

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Diseño de una planta eléctrica a partir de biogás obtenido de Jacintos de
agua (*Eichhornia crassipes*) como materia prima”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Gabriel Andrés Zambrano Vera

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedico de forma muy especial a mi padre Guillermo Zambrano, por su gran sacrificio y apoyo incondicional en todo momento, por volver mis sueños y metas suyos ante cualquier adversidad. A mi madre Nela Vera por sus consejos y palabras de motivación en los momentos más adversos y a mi hermana María Victoria por la confianza que siempre deposita en mí.

A mis amigos por ser el apoyo y el sostén en los momentos más duros y por sacarme una sonrisa en los ratos más amargos.

Gabriel Zambrano Vera

AGRADECIMIENTO

Mi más profundo agradecimiento a mis padres por su incondicional ayuda durante toda mi formación profesional.

A mis amigos Hilbert Burgos, Karla Gonzales, David Laínez, Dairo Lojano, Augusto Vera e Isabel Cordero por su amistad sincera e incondicional y por haber crecido junto a mi durante estos años de vida académica llenos de alegrías y sufrimientos.

A mi tío José Manuel Vera y a mi primo Bryan Zambrano por su gran apoyo convirtiéndose en pilares fundamentales de mi etapa estudiantil.

A mi amigo de toda la vida Anthony Zambrano y a mi gran amiga Cristina Zamora por su apoyo absoluto y por estar conmigo en los buenos y malos momentos.

A mi tutor Jorge Duque, MSc., por su excelente guía durante la elaboración de este proyecto.

Gabriel Zambrano Vera

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Gabriel Andrés Zambrano Vera y doy mi 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"



Gabriel Andrés
Zambrano Vera

EVALUADORES

.....
Ph.D Miguel Quilambaqui Jara

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
MSc. Jorge Duque Rivera

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El uso de energías renovables es cada vez más común en el mundo entero y en Ecuador, que se caracteriza desde el 2016 como uno de los cinco países con mayor seguridad energética en el uso de energías limpias. No obstante, la mayor parte proviene de fuentes hidroeléctricas dándose un mínimo porcentaje a la generación a partir de biomasa. Por ello el presente proyecto tiene por objetivo el diseño de una planta eléctrica a partir de biogás que surja del aprovechamiento de Jacintos de agua como materia prima, justificando que esta especie está catalogada como una de las más invasivas del mundo generando un conjunto de problemas ambientales, económicos, sociales y sanitarios.

El diseño de la planta se realizó para que genere una potencia neta de 500 kW. No obstante, el dimensionamiento se realizó para generar aproximadamente 1 MW debido al consumo energético que demandaría su mismo funcionamiento. Se determinó que las condiciones idóneas de operación eran bajo condiciones mesofílicas, con biodigestores de cúpula fija, sistema de alimentación por lotes y con tiempo de residencia hidráulico de 20 días.

Se obtuvo que la biomasa debía de pasar un pretratamiento previo al proceso biológico para aumentar el potencial de generación de biogás, el cual también debió de pasar por un proceso de purificación antes de poder ser aplicado para generación eléctrica. Finalmente, se obtuvo que el proyecto es viable desde el punto de vista ambiental y social, pero necesita de varios incentivos y apoyo gubernamental para ser económicamente rentable.

Palabras claves: Jacinto de agua, biogás, biomasa, planta eléctrica.

ABSTRACT

The use of renewable energies is increasingly common throughout the world and in Ecuador, which has been characterized since 2016 as one of the five countries with the greatest energy security in the use of clean energies. However, most of it comes from hydroelectric sources, with a minimal percentage being generated from biomass. For this reason, the present project aims to design a power plant from biogas that arises from the use of water hyacinths as raw material, justifying that this species is classified as one of the most invasive in the world, generating a set of environmental, economic, social and health problems.

The plant was designed to generate a net power of 500 kW. However, the dimensioning was carried out to generate approximately 1 MW due to the energy consumption that its operation would demand. It was determined that the ideal operating conditions were under mesophilic conditions, with fixed dome biodigesters, a batch feeding system and a hydraulic residence time of 20 days.

It was obtained that the biomass had to undergo a pre-treatment prior to the biological process to increase the potential for biogas generation, which also had to go through a purification process before it could be applied for electricity generation. Finally, it was found that the project is viable from an environmental and social point of view, but it needs various incentives and government support to be economically profitable.

Keywords: *Water hyacinth, biogas, biomass, power plant.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VII
SIMBOLOGÍA.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE PLANOS.....	XII
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1 Definición del Problema.....	2
1.2 Justificación del proyecto	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Marco teórico.....	4
1.4.1 Antecedentes	4
1.4.2 Biomasa	5
1.4.3 Digestión anaeróbica	7
1.4.4 Biodigestores	8
1.4.5 Tratamiento del biogás producido.....	11
1.4.6 Generación eléctrica con el biogás	12
CAPÍTULO 2.....	13
2. Metodología	13

2.1	Objetivos	13
2.2	Restricciones	14
2.3	Funciones	15
2.4	Propuestas de alternativas de solución	15
2.5	Recolección de materia prima	16
2.5.1	Cosecha artesanal	16
2.5.2	Recolección mediante grúa	17
2.5.3	Recolección mediante barcaza	17
2.6	Pretratamiento del jacinto de agua	17
2.6.1	Explosión de vapor (“wex explotion”)	17
2.6.2	Solución alcalina de NaOH (Hidróxido de sodio)	18
2.6.3	Solución ácida de H ₂ SO ₄ (Ácido sulfúrico).....	18
2.7	Biodigestión anaeróbica	18
2.7.1	Monodigestión del jacinto de agua.....	18
2.7.2	Codigestión del jacinto de agua y biomasa residual	19
2.8	Biodigestor	19
2.8.1	Biodigestor cúpula fija	19
2.8.2	Biodigestor cúpula móvil	19
2.8.3	Biodigestor tubular	20
2.9	Tratamiento del Biogás.....	20
2.9.1	Absorción por carbón activado.....	20
2.9.2	Absorción con compuestos de hierro.....	20
2.9.3	Absorción por agua.....	20
2.10	Generación eléctrica.....	21
2.10.1	Motor de combustión interna	21

2.10.2	Microturbinas	21
2.10.3	Turbinas de vapor.....	21
2.11	Diseño y Cálculos preliminares	22
2.11.1	Diseño y dimensionamiento del biodigestor de la planta.	22
2.11.1	Recolección de jacintos de agua	29
2.11.2	Proceso de pretratamiento: Explosión de vapor.	30
2.11.1	Digestión anaeróbica del Jacinto de agua.	31
2.11.1	Tratamiento de biogás	32
2.11.1	Motor de combustión interna	33
CAPÍTULO 3.....		34
3.	Resultados y análisis	34
3.1	Resultados y análisis del proceso pretratamiento.	34
3.2	Biodigestión anaeróbica del jacinto de agua	37
3.3	Análisis y selección de elementos principales del biodigestor.....	38
3.3.1	Diseño del biodigestor:	38
3.3.2	Cuerpo	39
3.3.3	Zona de carga.....	39
3.3.4	Zona de descarga.....	40
3.3.5	Zona de digestión	40
3.3.6	Sistema de agitación.....	40
3.4	Tratamiento del biogás	49
3.5	Dimensionamiento y selección de equipo de generación eléctrica.	50
3.6	Análisis económico.....	52
CAPÍTULO 4.....		60
4.	Conclusiones Y Recomendaciones	60

4.1 Conclusiones..... 60

4.2 Recomendaciones..... 61

BIBIOGRAFÍA

APÉNDICES

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
EPPO	European and Mediterranean Plant Protection Organization
ARCONEL	Agencia de Regulación y Control de Electricidad
MMA	Ministerio del Medio Ambiente
GEF	Global Environment Facility
IUCN	International Union for Conservation of Nature
JA	Jacinto de agua
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
HRT	Tiempo de residencia hidráulico

SIMBOLOGÍA

kW	Kilovatio
MW	Megavatio
kWh	Kilovatio hora
J	Joules
Kcal	Kilocaloría
°C	Grados Celsius
m	Metro
kg	Kilogramo
h	Hora
s	Segundo

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Clasificación de la Biomasa respecto de su origen.	5
Figura 1.2 Diagrama de flujo del proceso de biodigestión anaeróbica	7
Figura 1.3 Esquema de un biodigestor de cúpula móvil (Hindú)	10
Figura 1.4 Esquema de un biodigestor de cúpula fija (Chino)	10
Figura 1.5 Esquema de un biodigestor tubular (bolsa de polietileno)	11
Figura 2.1 Diagrama de árbol de objetivos	13
Figura 2.2 Diagrama de árbol de objetivos y restricciones	14
Figura 2.3 Diagrama de caja negra de funciones	15
Figura 2.4 Diagrama de caja transparente de funciones	15
Figura 2.5 Etapas de crecimiento bacteriano en un biodigestor	23
Figura 2.6 Esquema general y variables dimensionales del biodigestor	26
Figura 2.7 Volumen de almacenamiento del biogás representada por el área sombreada.....	28
Figura 2.8 Estructura de la biomasa lignocelulósica, antes y después del pretratamiento	30
Figura 2.9 Diagrama de operación de la unidad de pretratamiento de explosión húmeda de vapor.....	30
Figura 2.10 Rendimiento del biogás por g de ST basado en la relación C/N	32
Figura 2.11 Esquema del funcionamiento del tren de purificación del biogás	33
Figura 3.1 Esquema de pretratamiento del Jacinto de agua	35
Figura 3.2. Ilustración de equipamiento para pretratamiento.....	35
Figura 3.3 Influencia de la temperatura sobre la producción de biogás	37
Figura 3.4 Esquema de biodigestor de cúpula fija.....	40
Figura 3.5 Semejanzas geométricas para la selección del agitador del biodigestor.....	42
Figura 3.6 Dimensiones del agitador del biodigestor.....	43
Figura 3.7 Grafica de relación del número de potencia y Reynolds	45
Figura 3.8 Vista isométrica del diseño del biodigestor con sus correspondientes sistemas de operación.....	49
Figura 3.9 Imagen referencial lateral del equipo seleccionado.....	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Composición de polímeros orgánicos del jacinto de agua.....	6
Tabla 1.2 Cuadro de comparación de los tipos de biodigestión anaeróbica.....	8
Tabla 1.3 Características de tipos de biodigestores por cúpula	9
Tabla 2.1 Cuadro de comparación por pares para objetivos	14
Tabla 2.2 Tabla de comparación por pares para criterios de selección.....	16
Tabla 2.3 Matriz de decisión para recolección de materia prima.....	17
Tabla 2.4 Matriz de decisión para pretratamiento de biomasa.	18
Tabla 2.5 Matriz de decisión para biodigestión anaeróbica.	19
Tabla 2.6 Matriz de decisión para el diseño del biodigestor.	20
Tabla 2.7 Matriz de decisión para la purificación del biogás.	21
Tabla 2.8 Información típica de Tecnologías para producción de energía a partir de biogás.....	21
Tabla 2.9 Matriz de decisión para tecnología de generación.	22
Tabla 2.10 Características de la barcaza de recolección	29
Tabla 2.11 Características del proceso de explosión de vapor	31
Tabla 2.12 Parámetros del proceso de digestión anaeróbica en función de la temperatura y tiempo de retención hidráulica.....	31
Tabla 2.13 Características del tanque de desulfuración.....	32
Tabla 3.1. Características de cortadora para pretratamiento mecánico	36
Tabla 3.2 Características principales de la biomasa y biogás obtenido	38
Tabla 3.3 Parámetros generales del tamaño de la planta	38
Tabla 3.4 Parámetros de operación del biodigestor	41
Tabla 3.5 Semejanzas geométrica para agitador de palas sin deflectores.....	42
Tabla 3.6 Parámetros de sistema de calentamiento del biodigestor	46
Tabla 3.7 Especificaciones del motor de combustión seleccionado para generación eléctrica	51
Tabla 3.8 Equipos necesarios para la operación de la planta eléctrica	52
Tabla 3.9 Gastos de trabajo para la operación de la planta eléctrica	53
Tabla 3.10 Proyección de ingresos por operación anual de la operación de la planta eléctrica	53

Tabla 3.11 Resumen de gastos necesarios estimados por mantenimiento.....	54
Tabla 3.12 Resumen de gastos por servicios básicos estimados por mes y semestre	54
Tabla 3.13 Resumen de gastos por publicidad estimados por mes y semestre	54
Tabla 3.14 Resumen de gastos de personal estimados por mes y año	55
Tabla 3.15 Resumen de gastos estimados para 4 años.....	55
Tabla 3.16 Resumen porcentaje de ventas con una producción del 40%	56
Tabla 3.17 Margen de contribución de planta.....	56
Tabla 3.18 Resumen de costos fijos estimados para 4 años	57
Tabla 3.19 Resumen de costos variables estimados para 4 años.....	57
Tabla 3.20 Tabla de amortización del préstamo para 10 años.....	57
Tabla 3.21 Resumen de flujo de cajas para 5 años.....	58

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1. Esquema operativo de la planta

Plano 2. Biodigestor – vista lateral

Plano 3. Ilustración 3D de la planta

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El uso de energías renovables ha ido incrementando con el pasar del tiempo ya que son el presente y futuro para el desarrollo humano al provenir de fuentes inagotables que no afectan a nuestro entorno. En la actualidad, el Ecuador es un referente mundial en el uso de estas energías figurando entre los cinco países con mayor seguridad energética según el informe “Energías limpias” de la universidad de Vancouver en 2016 (El Telégrafo, 2016). Acorde a la estadística anual del sector eléctrico ecuatoriano (ARCONEL, 2019) el 64.88% de la potencia efectiva generada en el país corresponde a energías renovables, pero de este porcentaje solamente el 1.69% es generado por biomasa y 0.08% es atribuido al biogás.

Los recursos en materia de biomasa en Ecuador tienen una gran importancia debido a la actividad agrícola y ganadera, además de la gran biodiversidad que caracteriza al país, estos recursos pueden ser útiles para la generación de energía mecánica, térmica y combustible como en es el caso del biogás. Se pueden distinguir dos tipos de biomasa, la biomasa virgen producto de plantas terrestres o acuáticas y la biomasa residual fruto de residuos agrícolas, ganaderos e industriales (Rodríguez Meléndez et al., 2017).

