMENSIONES DE LA PISCINA

LM (m)	H (m)	PM (m)
180	5	60

Lm (m)	Pm (m)	ap (m)
170	50	7.07

#### TEMPERATURA AMBIENTAL

Tmin (°C)	Tmedia (°C)
20.8	25.7

5400

#### PIRAMIDE TRUNCA



**AREA BASE MENOR**

Alat1(m2)	8500.00
-----------	---------

**AREA LATERALES**

Alat1(m2)	3323.40
-----------	---------

**AREA DE INFLUENCIA**

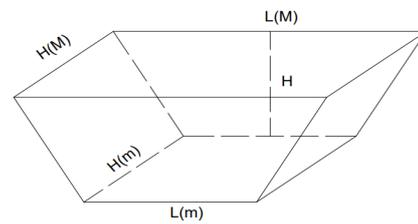
Atcs (m2)	32147
-----------	-------

**VOLUMEN SELECCIONADO**

V (m3)	49500
--------	-------

**NÚMERO DE PISCINAS**

V (m3)	2
--------	---



**CALOR REQUERIDO PARA MANTENER LA TEMPERATURA**

Capacidad calorífica promedio de los efluentes (J/kgK)	2126.55
Afluentes (576 m3/dia)	576
Densidad relativa de los efluentes (kg/m3)	1140

CASO 1	Se toma a consideración la T ambiente media
CASO 2	Se toma a consideración la T ambiente mínima, como caso crítico

Caudal másico de los efluentes(kg/dia)	656640
T interna requerida (°C)	31
Calor requerido para mantener la temperatura (MJ/dia) con T ambiente media	7400.80
Conversion MJ/dia a W	11.57
Calor requerido para mantener la temperatura (kW)	85.66

**CASO1**

Calor requerido para mantener la temperatura (MJ/dia) con T ambiente mínima	14243.05
Calor requerido para mantener la temperatura (kW)	164.9

**CASO2**

**PÉRDIDAS TÉRMICAS DEL BIODIGESTOR**

**CAPAS DE LA PISCINA DEL BIODIGESTOR**

CAPA	MATERIAL	GROSOR
1	HDPE	1.5 mm
2	HDPE	1 mm
3	NT (2000)	2 mm

**CAPAS DE LA CÚPULA**

CAPA	MATERIAL	GROSOR
1	HDPE	2.5

**DATOS TÉRMICOS**

COEFICIENTE	ESPESOR	CONDUCTANCIA
HDPE	0.0015	0.6
HDPE	0.001	0.6
NT(2000)	0.002	0.038
Conv.int		4000
Conv.ext		1.4

Rtérmica (K/W)	0.77133396
----------------	------------

**CON TEMPERATURA MEDIA (25.7 °C)**

CASO 1

Pérdidas de calor (kW)	
con el suelo	-220.89

**CON TEMPERATURA MAS BAJA (20.8°C)**

CASO 2

Pérdidas de calor (kW)	
con el suelo	-425.10

**CALOR A SUMINISTRAR**

kW	
CASO 1	CASO2
306.54	589.95

**ENERGÍA A SUMINISTRAR POR EL QUEMADOR**

Eficiencia del intercambiador	90%
Eficiencia de la caldera	85%
Energía del quemador (kWh)	6755557

**GENERACIÓN DE BIOGÁS**

Porcentaje de metano promedio	60%
Afluentes (m3/día)	576.00
DQO ingreso (mg/L)	55000.00
Remoción	70.00%
DQO CH4 (mg/L)	0.35
Biogas generado (m3/día)	12936

Gasómetro(m3)	2483.712
---------------	----------

**POTENCIAL ENERGÉTICO DEL BIODIGESTOR**

Poder calorífico inferior del metano (kWh/m3)	11.08
---	-------

Porcentaje de CH4 promedio	0.60
Poder calorífico inferior del biogás (kWh/m3)	6.648
Potencial energético del biogás (kW)	3583.27

#### POTENCIA DEL AGITADOR

Relación de conversión (W/m2)	8
Potencia requerida (kW)	86.4



#### DIMENSIONAMIENTO DE ANTORCHA

Biogás quemado (m3/hora)	1617
Cantidad de quemadores	2
Biogás máximo quemado por unidad	808.50
Modelo	FAII 750 MP