El jacinto de agua es una planta invasiva con gran capacidad de reproducción que crece en cuerpos de agua dulce como embalses o represas y que acarrea graves problemas para el medio ambiente y el desarrollo humano. Las consecuencias negativas asociadas a las invasiones de esta planta obligan a que sea retirada y de ser posible aprovechada (EPPO, 2008). Por ello que surge la alternativa de que sea usada como fuente de energía renovable, convirtiéndola en biomasa residual de la cual podría obtenerse biogás para la producción de energía eléctrica limpia (Harley, 1990).

La principal motivación para la obtención de energía mediante la biomasa del jacinto de agua es que está siempre disponible y no necesita de cultivo. No obstante, presenta

como limitante para su utilización y aplicación su alto contenido de agua (entre 90 y 95 %) que dificulta su recolección y procesamiento. (EPPO, 2008). Además, en comparación con otras fuentes de biomasa el Jacinto de agua tiene bajo contenido de lignina (10 %, 15-30% otras fuentes) que es una fibra que protege de la degradación química favoreciendo el proceso de fermentación. Sin embargo, este compuesto no se transforma en azúcares, lo cual limita la capacidad microbiológica y por ende obtención de biogás producto de la fermentación (Rodríguez Meléndez et al., 2017). Por ello, en algunas aplicaciones lo óptimo es utilizar junto al jacinto de agua otro tipo de biomasa residual con la finalidad de alcanzar un proceso de codigestión anaeróbica que incremente el potencial de generación.

1.1 Definición del Problema

El jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) conocido también como lechuguín es una planta acuática catalogada como invasora al estar presente en diversos cuerpos de agua alrededor del mundo, su ritmo de reproducción y crecimiento es tan elevado al punto de poder duplicar su población en tan solo dos semanas si se dan las condiciones propicias. La presencia de esta planta es una amenaza para varios sectores productivos ya que ocasiona grandes impactos ambientales, económicos, sociales y sanitarios.

Los principales problemas que se relacionan con las invasiones del JA es que impiden el correcto desarrollo de los ecosistemas acuáticos; limita y restringe las actividades de pesca, turismo, comercio y navegación; impide la comunicación e interacción entre comunidades; disminuye la calidad del agua haciéndola no apta para el consumo humano y complicando su proceso de potabilización; incrementa el proceso de evapo-transpiración y genera un hábitat ideal para plagas, enfermedades y animales peligrosos. Como alternativa para controlar la sobrepoblación de esta especie acuática han surgido varias tecnologías de aprovechamiento; entre las principales constan su utilización para tratamiento de aguas con metales pesados, procesamiento de su biomasa para la obtención combustibles sólidos como briquetas y empleo energético mediante fermentación para obtener fuentes de energías sostenibles como bioetanol y biogás.

Aprovechar esta planta invasora como materia prima de biomasa vegetal permitiría la generación de biogás, el cual podría utilizarse para producir energía eléctrica renovable en pequeña escala y poder abastecer del servicio básico a las comunidades aledañas a los embalses y represas que son las más afectadas por su presencia. No obstante, las cualidades del JA para la generación de un biogás constante y seguro pueden no ser suficientes para esta aplicación, por lo que analizar alternativas de solución como cogeneración y rentabilidad económica son un factor crucial para la implementación del diseño propuesto.

1.2 Justificación del proyecto

Los jacintos de agua constituyen una grave problemática en el sector ambiental, de salud y socioeconómico del mundo (EPPO, 2008), en Ecuador por ejemplo el embalse Daule-Peripa contiene cerca del 40% de su espejo de agua invadido por esta planta que ha sido declarada por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN por si siglas en inglés) entre unas de las 100 especies invasivas más peligrosas representando una seria amenaza para la conservación del equilibrio de los embalses y represas.

En Ecuador hay cientos de comunidades afectadas por esta planta, ya que la mayoría de las poblaciones adyacentes a los cuerpos de agua se dedica a la agricultura y comercio, por ende, la presencia del lechuguín infiere negativamente en la conservación de los ecosistemas y en el desarrollo normal de los cultivos a la vez que limita y perjudica la comercialización de estos.

Los lechuguines se pueden controlar mediante diferentes esquemas de corte, produciendo una masa húmeda, cuyo aprovechamiento como fuente de energía por vía de producción de biogás ha sido explorada en otros países. Se justifica determinar qué tan factible es desde el punto de vista tecnológico, económico, ambiental y social producir energía eléctrica a partir de esta biomasa.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar una planta para la generación de energía eléctrica mediante el uso de biogás obtenido de la transformación de Jacintos de agua (*Eichhornia crassipes*) como materia prima, para implementarlo en comunidades no servidas.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Revisar fuentes bibliográficas y artículos científicos relacionados con la obtención del biogás y las propiedades del Jacinto de agua como fuente de biocombustible.
2. Dimensionar la planta de generación de energía eléctrica de pequeña escala.
3. Dimensionar el sistema de producción de biogás.
4. Seleccionar el motor de combustión interna adaptado para el uso de biogás junto con el generador de energía eléctrica.
5. Realizar una evaluación de la factibilidad económica y ambiental del proyecto.
6. Realizar el diseño 3D y planos respectivos de los biodigestores y una ilustración general de la planta.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Antecedentes

En Ecuador la generación eléctrica mediante biogás no es algo nuevo, en la actualidad ya existen dos plantas de generación que aprovechan la biomasa producida por la basura de las ciudades de Cuenca y Quito. Para estos casos el biogás se obtiene por la degradación de materia orgánica derivada de los residuos sólidos los cuales son depositados en los cubetos del Relleno Sanitario técnicamente establecidos y cubiertos por una geomembrana impermeable de alta resistencia para la recolección de residuos urbanos a los que se adapta un sistema de captación del biocombustible mediante tuberías.

Respecto a la utilización del JA en Ecuador ya se ha investigado su factibilidad para la producción de biogás y obtención de abono orgánico empleando un biodigestor de tipo discontinuo, añadiendo además otros tipos de material orgánico como cepa de cerdo y aserrín que contribuyen con la fijación de microorganismos y bacterias necesarias para el proceso de biodigestión anaeróbica. Los resultados arrojados por esta investigación mencionan que el biogás obtenido contiene una cantidad teórica del 43.33% de metano que puede ser considerado dentro del rango aceptable, por lo tanto, puede creerse viable el uso de los Jacintos de agua para la producción de biogás (Montenegro Aquino et al., 2010).

1.4.2 Biomasa

Se considera como biomasa a toda sustancia sólida, líquida o gaseosa de procedencia orgánica (Cleveland & Morris, 2015). La biomasa puede clasificarse de diversas maneras, pero su división más general depende de su origen.

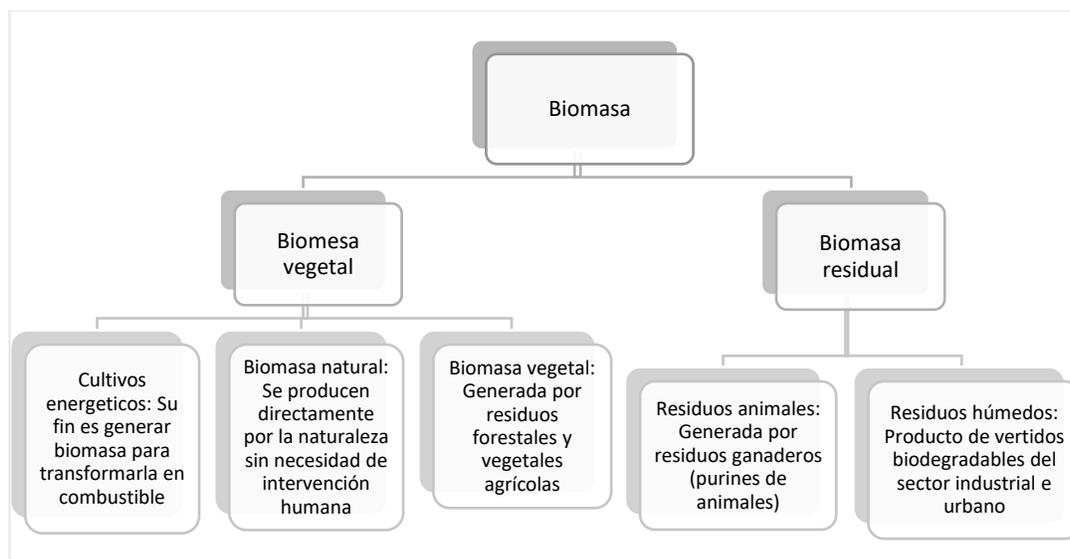


Figura 1.1 Clasificación de la Biomasa respecto de su origen.
Fuente: Producción propia

El jacinto de agua pertenece a la categoría de biomasa vegetal natural que se produce libremente en cualquier medio sin necesidad de intervención humana.

Es un tipo de biomasa húmeda con un bajo porcentaje de sólidos. Mediante la siguiente tabla se presente la composición de los compuestos o polímeros orgánicos del Jacinto de agua y el poder calorífico que representa cada parte de la planta.

Tabla 1.1 Composición de polímeros orgánicos del jacinto de agua.

Composición (seca en % de masa)	Raíces	Tallos	Hojas
Celulosa	17.07	28.23	28.91
Hemicelulosa	15.25	26.35	30.8
Lignina	14.63	17.44	4.59
Proteína	2.6	6.8	20.97
Lípidos	0.47	0.91	1.79
Ceniza	49.97	20.26	12.95
Valor calorífico (kJ/g)	8.46	13.52	14.93

Fuente: (Cheng et al., 2010)

No toda la biomasa es realmente útil para generar energía, acorde a la tabla 1.1, las partes aprovechables son los tallos hojas debido a su alto contenido en celulosa y hemicelulosa, mientras que la raíz es una zona compleja de digerir producto de su alto contenido de ceniza (metales pesados). Por esta razón, la biomasa del jacinto de agua en su proceso de recolección debe incluir un tratamiento previo a la digestión anaerobia en el que se eliminen las zonas no convenientes para generación de biogás.

Después de su recolección el JA debe pasar por un tratamiento previo al proceso digestivo en el que se deseche cualquier agente no aprovechable, luego se somete a un proceso de prensado con el fin de eliminar la mayor cantidad de agua del sustrato sólido. Por último, se utiliza un proceso de pretratamiento con el propósito de destruir varios componentes de la pared celular de la planta para facilitar el proceso de digestión anaeróbica.

El rendimiento de la biomasa dentro del digestor para generación de biogás depende de algunas características.

Sólidos totales (ST)

Toda biomasa se compone por agua y un porcentaje de materia sólida o concentración de sólidos totales (ST) que se definen como la cantidad de materia que perdura como residuo luego de la evaporación.

Sólidos volátiles (SV)

Los sólidos volátiles (SV) se definen como la fracción de los sólidos totales que se pueden degradar para producir biogás durante un proceso biológico, es decir, es el contenido real de la biomasa que se transforma en biocombustible.

1.4.3 Digestión anaeróbica

La biodigestión anaeróbica es el proceso mediante el cual se obtiene el biogás, es un proceso biológico que ocurre en ausencia de oxígeno, dicho proceso se realiza dentro de un biodigestor en donde existen bacterias que producen la degradación de la biomasa. El resultado es una mezcla de gases (metano y dióxido de carbono principalmente) y una solución acuosa (bioetanol) que posee los restos de la biomasa. Este proceso biológico consta de 4 etapas que se describen a continuación.

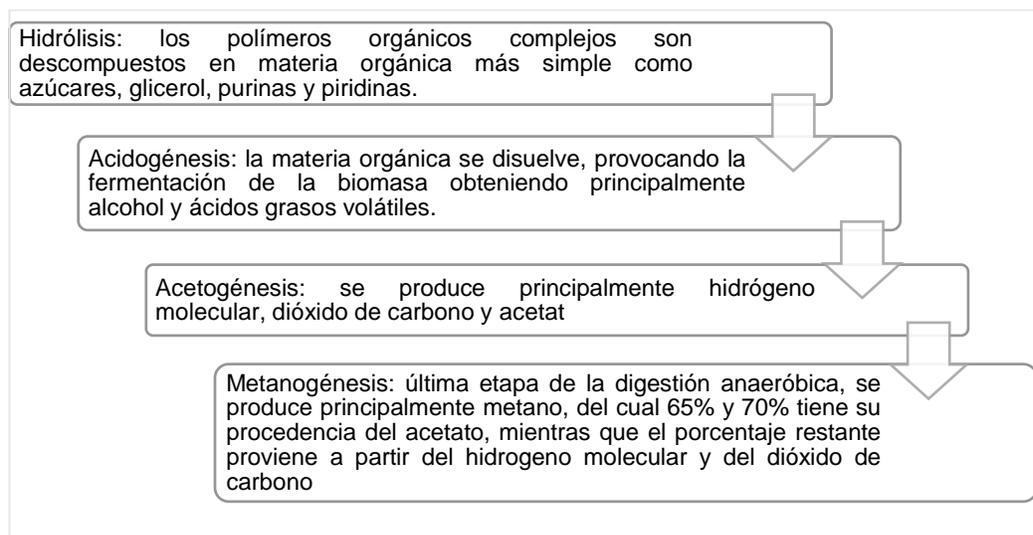


Figura 1.2 Diagrama de flujo del proceso de biodigestión anaeróbica

Fuente: Producción propia

La biodigestión anaeróbica además puede ser clasificada como seca o húmeda en función de la composición o tipo de biomasa de tratamiento. A continuación, se muestra una tabla comparativa de las principales características de ambos procesos.

Tabla 1.2 Cuadro de comparación de los tipos de biodigestión anaeróbica

	Digestión anaeróbica seca	Digestión anaeróbica húmeda
Contenido de sólidos	>15%	<15%
Pre-procesos	Secado	Generalmente mezcla con biomasa residual
Suministro de biomasa	Por lotes o continuo	Por lotes
Post-procesos	Separación de sólidos y líquidos; carga y descarga manual, desulfuración	Separación de sólidos y líquidos, desulfuración
Energía requerida	Bajo, poca necesidad de aislamiento térmico	20 al 30% de energía producida por bombas y mezcladores
Productos obtenidos	Fertilizantes	Fertilizantes y biocombustibles

Fuente: (Marjolaine, 2021)

1.4.4 Biodigestores

Los biodigestores consisten en un tanque cerrado herméticamente que permiten optimizar la fermentación de la materia orgánica que se encuentra en su interior generando la producción de biogás por medio de la biodigestión anaeróbica.

Pueden clasificarse en continuos, discontinuos y semi-continuos. Los biodigestores discontinuos son aquellos en los que la biomasa no es retirada hasta que haya cumplido el tiempo de residencia hidráulica. Los biodigestores

continuos son cargados constantemente con biomasa fresca, descargando una porción de la biomasa que se encontraba en su interior, y los biodigestores semi-continuos permiten el ingreso de biomasa tanto de forma continua como por lotes, por tanto, este proceso se puede extender de manera indefinida (Carta Gonzáles et al., 2009).

Además, los biodigestores también pueden ser clasificados acorde a su cúpula, en esta clasificación se tiene a los de cúpula móvil o hindú, cúpula fija o chino y los tubulares o de polietileno.

Tabla 1.3 Características de tipos de biodigestores por cúpula

	Cúpula Móvil (Hindú)	Cúpula Fija (Chino)	Tubular (bolsa de polietileno)
Ventajas	Facilidad de operación. Presión constante del gas Facilidad de construcción El volumen del gas visible de forma directa.	Bajo costo de construcción. No requiere de partes móviles. La construcción bajo tierra previene grandes cambios de temperatura	Bajo costo y facilidad de construcción. Altas temperaturas en su interior. Facilidad de mantenimiento y operación. Resistente a la variación del volumen de entrada.
Limitaciones	Tiempo de vida menor que los biodigestores de cúpula fija. Susceptible a la corrosión en las piezas de acero.	Problemas con el almacenamiento, si existen fisuras se pierden grandes cantidades de biogás. La presión del gas varía en función del volumen de la cámara de almacenamiento.	Tiempo de vida corto. Potencial limitado. Susceptible a daños. Baja eficiencia en el tratamiento. En caso de mal manejo puede representar un riesgo para la salud.

Fuente: (Baredar et al., 2020)

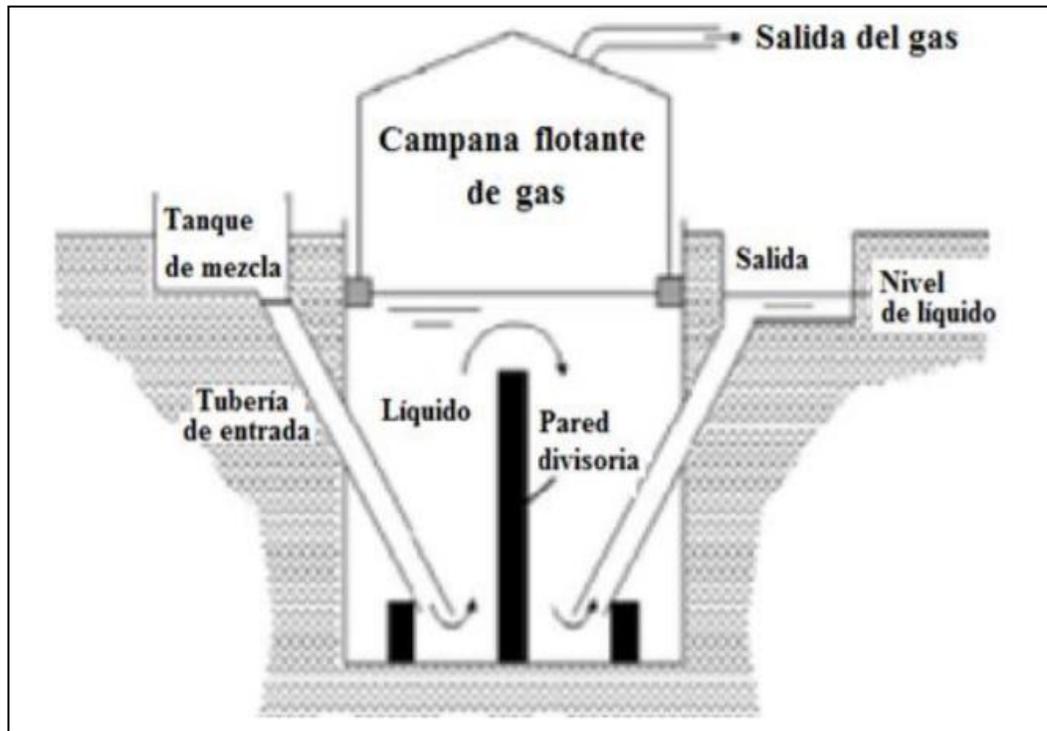


Figura 1.3 Esquema de un biodigestor de cúpula móvil (Hindú)

Fuente: (Barrera-Cardoso et al., 2020)

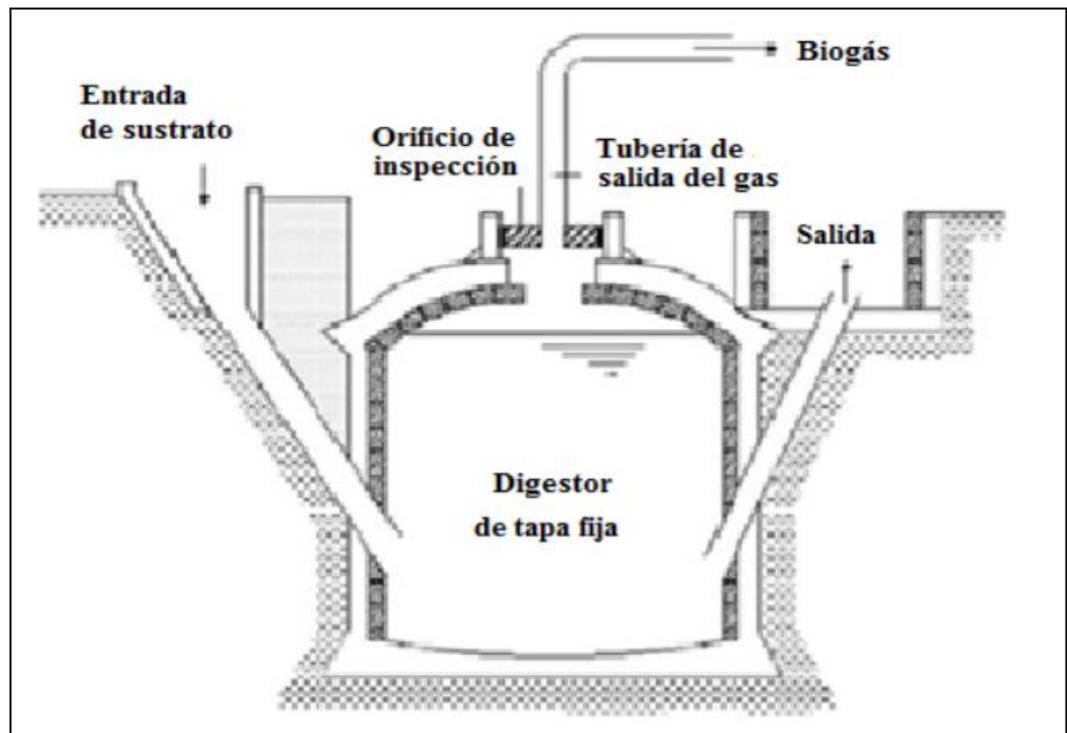


Figura 1.4 Esquema de un biodigestor de cúpula fija (Chino)

Fuente: (Barrera-Cardoso et al., 2020)

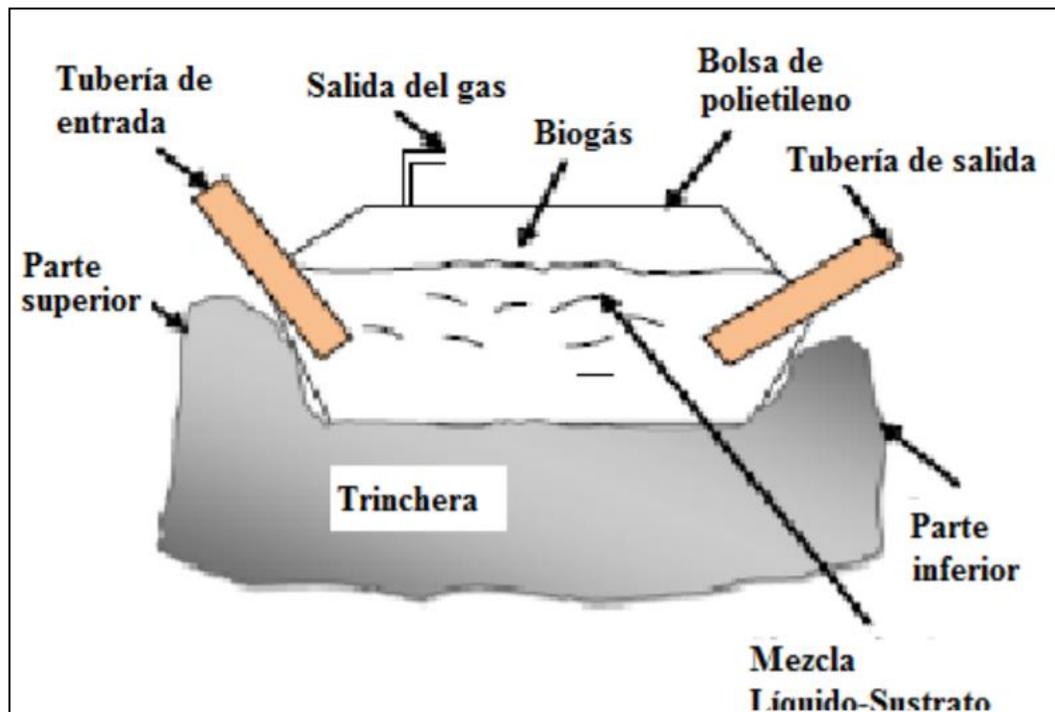


Figura 1.5 Esquema de un biodigestor tubular (bolsa de polietileno)

Fuente: (Barrera-Cardoso et al., 2020)

1.4.5 Tratamiento del biogás producido

El biogás contiene cantidades considerables de compuestos diferentes al metano como el dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno, oxígeno y ácido sulfhídrico que pueden ser perjudiciales para el equipo de generación de energía al ser compuestos corrosivos y tóxicos. Por ello, es necesario realizar un tratamiento que elimine estas impurezas y mejore la concentración del metano (Santana et al, 2005).

Este proceso es conocido como desulfuración, para el cual existen varios métodos fisicoquímicos como por ejemplo la “adsorción” que consiste en lechos absorbentes de carbón activado e Hidróxido de potasio (KOH), que reaccionan con el ácido sulfhídrico eliminándolo por adherencia, como resultado se tiene azufre puro y agua. (Pérez et al., 2008). Otro método común es la “absorción” que separa el azufre mediante un catalizador de esponja de

hierro, este método también permite la absorción de CO₂ (Horikawa et al., 2004).

1.4.6 Generación eléctrica con el biogás

Para la generación de energía eléctrica se debe utilizar biogás que contenga una concentración elevada de metano, la energía se produce mediante la combustión del gas dentro de un quemador. Se pueden distinguir tres principales tecnologías para transformar el biogás en energía eléctrica. Estos son las microturbinas, motores recíprocos de combustión interna y turbinas de gas. La selección de la mejor opción depende principalmente del flujo del biogás disponible y de la potencia a producir. Para proyectos grandes de más de 3 MW lo idóneo es utilizar turbinas.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

La elaboración general de este proyecto se desarrolló en base a revisión bibliográfica de trabajos e investigaciones realizadas previamente en el Ecuador y el mundo sobre temas relacionados con la digestión anaeróbica, diseño de biodigestores, producción de biogás y su utilización para generación eléctrica teniendo como biomasa al Jacinto de agua. El principal interés de este proyecto es lograr un dimensionamiento adecuado aprovechando las distintas tecnologías de generación de biogás. El proceso de diseño se basa en la definición de requerimiento, funciones y restricciones de un diseño conceptual preliminar que de una posible solución al problema definido al inicio.

2.1 Objetivos

Para establecer los objetivos del diseño se hace uso de un árbol de jerarquía para categorizarlos por importancia.