Tubería requerida (ØDN)	200
Altura (mm)	7000

#### DIMENSIONAMIENTO COMPRESORES Y SOPLADORES

Presión min requerida (BAR)	0.2
Biogas generado (m <sup>3</sup> /s)	0.449
Potencia útil (kW)	8.98
Rendimiento	76.50%
Potencia requerida (kW)	23.49



#### BOMBAS DE RECIRCULACION

Relación de conversión (W/m <sup>3</sup> )	8
Potencia requerida (kW)	396.00



**RESUMEN CONSUMO TOTAL BIODIGESTOR**

Potencial energético del biogás (kW)	3583.27
--------------------------------------	---------

Calor requerido para mantener la temperatura interna (kW)	164.850156	4.60%
Pérdidas de calor (kW)	425.1	11.86%
Potencia del agitador (kW)	86.4	2.41%
Potencia compresor (kW)	23.49	0.66%
Potencia recirculacion (kW)	396.00	11.05%
TOTAL (%)		30.58%

**CONSUMO TOTAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

TOTAL (%)	14.12%
-----------	--------

**CONSUMO TOTAL DE ENERGÍA TÉRMICA**

TOTAL (%)	16.46%
-----------	--------

### CONSUMO TOTAL DE ENERGÍA

TOTAL (%)	30.58%
-----------	--------

### ENERGÍA ORIENTADA A CONVERSIÓN ELÉCTRICA

Potencial energético del biogás orientada a la conversión de energía eléctrica (MW)	2.99
---	------

### CONVERSIÓN A ENERGÍA ELÉCTRICA

Tecnología seleccionada	Motor de combustión
Rendimiento de la máquina	45%
Potencia eléctrica generada (MW)	1.3470

### ENERGÍA ELÉCTRICA EXCEDENTE DE VENTA A LA RED

Potencia eléctrica excedente (MW)	0.8411
-----------------------------------	--------

**INGRESOS POR VENTA DE ENERGÍA POR AÑO**

Precio de energía a la red (cUSD/kWh)	11.04
Energía eléctrica mensual de venta a la red (kWh)	605597.07
Ingresos por venta de energía por año (USD)	\$802,295.0

**TONELADAS DE CO2 SIN CONEXIÓN DE LA RED**

Emisiones CO2 (kg/MWh)	550
Emisiones totales al año (ton CO2)	6489.81

**TONELADAS DE CO2 CON CONEXIÓN A LA RED**

Emisiones CO2 (ton/MWh)	0.6945
Emisiones totales al año (ton CO2)	8194.862

## REDUCCION DE TONELADAS DE CO2

Reducción de emisiones (ton CO2)	1705.1
----------------------------------	--------

## TECNOLOGÍAS PARA LA CONVERSIÓN A ENERGÍA ELECTRICA

Generación eléctrica	Rendimiento		Emisiones CO2 (kg/MWh)	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Motor de combustión	35%	45%	550	850
Microturbina de gas	20%	30%	600	800
Turbina de gas	25%	40%	545	700

<b>Nombre del proyecto:</b>	PROPALMIN CIA.LTDA
<b>Ubicación:</b>	OLMEDO NRO.112 (PANAMERICANA)
<b>Provincia:</b>	GUAYAS
<b>Ciudad:</b>	NARANJAL

### RESUMEN DE RESULTADOS

#### ENERGIA Y CONSUMO

Potencial energético del biogás (kW)	3583.27
Consumo total de energía térmica (%)	16.46%
Consumo total de energía eléctrica (%)	14.12%
Consumo total del biosiggestor (%)	30.58%
Potencia eléctrica excedente para venta a la red (MW)	0.841

#### BENEFICIOS MONETARIOS

Ingresos por venta de energía por año (USD)	\$ 802,295.0
---	--------------

#### REDUCCIÓN DE CO2

Emisiones totales al año sin conexión a la red(ton CO2)	6489.81
Emisiones totales al año con conexión a la red (ton CO2)	8194.86226
Reducción de emisiones (ton CO2)	1705.05