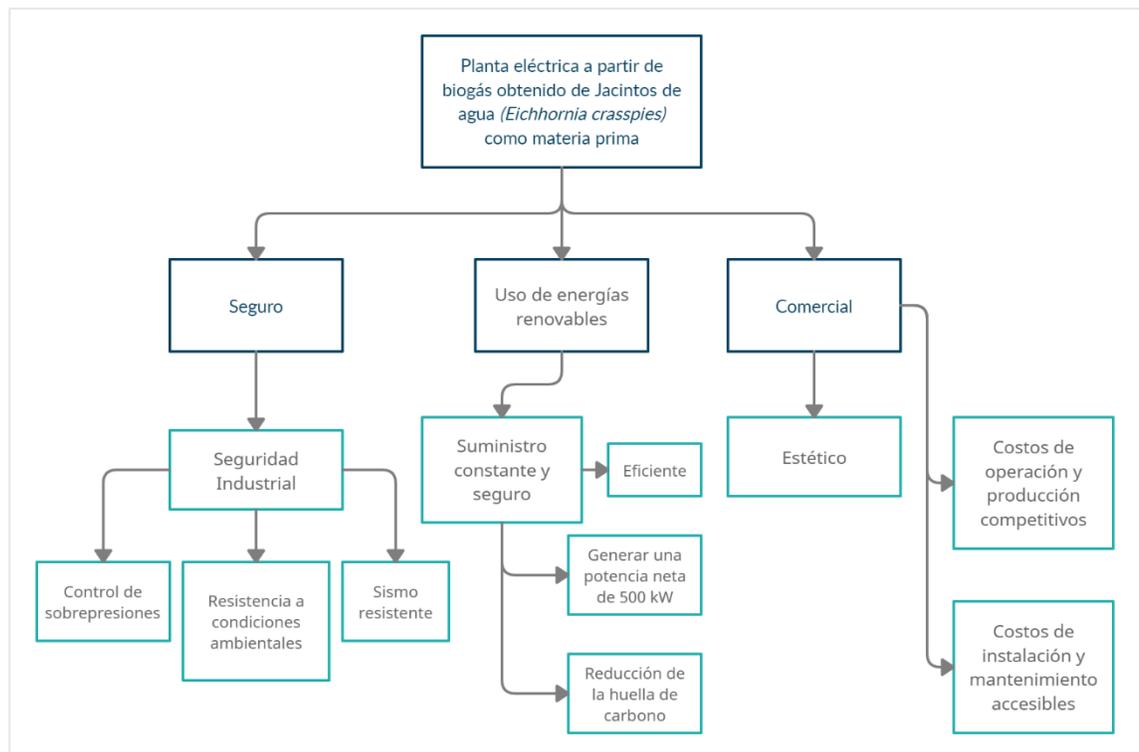


Figura 2.1 Diagrama de árbol de objetivos

Fuente: Producción propia

Tabla 2.1 Cuadro de comparación por pares para objetivos

Metas	Seguridad industrial	Suministro constante y seguro	Costos de operación y producción competitivos	Estético	Total
Seguridad industrial	1	0	1	1	3
Suministro constante y seguro	1	1	1	1	4
Costos de operación y producción competitivos	0	0	1	1	2
Estético	0	0	0	1	1

Fuente: Producción propia

Se considera 4 como el objetivo más importante y 1 menos importante, se establece que el objetivo de mayor importancia es el suministro constante y seguro.

2.2 Restricciones

Para establecer las restricciones se realiza un diagrama de flujo combinado para los objetivos y restricciones, los objetivos van enmarcados en rectángulos celestes mientras que las restricciones se enmarcan en recuadros blancos.

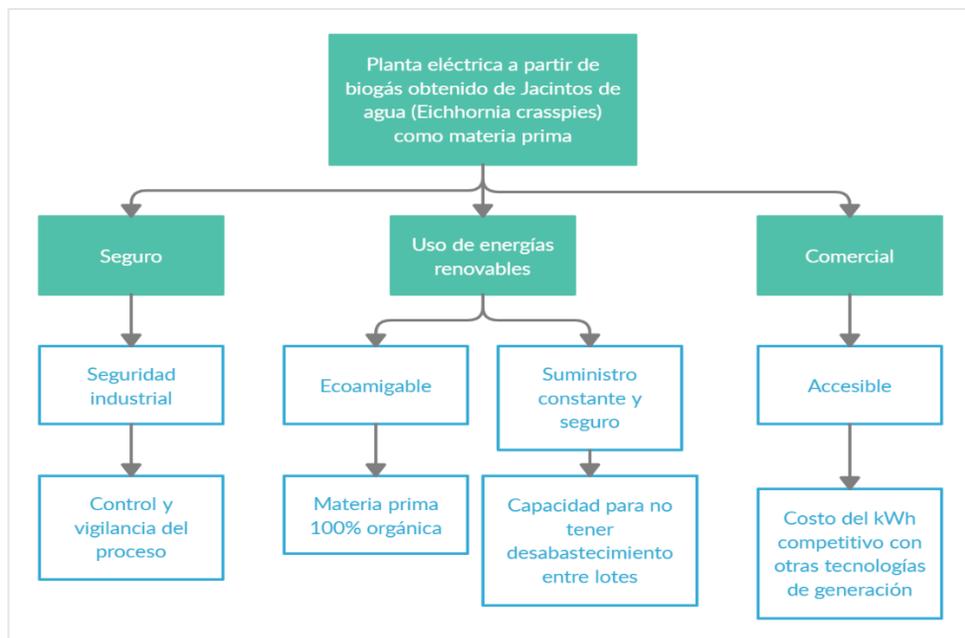


Figura 2.2 Diagrama de árbol de objetivos y restricciones

Fuente: Producción propia

2.3 Funciones

Para el establecimiento de las funciones se utilizan las herramientas Caja negra y transparente, en los cuales se hace referencia al funcionamiento del sistema de forma general en el primer caso y de manera detallada en el segundo.

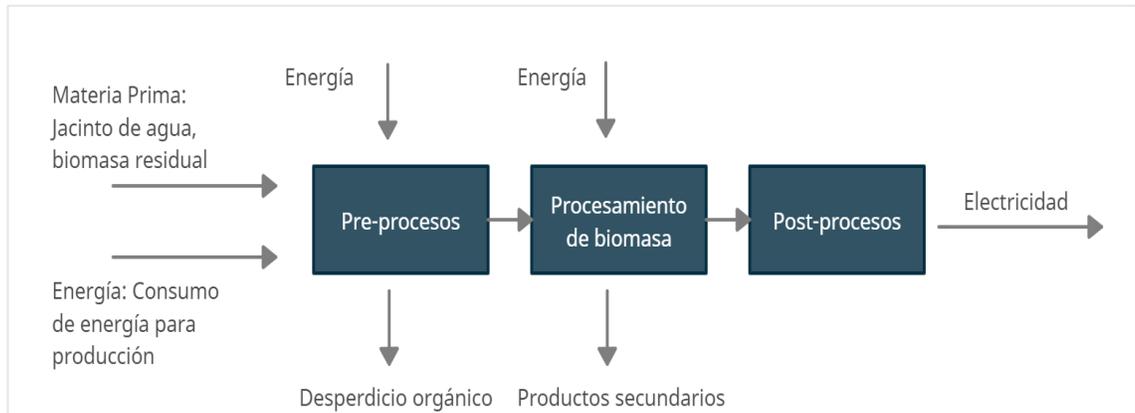


Figura 2.3 Diagrama de caja negra de funciones
Fuente: Producción propia

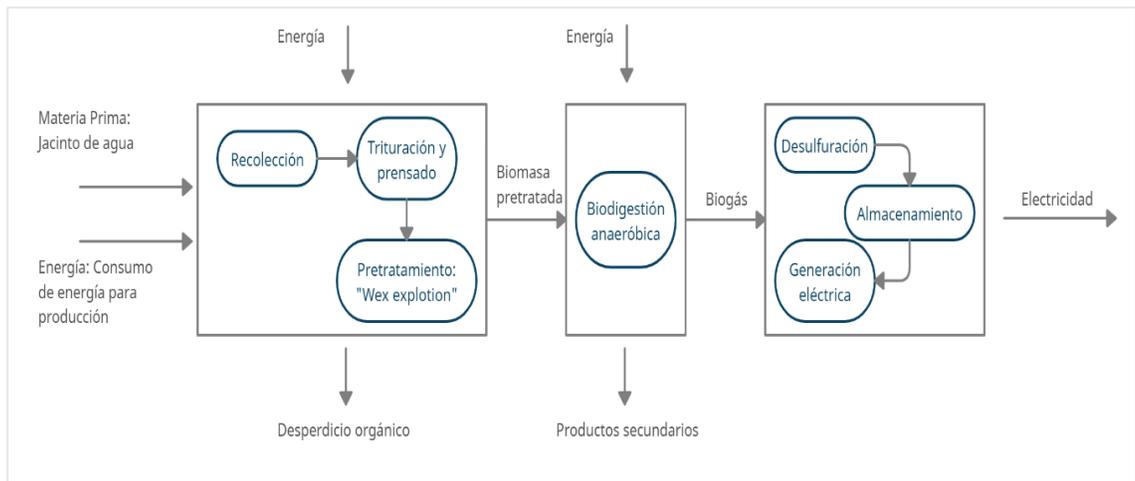


Figura 2.4 Diagrama de caja transparente de funciones
Fuente: Producción propia

2.4 Propuestas de alternativas de solución

Las alternativas de solución fueron clasificadas por etapas, divididas en recolección de materia prima, biodigestión anaeróbica, biodigestor, tratamiento del biogás y generación eléctrica.

La selección de la mejor alternativa se realizó en base a las funciones, restricciones y objetivos previamente definidos y reflejados mediante los siguientes criterios de selección.

- Costo: Hace referencia al costo de la materia prima, tecnología, inversión, costos de operación y mantenimiento
- Procesabilidad: Tecnología que tenga la capacidad de procesamiento y generación establecida en las restricciones.
- Rendimiento: Tecnología o proceso que garantice estabilidad y constancia de producción.
- Seguridad: Tecnología o proceso que garantice la correcta operación, reduzca los riesgos ambientales y de la salud de los operarios.

Tabla 2.2 Tabla de comparación por pares para criterios de selección.

	Costo	Procesabilidad	Seguridad	Rendimiento	Total
Costo	1	0	0	0	1
Procesabilidad	1	1	1	1	4
Seguridad	1	0	1	0	2
Rendimiento	1	0	1	1	3

Fuente: Producción propia

Se considera “4” como el criterio de mayor importancia y “1” como el criterio de menor importancia.

2.5 Recolección de materia prima

2.5.1 Cosecha artesanal

Representa un bajo costo de implementación, pues requiere únicamente de la destreza del personal y del uso de herramientas y equipos de seguridad adecuados. No obstante, demanda abundante mano de obra humana, siendo ineficiente para cosechar zonas muy amplias (Chicas, Melara, & Pérez, 2021).

2.5.2 Recolección mediante grúa

La grúa hidráulica se sitúa en un puerto de desembarco, por lo que representa un costo de fabricación elevado debido a toda la infraestructura que se debe construir.

2.5.3 Recolección mediante barcaza

No requiere de mucho personal humano para operar, por lo que a largo plazo se considera económicamente más viable y confiable.

Tabla 2.3 Matriz de decisión para recolección de materia prima.

	%	Cosecha artesanal		Grúa tipo pescadora		Barcaza de recolección	
Procesabilidad	40	3	1.2	3	1.2	5	2.0
Rendimiento	30	1	0.3	5	1.5	4	1.2
Seguridad	20	3	0.6	4	0.8	4	0.8
Costo	10	1	0.1	3	0.3	3	0.3
		Total	2.2	Total	3.8	Total	4.3

Fuente: Producción propia

2.6 Pretratamiento del jacinto de agua.

El jacinto de agua es del tipo de biomasa lignocelulósica por lo que presenta una estructura resistente a ser degradada biológicamente; el pretratamiento tiene por objetivo destruir la lignina liberando la celulosa y hemicelulosa para que puedan ser hidrolizadas en azúcares y fermentarse para generar metano.

2.6.1 Explosión de vapor (“wex explotion”)

La explosión húmeda (wet explotion) es un método muy eficaz para el pretratamiento de biomasa lignocelulósica, combina efectos térmicos, químicos y mecánicos para solubilizar las azúcares, romper las fibras de lignocelulosa y alterar la cristalinidad de la celulosa incitando a las transformaciones de la lignina (Duque et al., 2016).

2.6.2 Solución alcalina de NaOH (Hidróxido de sodio)

Produce solvatación y saponificación, que genera la expansión de la biomasa para que pueda ser más accesible a las bacterias y enzimas (Ortiz, 2014).

2.6.3 Solución ácida de H₂SO₄ (Ácido sulfúrico)

Solubiliza la hemicelulosa para que las bacterias tengan mayor acceso a la celulosa y que existan más reacciones hidrolíticas para producir metano (Ortiz, 2014).

Tabla 2.4 Matriz de decisión para pretratamiento de biomasa.

	%	Explosión de vapor		Solución de NaOH		Solución de ácido sulfúrico	
Procesabilidad	40	5	2	5	2.0	3	1.2
Rendimiento	30	5	1.5	5	1.5	4	1.2
Seguridad	20	4	0.8	2	0.4	1	0.2
Costo	10	3	0.3	5	0.5	3	0.3
		Total	4.6	Total	4.4	Total	2.9

Fuente: Producción propia

2.7 Biodigestión anaeróbica

Se distingue la monodigestión anaeróbica de jacinto de agua puro y codigestión con otro tipo de biomasa residual húmeda, que puede ser un desecho animal como estiércol de cerdo o aguas residuales.

2.7.1 Monodigestión del jacinto de agua

Representa la ventaja de que la materia prima se encuentra libre en la naturaleza sin costo alguno. No obstante, la procesabilidad es deficiente debido a la inhibición de la fermentación producida por la lignina, es indispensable el pretratamiento para crear un ambiente ideal que estimule el desarrollo de las bacterias de digestión.

2.7.2 Codigestión del jacinto de agua y biomasa residual

Consiste mezclar varios tipos de biomasa para incrementar el potencial de generación de biogás al alcanzar un equilibrio entre las moléculas de azúcares y bacterias del proceso. El estiércol porcino o vacuno y el agua residual ayudan a crear un ambiente propicio para el desarrollo, crecimiento y reproducción microbiológico mediante un balance adecuado de nutrientes. (BERNAL-MARTINEZ, 2020) No obstante, la obtención y procesamiento es una gran limitante para viabilizar esta alternativa.

Tabla 2.5 Matriz de decisión para biodigestión anaeróbica.

	%	Biodigestión anaeróbica pura		Codigestión con estiércol de cerdo		Codigestión con aguas residuales	
Costo	40	5	2	1	0.4	1	0.4
Procesabilidad	30	2	0.6	5	1.5	4	1.2
Rendimiento	20	4	0.8	4	0.8	4	0.8
Seguridad	10	5	0.5	3	0.3	4	0.4
		Total	3.9	Total	3.0	Total	2.8

Fuente: Producción propia

2.8 Biodigestor

2.8.1 Biodigestor cúpula fija

Presentan un costo inicial modesto, podría representar un riesgo debido a la dificultad de conocer los daños producidos en la estructura y su ubicación (Vögeli et al., 2014).

2.8.2 Biodigestor cúpula móvil

Este diseño presenta un costo elevado debido a que contiene dos estructuras, una parte sólida y una parte móvil. Es una tecnología segura porque permite conocer la cantidad de biogás que se produce en cada instante.

2.8.3 Biodigestor tubular

Posee bajos costos de instalación y operación debido a su diseño sencillo, ideal para procesos de biodigestión a pequeña escala, presenta susceptibilidad al daño ocasionado por los materiales de construcción (Baredar, Khare & Nema, 2020).

Tabla 2.6 Matriz de decisión para el diseño del biodigestor.

	%	Cúpula Móvil		Cúpula Fija		Tubular	
Procesabilidad	40	4	1.6	5	2	1	0.4
Rendimiento	30	4	1.2	4	1.2	5	1.5
Seguridad	20	5	1	4	0.8	3	0.6
Costo	10	3	0.3	3	0.3	5	0.5
		Total	4.1	Total	4.3	Total	3

Fuente: Producción propia

2.9 Tratamiento del Biogás

2.9.1 Absorción por carbón activado.

Los costos de instalación en el método de absorción por carbón activado son reducidos, pero, los costos de operación son elevados debido al funcionamiento del proceso. Con esta tecnología puede conseguirse gas con una concentración del 95% de metano (Varnero et al., 2012).

2.9.2 Absorción con compuestos de hierro

Obtiene un gas con una composición de metano del 98%, sin embargo, los costos de instalación y operación son más elevados en relación con otras tecnologías (Varnero et al., 2012).

2.9.3 Absorción por agua.

El costo de esta tecnología es elevado debido a la baja eficiencia que posee, esto se debe a que es necesario llegar a altas temperaturas y presiones de trabajo para conseguir la purificación del biogás (Varnero et al., 2012).

Tabla 2.7 Matriz de decisión para la purificación del biogás.

	%	Adsorción por carbón activado		Absorción por compuestos de hierro		Absorción por agua	
Procesabilidad	40	5	2	5	2	5	2
Rendimiento	30	5	1.5	2	0.6	4	1.2
Seguridad	20	5	1	4	0.8	5	1
Costo	10	4	0.4	5	0.5	4	0.4
		Total	4.9	Total	3.9	Total	4.6

Fuente: Producción propia

2.10 Generación eléctrica.

2.10.1 Motor de combustión interna

Son los más utilizados debido a su alta eficiencia en un rango entre 25 y 35 % en contraste con las microturbinas, el costo de producción del kWh es bajo.

2.10.2 Microturbinas

Las microturbinas son utilizadas para pequeños propósitos de menos de 800 kW, el costo de generación eléctrica suele ser elevado comparado con las demás tecnologías.

2.10.3 Turbinas de vapor.

Las turbinas de gas son mayormente usadas en proyectos de escala mayores a 3 MW, alcanza una eficiencia hasta del 28 % o en caso de cogeneración hasta del 40% (Banco Interamericano de Desarrollo, 2017).

Tabla 2.8 Tecnologías para producción de energía a partir de biogás

Tecnología	Flujo [m ³ /min]	Energía generada [MW]	Eficiencia [%]	Costo de producción [US\$/MWh]
Motor de combustión interna	8 - 30	0.8 – 3	25 - 35	123.21
Turbina a gas	> 40	> 3	20 – 28	43.91
Microturbinas	< 8	0.03 – 0.2	26 - 32	40.91

Fuente: (Banco Interamericano de Desarrollo, 2017).

Tabla 2.9 Matriz de decisión para tecnología de generación.

	%	Motor de combustión interna		Turbinas a gas		Microturbinas	
Procesabilidad	40	5	2	5	2	3	1.2
Rendimiento	30	5	1.5	2	0.6	4	1.2
Seguridad	20	5	1	4	0.8	4	0.8
Costo	10	4	0.4	3	0.5	3	0.3
		Total	4.9	Total	3.9	Total	3.5

Fuente: Producción propia

2.11 Diseño y Cálculos preliminares

El diseño de la planta está establecido para que genere una potencia aprovechable de 500 kW. No obstante, su dimensionamiento general se estableció para producir 1 MW debido al consumo que conllevan los procesos de pretratamiento, postratamiento y digestión; bajo este concepto se realizó en primer lugar el dimensionamiento de los biodigestores para determinar cantidad de biomasa necesaria diaria y el flujo de biogás necesario para satisfacer los objetivos establecidos.

2.11.1 Diseño y dimensionamiento del biodigestor de la planta.

En base al tipo de biomasa húmeda se ha seleccionada un biodigestor de cúpula fija, construido a nivel del suelo con una cobertura fija donde es almacenado el gas. Tiene que adaptarse a un sistema de carga por lotes, la biomasa tendrá un tiempo de residencia de 20 días acorde a las características de la fermentación mesofílica a una temperatura promedio de 30°C, en la siguiente figura se muestra la curva de crecimiento bacteriano del régimen mesofílico, se observa que a partir de la tercer semana el índice de crecimiento decae, por tal razón se determinó que el tiempo de retención ideal es de tan solo 20 días.

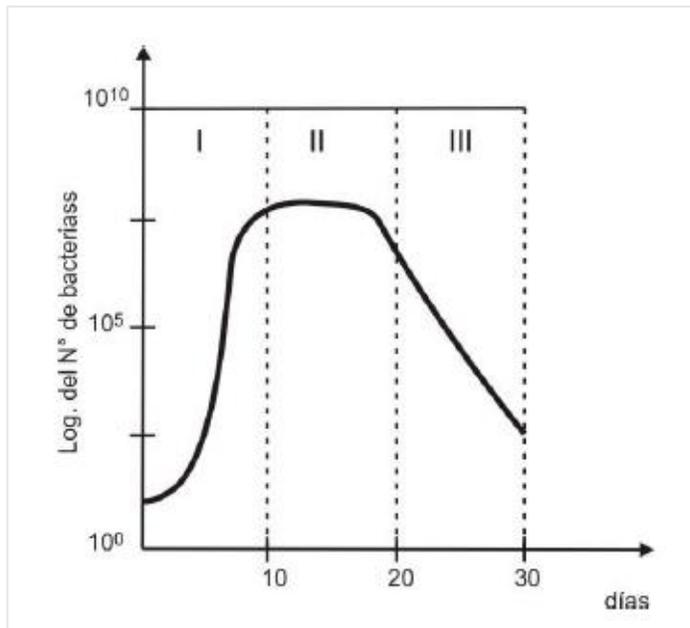


Figura 2.5 Etapas de crecimiento bacteriano en un biodigestor
Fuente: (Irene, 2010)

Teniendo como consideración para el diseño que la producción eléctrica media bruta de electricidad por metro cubico de biogás compuesto de un 50% de metano y partiendo de una eficiencia del 40% del equipo generador (Gruber Steffen et al., 2010) es de 2.07 kWh (Instituto Superior del Medio Ambiente, 2016) El volumen necesario para generar 1 MW de potencia es:

$$1 \text{ MW} \rightarrow 500 \text{ m}^3 \text{ biogás}$$

Considerando un consumo diario de 24 MWh se necesitaría un volumen 12000 m³ de biogás por día. Según (CELEC EP HIDRONACION, 2011), se produce 0.306 Nm³ CH₄/kgST (0.306 m³ por kilogramos de solidos totales del jacinto de agua) es decir que se producen aproximadamente 510 litros de biogás por kilogramo de biomasa seca (ST) (19 kg jacinto de agua cosechados). Además, se puede aproximar que 1 litro de biomasa de fermentación equivale a 1 kg de agua, la producción se puede expresar como:

$$G = 0.510 W \tag{2.1}$$

Donde:

G: Volumen de biogás requerido al día

W: Flujo de biogás requerido para generar 1MW

El volumen del digestor se puede expresar como se muestra en la siguiente ecuación.

$$V_s = HRT * \frac{1.25*W}{1000} \quad (2.2)$$

Donde:

V_s : Volumen del biodigestor

HRT : Tiempo de residencia hidráulica

$$W = \frac{12000 \text{ m}^3}{0.510} = 23530 \frac{L}{\text{día}}$$

$$V_s = 20 * \frac{1.25 * 23530}{1000}$$

$$V_s = 588 \approx 600 \text{ m}^3$$

El volumen calculado se obtuvo en relación con la capacidad de generación de biogás en litros por kilogramo de sólidos totales, es decir, este debe reajustarse acorde a la cantidad de cosecha de biomasa. Además, como ya se mencionó luego de la recolección el jacinto de agua pasa por un pretratamiento donde se estima que solo el 40% de la cosecha continua con la fase de digestión, de este porcentaje solo el 5% corresponde a sólidos totales (ST), Considerando este análisis se procede a obtener el volumen real de biomasa a suministrar.

Volumen de jacinto de agua necesario a cosechar.

$$V_{\text{cosecha}} = 600 \text{ m}^3 * \frac{95\%}{5\%} = 11400 \text{ m}^3 \quad (2.3)$$

Volumen del jacinto de agua que ingresa al biodigestor.

$$V_{digestión} = 11400 \text{ m}^3 * 40\% = 4560 \text{ m}^3 \quad (2.4)$$

Volumen de agua a agregar a la mezcla.

$$\% ST \text{ mezcla} = \frac{kg \text{ biomasa pretratada} * \% ST \text{ biomasa fresca}}{kg \text{ biomasa fresca} + \text{agua agregada}}$$

$$\text{agua agregada} = \frac{kg \text{ biomasa pretratada} * \% ST \text{ biomasa fresca}}{kg \text{ biomasa fresca} + \% ST \text{ mezcla}} \quad (2.5)$$

$$\text{agua agregada} = \frac{1 \text{ kg} * 12.5\% - 1 \text{ kg} * 5\%}{5\%}$$

$$\text{agua agregada} = \frac{7.5}{5} = 1.5 \frac{l}{kg \text{ biomasa}}$$

De acuerdo con estos valores, el volumen real del biodigestor debe ser de 11400 m³ considerando la cantidad de una relación de mezcla con agua de 1.5:1. Para facilidades técnicas este volumen podría ser distribuido en 3 reactores de 3800 m³ cada uno.

Para obtener la cantidad de biomasa a suministrar diariamente se puede hacer uso de la siguiente ecuación (Sasse, 1988).

$$S_d \left(\frac{m^3}{día} \right) = \frac{V_s(m^3)}{HRT(días)} \quad (2.6)$$

Donde:

S_d: biomasa de fermentación que debe suministrarse al día.

$$S_d = 228 \left(\frac{m^3}{día} \right) (\text{jacinto de agua}) + 342 \left(\frac{m^3}{día} \right) (\text{agua})$$

Vale recalcar que este valor corresponde al 40% de biomasa que ingresa al biorreactor, el volumen que debe ser cosechado al día es de 570 m³.

Para el diseño del biodigestor de debe calcular el volumen de compensación (V_c), volumen de la campana (V_e) y volumen de acopio de biomasa (V_a) como ilustra la siguiente figura.

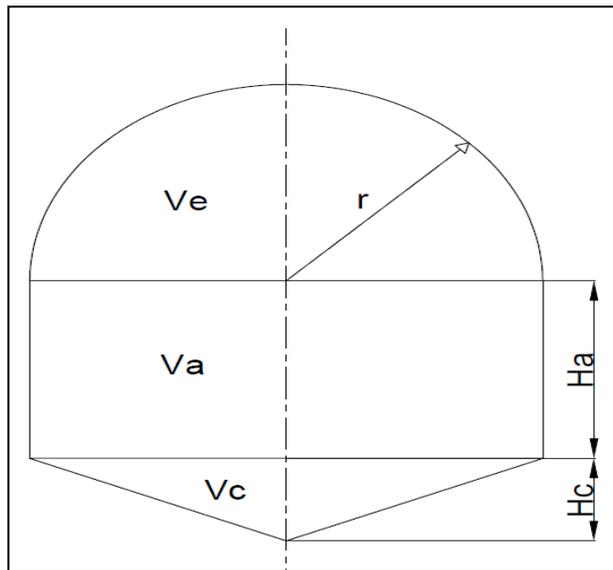


Figura 2.6 Esquema general y variables dimensionales del biodigestor

Fuente: (Olaya et al., 2009)

Donde, el valor de r en la figura pertenece al radio de la campana, H_c representa la altura del volumen complementario y (H_a) la altura de acopio de la biomasa. Se estableció una relación del volumen de la cúpula y el volumen acopio de 1:1. Además, se asume un 5% adicional al volumen de diseño considerando las metodologías de construcción. Por lo tanto.

$$\frac{V_e}{V_c} = 1 \quad (2.7)$$

Además,

$$V_e + V_c = 1.05 * V_d \quad (2.8)$$

Despejando y reemplazando estas ecuaciones se obtiene que:

$$V_c = \frac{1.05}{2} * V_d$$
$$V_c = \frac{1.05}{2} * 3800 \text{ m}^3$$

Volumen de compensación.

$$V_c = 1195 \text{ m}^3$$
$$V_e = 1.05 * 3800 \text{ m}^3 - 1195 \text{ m}^3$$

Volumen de campana.

$$V_e = 2795 \text{ m}^3$$

El radio r se puede calcular con la expresión.

$$r = \sqrt[3]{\frac{3}{2 * \pi} * V_e} \quad (2.9)$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{3}{2 * \pi} * 2795} = 11 \text{ m}$$

La altura del cono base de "hc" puede calcularse de la deducción del volumen de un cono.

$$h_c = \frac{3 * V_c}{\pi * r^2} \quad (2.10)$$

$$h_c = \frac{3 * 1195 \text{ m}^3}{\pi * (11 \text{ m})^2} = 9.43 \text{ m}$$

El cálculo del volumen de acopio de gas (V_g). Se obtiene planteando las siguientes ecuaciones acorde a la figura.