# **Apéndice C**

## **Resultados de la evaluación financiera**

<b>AÑO</b>	<b>ENERGÍA GENERADA [KWh]</b>	<b>EGRESOS (\$)</b>	<b>EGRESOS CON INFLACION (\$)</b>	<b>VALOR PRESENTE (\$)</b>
<b>0</b>		-\$1,600,236.00		
<b>1</b>	2947214.40	\$156,838.61	\$156,838.61	\$169,934.63
<b>2</b>	5894428.80	\$219,505.42	\$219,505.42	\$257,693.27
<b>3</b>	5894428.80	\$219,505.42	\$219,571.93	\$279,295.26
<b>4</b>	5894428.80	\$219,505.42	\$219,638.46	\$302,708.11
<b>5</b>	5894428.80	\$219,505.42	\$219,705.01	\$328,083.61
<b>6</b>	5894428.80	\$219,505.42	\$219,771.58	\$355,586.30
<b>7</b>	5894428.80	\$219,505.42	\$219,838.17	\$385,394.50
<b>8</b>	5894428.80	\$219,505.42	\$219,904.78	\$417,701.46
<b>9</b>	5894428.80	\$219,505.42	\$219,971.41	\$452,716.67
<b>10</b>	5894428.80	\$219,505.42	\$220,038.06	\$490,667.14
<b>11</b>	5894428.80	\$219,505.42	\$220,104.74	\$531,798.93
<b>12</b>	5894428.80	\$219,505.42	\$220,171.43	\$576,378.73
<b>13</b>	5894428.80	\$219,505.42	\$220,238.14	\$624,695.58
<b>14</b>	5894428.80	\$219,505.42	\$220,304.87	\$677,062.75
<b>15</b>	5894428.80	\$219,505.42	\$220,371.62	\$733,819.77
			<b>Tasa de descuento (%)</b>	8.35%
			<b>Tasa de inflación (%)</b>	0.03%
			<b>LCOE (c\$/kWh)</b>	12.13

AÑO	ENERGÍA GENERADA [KWh]	PRECIO DE LA ENERGÍA [c\$/KWh]	INGRESOS (\$)	EGRESOS (\$)	EGRESOS CON INFLACION (\$)	FLUJO DE CAPITAL (\$)	FLUJO ACUMULADO (\$)	VALOR PRESENTE (\$)
0						-\$1,600,236.00	-\$1,600,236.00	-\$1,600,236.00
1	2947214.40	12.13	\$357,497.11	\$136,858.61	\$136,858.61	\$220,638.50	-\$1,379,597.50	\$220,638.50
2	5894428.80	12.13	\$714,994.21	\$199,525.42	\$199,525.42	\$515,468.80	-\$864,128.71	\$515,468.80
3	5894428.80	12.13	\$714,994.21	\$199,525.42	\$199,585.87	\$515,408.34	-\$348,720.37	\$515,408.34
4	5894428.80	12.13	\$714,994.21	\$199,525.42	\$199,646.35	\$515,347.86	\$166,627.50	\$515,347.86
5	5894428.80	12.13	\$714,994.21	\$199,525.42	\$199,706.84	\$515,287.37	\$681,914.87	\$515,287.37
6	5894428.80	12.13	\$714,994.21	\$199,525.42	\$199,767.35	\$515,226.86	\$1,197,141.73	\$515,226.86
7	5894428.80	12.13	\$714,994.21	\$199,525.42	\$199,827.88	\$515,166.33	\$1,712,308.06	\$515,166.33
8	5894428.80	12.13	\$714,994.21	\$199,525.42	\$199,888.43	\$515,105.78	\$2,227,413.84	\$515,105.78
9	5894428.80	12.13	\$714,994.21	\$199,525.42	\$199,949.00	\$515,045.22	\$2,742,459.06	\$515,045.22
10	5894428.80	12.13	\$714,994.21	\$199,525.42	\$200,009.58	\$514,984.63	\$3,257,443.69	\$514,984.63
11	5894428.80	12.13	\$714,994.21	\$199,525.42	\$200,070.18	\$514,924.03	\$3,772,367.72	\$514,924.03
12	5894428.80	12.13	\$714,994.21	\$199,525.42	\$200,130.81	\$514,863.41	\$4,287,231.13	\$514,863.41
13	5894428.80	12.13	\$714,994.21	\$199,525.42	\$200,191.44	\$514,802.77	\$4,802,033.90	\$514,802.77
14	5894428.80	12.13	\$714,994.21	\$199,525.42	\$200,252.10	\$514,742.11	\$5,316,776.01	\$514,742.11
15	5894428.80	12.13	\$714,994.21	\$199,525.42	\$200,312.78	\$514,681.43	\$5,831,457.44	\$514,681.43
							Tasa de descuento (%)	8.35%
							Tasa de inflación (%)	0.03%
							VAN (\$)	\$5,831,457.44
							TIR	27.39%
							PRI (años)	4