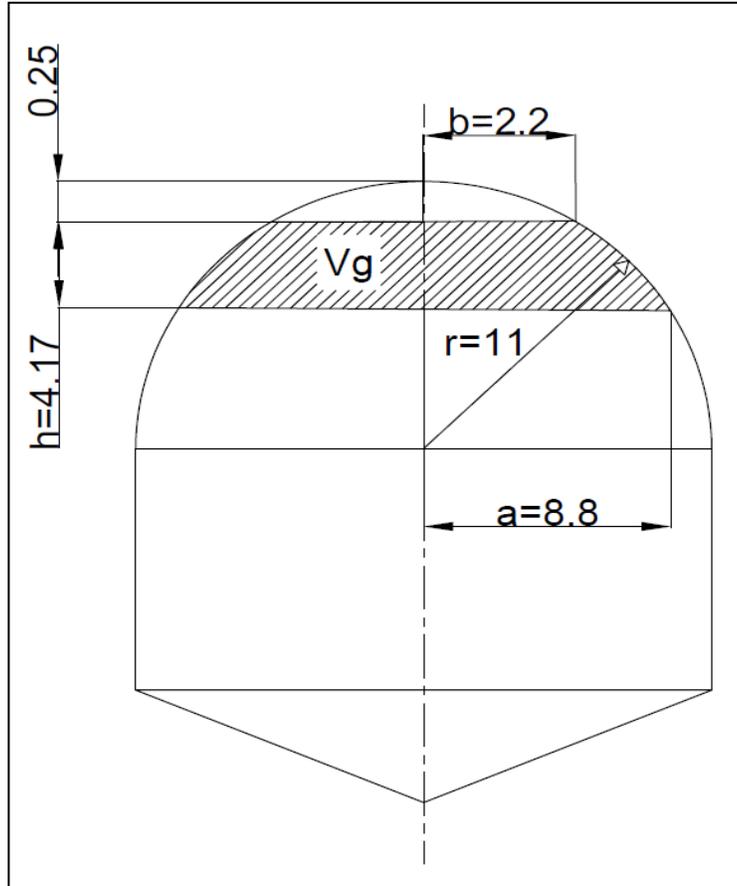


Figura 2.7 Volumen de almacenamiento del biogás representada por el área sombreada

Fuente: (Olaya et al., 2009)

$$V_g = \frac{\pi \cdot h}{6} * [3a^2 + 3b^2 + h^2] \quad (2.11)$$

Donde:

$$h = \frac{2 \cdot r}{5} - h_r = \frac{2 \cdot 11 \text{ m}}{5} - 0.25 \text{ m} = 4.15 \text{ m} \quad (2.12)$$

$$a = \frac{4 \cdot r}{5} = \frac{4 \cdot 11 \text{ m}}{5} = 8.8 \text{ m} \quad (2.13)$$

$$b = \frac{r}{5} = \frac{11 \text{ m}}{5} = 2.2 \text{ m} \quad (2.14)$$

Por tanto:

$$V_g = \frac{\pi * 9.43 \text{ m}}{6} * [3(8.8 \text{ m})^2 + 3(2.2 \text{ m})^2 + (4.15 \text{ m})^2]$$

$$V_g = 1303.82 \text{ m}^3 \approx 1304 \text{ m}^3$$

El volumen para acumular el biogás requiere la adición de un tramo de compensación necesario para almacenar el gas generado por la biomasa a fermentar. Este volumen corresponde al volumen de gas, es decir 1304 m³, y se genera entre la campana y el cono base; su geométrica corresponde a un cilindro.

$$h_c = \frac{V_g}{\pi * r^2} = \frac{1304 \text{ m}^3}{\pi * (11 \text{ m})^2} = 3.43 \text{ m}$$

2.11.1 Recolección de jacintos de agua

Para recolectar los 570 m³ de Jacintos de agua se utilizarán barcazas. Se ha estimado dos barcazas que trabajen en una jornada de 8 horas, teniendo en cuenta que la capacidad máxima de las cosechadoras consultadas es de 16 m³. Dado la densidad del Jacinto de agua aproximada de 800 Kg/m³, cada barcaza va a recolectar 228 toneladas por día.

Tabla 2.10 Características de la barcaza de recolección

Potencia	110 KW
Tamaño	15 m x 5 m x 4 m
Capacidad	16 m ³
Método de descarga	Descarga por la banda trasera

Fuente: (Shandong Kehan Ecology Tech Co., Ltd, s.f.)

2.11.2 Proceso de pretratamiento: Explosión de vapor.

La explosión húmeda de vapor tiene varias ventajas como el bajo impacto ambiental que genera, requiere de una baja inversión no utiliza de productos químicos peligrosos, además, puede ser aplicada a todo tipo de biomasa.

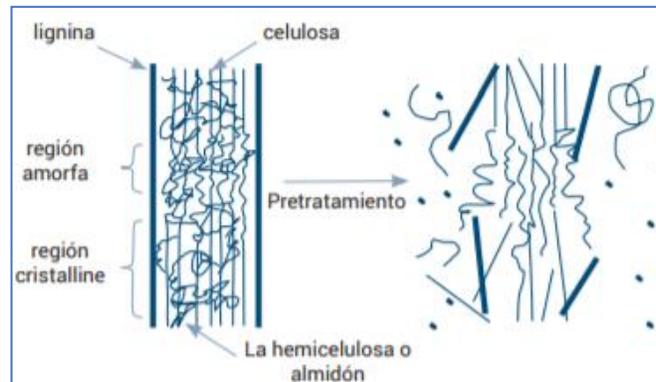


Figura 2.8 Estructura de la biomasa lignocelulósica, antes y después del pretratamiento

Fuente: (Ortiz, 2014)

El proceso de explosión húmeda se lleva a cabo al quitando la mayor cantidad de agua posible al jacinto de agua mediante un sistema de prensado, posterior la parte sólida llega a un contenedor en el cual se inyecta vapor de agua a una presión de 15 bares y a una temperatura entre 165 y 175 °C durante un lapso de 15 minutos (Rana et al., 2015).

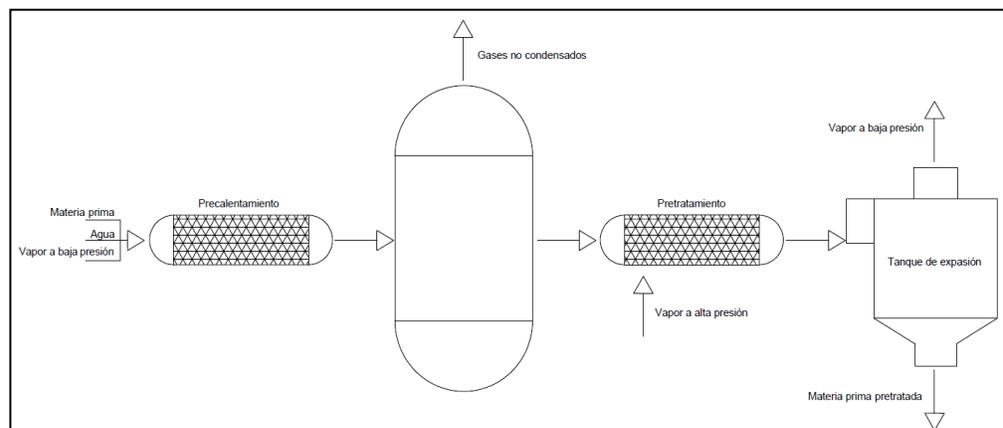


Figura 2.9 Diagrama de operación de la unidad de pretratamiento de explosión húmeda de vapor

Fuente: (Marzieh Shafiei et al., 2014)

Tabla 2.11 Características del proceso de explosión de vapor

Explosión de vapor (variación de pretratamiento para JA)	Explosión húmeda
Fluidos	H ₂ O Aire
Temperatura	165 – 175 °C
Presión	15 bar
Tiempo de residencia	15 min

Fuente: (De la Cruz, 2016)

2.11.1 Digestión anaeróbica del Jacinto de agua.

Los procesos anaeróbicos, son muy dependientes de la temperatura de operación del biodigestor, ya que afecta al crecimiento de las bacterias responsables de la producción de biogás. Asimismo, estas bacterias requieren de tiempo para la degradación de la biomasa, fuertemente ligado a la temperatura del proceso biológico.

Tabla 2.12 Parámetros del proceso de digestión anaeróbica en función de la temperatura y tiempo de retención hidráulica

Proceso anaeróbico	Temperatura de operación [°C]	Tiempo de retención hidráulica (HRT) [días]	Tasa de crecimiento y digestión microbiana	Tolerancia a la toxicidad
Psicrofílico	10 – 20	>100	Baja	Alta
Mesofílico	20 – 35	>20	Media	Media
Termofílico	50 – 60	>8	Alta	Baja

Fuente: Ajieh Mike Uche et al.

En teoría, toda biomasa es capaz de producir biogás al someterse a digestión anaeróbica. La calidad y la cantidad del producto dependerán de la relación carbono-nitrógeno. El carbono sirve como fuente de energía de las bacterias mesofílicas y el nitrógeno se utiliza para la formación de células nuevas. Estas bacterias llegan a consumir en promedio 30 veces más carbono que nitrógeno, por ello la relación idónea entre estos elementos se considera en el rango de 25:1 a 35:1.

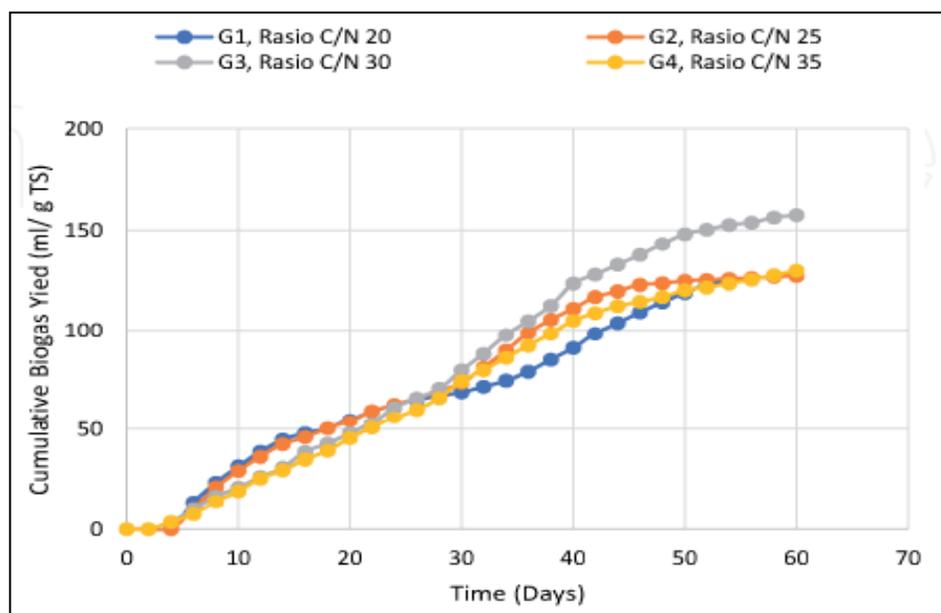


Figura 2.10 Rendimiento del biogás por g de ST basado en la relación C/N
Fuente: (Nugraha et al., 2020)

2.11.1 Tratamiento de biogás

El biogás producido por fermentación anaeróbica contiene variedad de gases tóxicos cuya presencia afecta el rendimiento de equipos para la generación eléctrica. Se utiliza un tratamiento de purificación para aumentar el porcentaje de metano y eliminar compuestos como el dióxido de carbono, sulfuro de hidrogeno, ácido sulfúrico y humedad. La alternativa elegida es purificación mediante carbón activado por poseer la capacidad de eliminar la mayoría de las impurezas. A continuación, se detallan las características del tanque de desulfuración.

Tabla 2.13 Características del tanque de desulfuración.

Material	Acero Inoxidable ST316
Filtro	Carbón activado
Peso	1550 kg
Caudal mínimo	300 m ³ /h
Caudal máximo	1200 m ³ /h

Fuente: Qingdao Xiaqing Environment Project Co., Ltd.

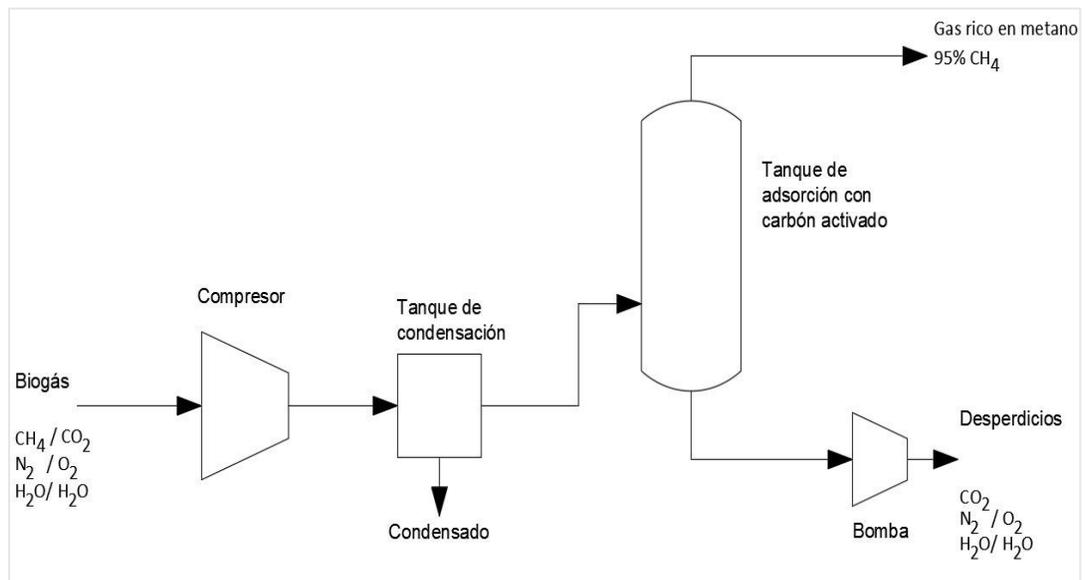


Figura 2.11 Esquema del funcionamiento del tren de purificación del biogás
Fuente: Producción propia

2.11.1 Motor de combustión interna

Los motores recíprocos de combustión interna presentan mayor eficiencia en comparación con las otras tecnologías. Su costo de producción por kW es bajo y pueden existir en varios tamaños adecuados según el flujo disponible. Como desventaja está su alto costo de mantenimiento.

El tamaño de motores para proyectos se lo realiza al asumir el 50% de metano en el biogás con flujos de entre 8 y 30 m³/min con capacidad de producción entre 800 kW y 3 MW (Banco Interamericano de Desarrollo, 2017).

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Resultados y análisis del proceso pretratamiento.

El pretratamiento de la biomasa puede llegar a ser uno de los procesos más costosos dentro de la biodigestión anaeróbica, esto es porque conlleva un gasto energético que debe ser cubierto por la producción energética de la planta. El vapor que se inyecta al tanque del pretratamiento proviene de una caldera, el proceso requiere de un volumen de agua del 35% respecto al volumen de la biomasa, de tal forma, la masa de agua necesaria para el proceso es.

$$m_w = V_w * \rho_w = (91.2 \text{ m}^3 * 35\%) * \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) = 31920 \text{ kg} \quad (3.1)$$

El calor requerido por el proceso se obtiene por balance energético (Cengel, 2012)

$$Q = M * Cp * \Delta T \quad (3.2)$$

Donde:

Q: Calor requerido en [kJ]

M: Masa de fluido a calentar [kg]

Cp: Calor específico del fluido [kJ/kg°C]

ΔT : Variación de temperatura [°C]

$$Q = (31920 \text{ kg}) * \left(1.8723 \frac{\text{J}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}}\right) * (170 - 25)^\circ\text{C} = 8665753.32 \text{ J}$$

Para el tiempo determinado la potencia necesaria para este proceso es.

$$P = \frac{Q}{t} = 144430 \frac{J}{s} = 144.43 \text{ kW} \quad (3.3)$$

Donde:

P: Potencia requerida del pretratamiento [kW]

t: tiempo de aplicación [s]

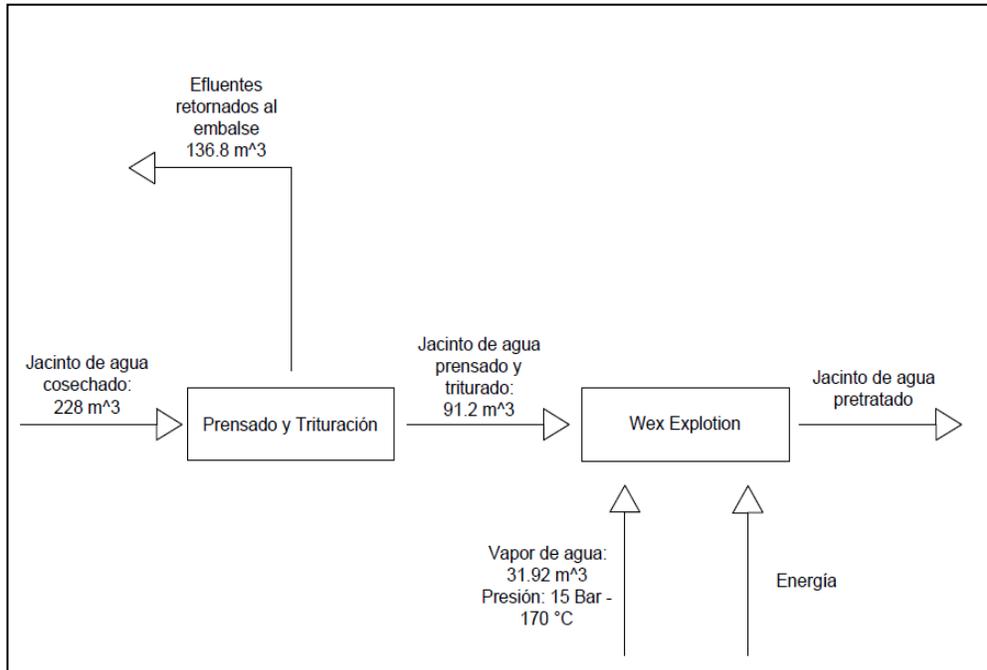


Figura 3.1 Esquema de pretratamiento del Jacinto de agua

Fuente: Producción propia



Figura 3.2. Ilustración de equipamiento para pretratamiento

Fuente: (Rana et al., sf.)

Adicional, al pretratamiento físico-térmico existe un tratamiento mecánico previo que elimina la parte no aprovechable del jacinto de agua y establece un esquema de corte para aumentar la superficie de contacto entre las bacterias y la biomasa. Para se seleccionó una cortadura cuya selección y dimensionamiento se especifica a continuación.

Considerando que diariamente se requieren 182.5 t de Jacintos de Agua para cumplir con la demanda, además que el tiempo de procesamiento previo del material es de 8 horas. Se calcula la capacidad de t/h.

$$\frac{182.5t}{10 h} = 18.25 \frac{t}{h} * 110\% \approx 20 \frac{t}{h} \quad (3.4)$$

Se considera un 10% extra por seguridad de la operación, debido a que se pueden producir pérdidas en el transporte. Para la selección se hará una adquisición de maquinaria de procedencia China. Las especificaciones se muestran a continuación:

Tabla 3.1. Características de cortadora para pretratamiento mecánico

Modelo	WG218
Compañía	Nanjing Wanguo Machinery Technology Co, Ltd.
Número de piezas de corte	2
Velocidad de alimentación (m /min)	37
Longitud de partícula final (mm)	30
Capacidad (t/h)	15-20
Potencia principal (KW)	110
Dimensiones (L*W*H) (mm)	4680*2150*1500

Fuente: Producción propia

En resumen, el proceso de pretratamiento de biomasa ocupa alrededor de 250 kW de potencia entre esquema de corte y tratamiento térmico para destrucción de la lignina. Sin embargo, vale destacar que la potencia de 110 kW de la cortadora es potencia eléctrica generada por la planta, mientras que los 144 kW del pretratamiento wet explosion provienen de potencia térmica generada por una caldera de gas. El volumen de biogás diario necesario para satisfacer este requerimiento es de aproximadamente 600 m³ considerando el poder calorífico inferior del biogás que es de aproximadamente 5.73 kWh/m³.

3.2 Biodigestión anaeróbica del jacinto de agua

Los procesos anaeróbicos son muy dependientes de la temperatura de operación del biodigestor, ya que afecta al crecimiento de las bacterias responsables de la producción de biogás. Existen varios factores que pueden influir en la capacidad de producción, los más relevantes son la temperatura, el tiempo de retención hidráulica, el pH y la relación C/N.

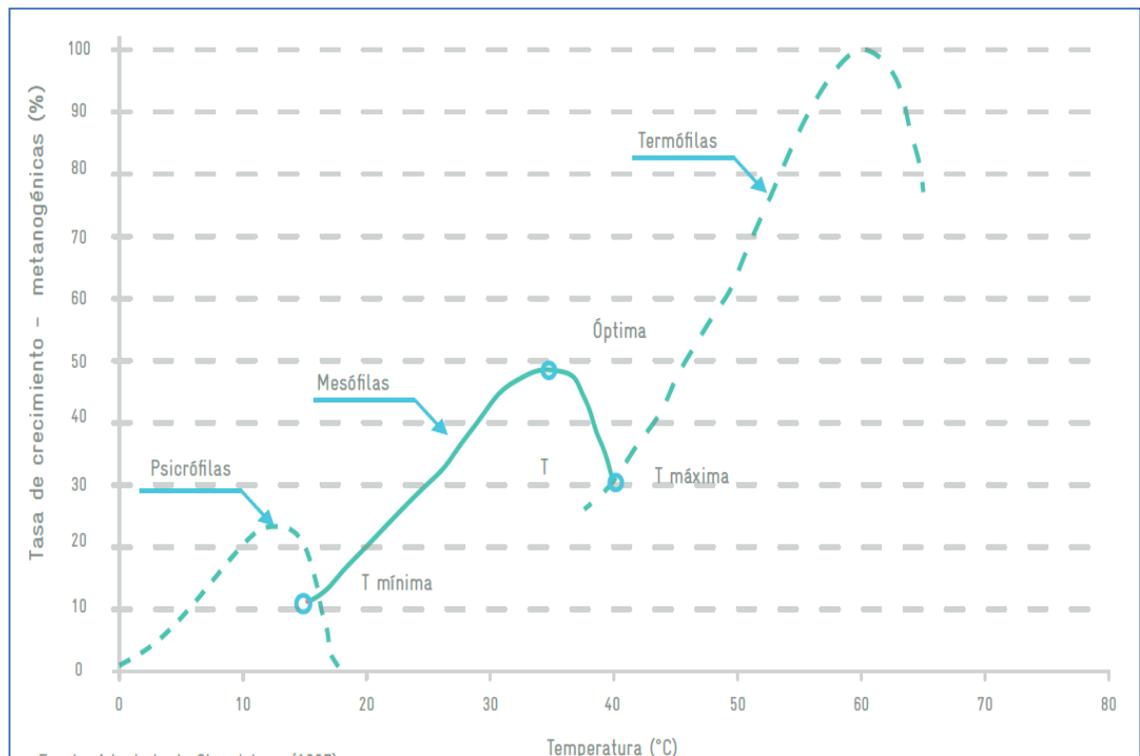


Figura 3.3 Influencia de la temperatura sobre la producción de biogás
Fuente: (Proyectos Energía Renovables No Convencionales (MINENERGÍA/GIZ), 2012).

De acuerdo con el gráfico el proceso termofílico es el más eficiente cuando la temperatura es aproximadamente 55 – 60 °C. No obstante, este ciclo es muy sensible y necesita gran control (Bischofsberger et al., 2005). Por su parte, el proceso mesofílico tiene una producción de biogás de 20 a 30% menor, pero, el biogás tiene mayor concentración de metano y menor concentración de CO₂. Por ende, las mejores condiciones para la digestión anaerobia es un rango mesofílico de 30 a 35°C.

Tabla 3.2 Características principales de la biomasa y biogás obtenido

Características	Cantidad
Solidos totales (ST)	5 %
Solidos volátiles (SV)	85 %
Factor de generación	0.306 Nm ³ CH ₄ /kgSV
Porcentaje de metano en el biogás	59 - 60 %
Poder calórico inferior del biogás	5.83 kWh/Nm ³
Poder calórico superior del biogás	7.50 kWh/Nm ³

Fuente: CELEP EP HIDRONACIÓN

Tabla 3.3 Parámetros generales del tamaño de la planta

Parámetro	Cantidad
N° de biodigestores	4
Volumen de JA cosechado al día	228 m ³
Tiempo de retención hidráulico	20 días
Temperatura de biodigestión	30 °C

Fuente: Producción propia

3.3 Análisis y selección de elementos principales del biodigestor

3.3.1 Diseño del biodigestor:

Se consideran los parámetros obtenidos con anterioridad y se resumen los aspectos más importantes para la operación de un biodigestor.

Biomasa de fermentación necesaria diaria.

$$S_d = 228 \left(\frac{m^3}{día} \right) (\text{jacinto de agua}) + 342 \left(\frac{m^3}{día} \right) (\text{agua})$$

Volumen de digestión y diseño.

$$V_{\text{digestión}} = 11400 \text{ m}^3 * 40\% = 4560 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{diseño}} = 4560 \text{ m}^3 (\text{jacinto de agua}) + 1.5 * (4560 \text{ m}^3)(\text{agua}) = 11400 \text{ m}^3$$

Radio:

$$r = 11 \text{ m}$$

Volumen de compensación:

$$V_c = 1195 \text{ m}^3$$

Volumen de campana:

$$V_e = 2795 \text{ m}^3$$

Volumen de acopio de gas:

$$V_g = 1304 \text{ m}^3$$

Tramo de compensación:

$$h_c = 9.43 \text{ m}$$

3.3.2 Cuerpo

En el cuerpo del biodigestor se pueden encontrar diferentes elementos los cuales se van a describir a detalle a continuación.

3.3.3 Zona de carga

En esta sección se ingresa una mezcla homogénea de materia prima, es decir ya preparada en proporciones determinadas para una correcta

descomposición, esta zona de carga por lo general está hecha de tubos plásticos o de cobre dependiendo del tiempo de vida útil deseado para el sistema.

3.3.4 Zona de descarga

En esta zona se encuentran los desechos que una vez terminado el proceso de digestión son expulsados para poder darle su debido uso, en general estos desechos son utilizados como compostaje abono orgánico.

3.3.5 Zona de digestión

Uno de los principales problemas de los biodigestores es poseer alta acidez, debido a condiciones de inestabilidad y desequilibrio de las actividades de microbianas. La sobrecarga orgánica y el exceso de sustratos de fácil degradación generan acumulación de ácidos orgánicos producto de la acidogénesis, inhibiendo el crecimiento de las bacterias acetogénicas y por tanto de las bacterias de la metanogénesis.

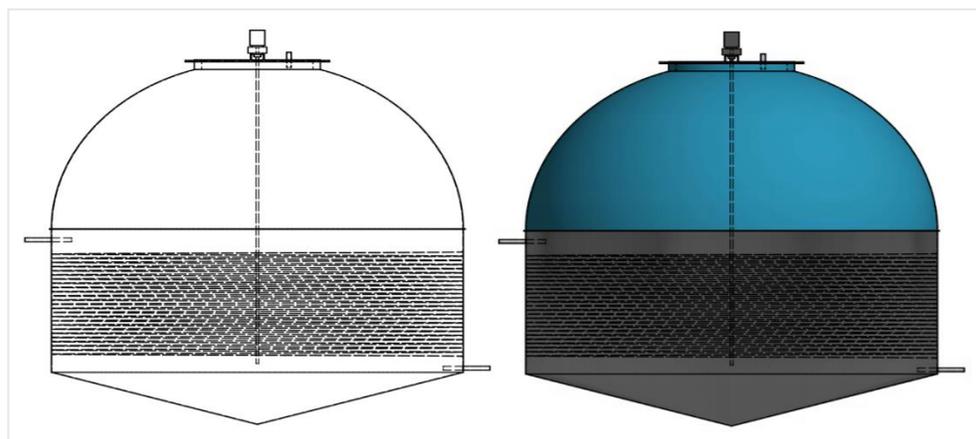


Figura 3.4 Esquema de biodigestor de cúpula fija

Fuente: Producción propia

3.3.6 Sistema de agitación

La función principal de esta sección del biodigestor es producir la potencia suficiente para que la materia prima obtenga una mezcla perfecta al final del proceso y toda la materia sea sometida a las mismas condiciones durante todo el tiempo de digestión.

Tabla 3.4 Parámetros de operación del biodigestor

Parámetro	Valor
Fluido de agitación	Solución de Jacinto de agua y agua; proporción 1:1.5
Densidad del fluido	920 kg/m ³ (aprox.)
Viscosidad máxima	1 η /mPa*s (asumida del agua)
Presión de trabajo	1 atm
Temperatura de operación	30 °C
Diámetro del biodigestor	22 m
Altura del biodigestor (sin campana)	12.86 m
Cubierta del biodigestor	Tipo campana
Fondo del biodigestor	Cónico
Volumen de llenado	3800 m ³

Fuente: Producción propia

El tipo de impulsor definido en base a los parámetros es de hojas palas planas preferibles para fluidos con baja viscosidad y velocidades de rotación bajas. En el diseño intervienen algunas variables como el diámetro del biodigestor (D_t), diámetro del impulsor (D_a), altura de la mezcla (H), distancia entre el fondo del biodigestor al impulsor (E). Estas determinan y afectan a las necesidades requeridas como la velocidad a la que recircula la mezcla el modelo de flujo o el consumo de potencia.

Para el diseño del agitador se partió de semejanzas geométricas ya estandarizadas que correlacionan las variables ya mencionadas. Para este caso las relaciones se detallan a continuación.

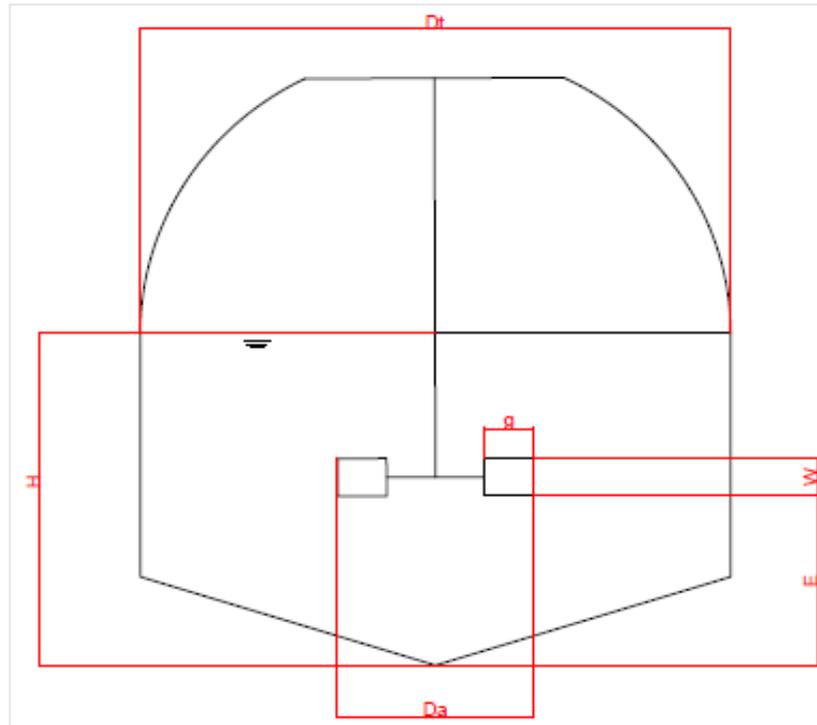


Figura 3.5 Semejanzas geométricas para la selección del agitador del biodigestor

Fuente: Producción propia

Tabla 3.5 Semejanzas geométrica para agitador de palas sin deflectores

Relación	Valor
Dt/Da	3
Dt/E	3
W/Da	0.2
g/Da	0.25

Fuente: (Uribe, 2013)

Diámetro del impulsor.

$$\frac{Dt}{Da} = 3 \rightarrow Da = \frac{22\text{ m}}{3} = 7.3\text{ m} \quad (3.5)$$

Largo de paleta

$$\frac{g}{Da} = 0.25 \rightarrow g = 0.25 * 7.3 = 1.83\text{ m} \quad (3.6)$$

Ancho de paleta

$$\frac{W}{Da} = 0.2 \rightarrow W = 0.2 * 7.3 = 1.46 \text{ m} \quad (3.7)$$

Distancia entre fondo e impulsor

$$\frac{Dt}{E} = 3 \rightarrow E = \frac{22}{3} = 7.3 \text{ m} \quad (3.8)$$

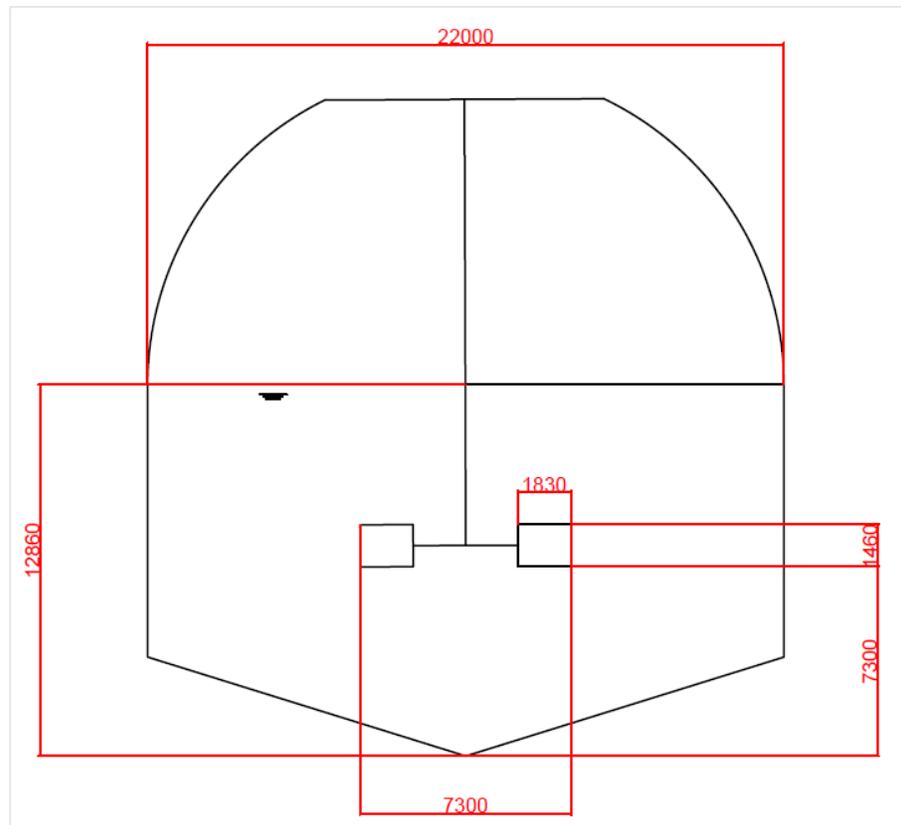


Figura 3.6 Dimensiones del agitador del biodigestor

Fuente: Producción propia

Potencia del agitador.

Para una agitación eficaz, la mezcla debe llegar a todas las partes del biodigestor, para lo cual la velocidad y turbulencia son factores importantes de operación. La potencia consumida se puede obtener mediante números

adimensionales obtenidos de la relación entre el número de Reynolds y el número de potencia a partir de gráficos que dependen de los parámetros geométricos del agitador diseñado (Uribe, 2013).

Número de Reynolds.

$$Re = \frac{N \cdot Da^2 \cdot \rho}{\mu} \quad (3.9)$$

N = velocidad de rotación [rps]
Da = Diámetro del impulsor [m]
 ρ = densidad del fluido [kg/m³]
 μ = viscosidad [Pa·s]

Número de potencia

$$Np = \frac{P}{N^3 \cdot Da^5 \cdot \rho} \quad (3.10)$$

P = potencia de agitación del impulsor (watts)
N = velocidad de rotación [rps]
Da = diámetro del impulsor [m]
 ρ = densidad del fluido [kg/m³]
 μ = viscosidad [Pa·s]

Número de Froude

$$Fr = \frac{N^2 \cdot Da}{g} \quad (3.11)$$

N = velocidad de rotación [rps]
Da = diámetro del impulsor [m]
g = aceleración de gravedad [m/s²]

Considerando las dimensiones del biodigestor y del agitador y una velocidad de rotación de 100 rpm se obtiene que la potencia necesaria es.

$$Re = \frac{1.6 \text{ rps} * 7.3^2 \text{ m}^2 * 920 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0.001 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 7.84 * 10^7$$

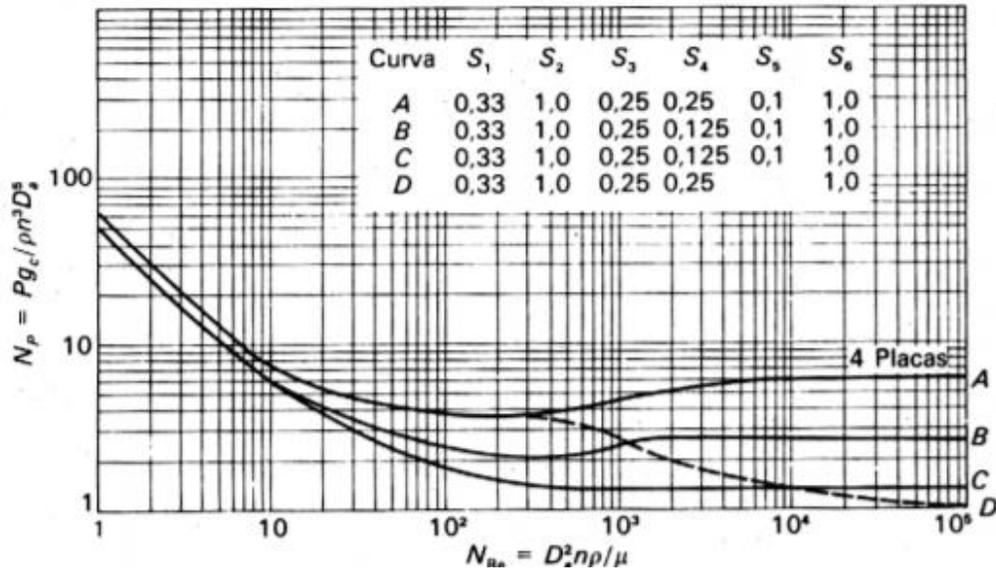


Figura 3.7 Grafica de relación del número de potencia y Reynolds
Fuente: (Uribe, 2013)

El gráfico sirve para evaluar la potencia del agitador, Las variables S1 a S6 representan las semejanzas geométricas utilizadas anteriormente. La curva A se refiere a agitador con palas verticales del impulsor, la B y C con palas estrechas y la curva D para biodigestor sin placas deflectoras. El valor correspondiente a nuestra aplicación se representa por la curva "A", cuyo Np es 6.

$$P = Np * N^3 * Da^5 * \rho$$

$$P = 6 * (1.6 \text{ rps})^3 * (7.3 \text{ m})^5 * 920 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$P = 46.9 \text{ kW} = 63 \text{ HP}$$

Sistema de calentamiento.

Se utilizan en conjunto con los agitadores para obtener una temperatura homogénea de la mezcla de biomasa, disminuyendo el tiempo de retención hidráulico necesario.

Tabla 3.6 Parámetros de sistema de calentamiento del biodigestor

Parámetro	Valor
Tipo de calentador	Serpentín
Temperatura promedio anual	24.11 °C
Temperatura de operación	30 °C
Presión de trabajo	2 kg/cm ²
Volumen de calentamiento por hora	3800 m ³ /h

Fuente: Producción propia

Estos intercambiadores basan su operación en el coeficiente total de transferencia de calor según en área externa, acorde a la siguiente ecuación (Uribe, 2013).

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + R_{do} + \frac{e \cdot D_o}{k \cdot D_m} + \frac{D_o}{D_i \cdot h_i} + R_{di} \cdot \frac{D_o}{D_i}} \quad (3.12)$$

Donde:

h_o: coeficiente de transferencia de calor individual externo [kcal/m²*°C]

h_i: coeficiente de transferencia de calor individual interno [kcal/m²*°C]

R_{do}: resistencia externa por ensuciamiento. [°C/kcal]

R_{di}: resistencia interna por ensuciamiento [°C/kcal]

D_o: diámetro externo del tubo del serpentín [m]

D_i: diámetro interno del tubo del serpentín [m]

e: espesor del tubo [m]

k: conductividad térmica del material del tubo [kcal/m²*°C]

D_m: diámetro medio del tubo [m]

$$Q = M * Cp * (T_2 - T_1) \quad (3.13)$$

$$Q = 3800 \text{ kg} * \left(1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}}\right) * (30 - 24.11)^\circ\text{C} = 22382 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

$$P = 26.03 \text{ kW}$$

La presión absoluta del vapor corresponde a un vapor saturado con una temperatura de 120.21 °C. Por tanto, las entalpias son $h_1 = 650 \text{ kcal/kg}$ y $h_2 = 131 \text{ kcal/kg}$.

$$22382 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} = M * (650 - 131) \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$M = 43.12 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Diferencia media logarítmica de temperaturas (Uribe, 2013).

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_c - t_c) - (T_f - t_f)}{\ln\left(\frac{T_c - t_c}{T_f - t_f}\right)} \quad (3.14)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(120.21 - 24.11) - (120.21 - 30)}{\ln\left(\frac{120.21 - 24.11}{120.21 - 30}\right)} = 93.12$$

Donde:

ΔT_{lm} : Diferencia media logarítmica de temperaturas

T_c : Temperatura de entrada lado primario [°C]

t_c : Temperatura de salida lado primario [°C]

T_f : Temperatura de entrada lado secundario [°C]

t_f : Temperatura de salida lado secundario [°C]

Se supone un valor del coeficiente global de 1200 kcal /h.

$$Q = U_o * A_o * \Delta T_{lm} \quad (3.15)$$

Donde:

U_o : Coeficiente global de transferencia de calor [kcal/h*m²*°C]

A_o : Área de transferencia de calor [m²]

Q: Flujo de calor [kcal/h]

$$A_o = \frac{22382 \frac{kcal}{h}}{1200 \frac{kcal}{h} * 93.12} = 0.2 \text{ m}^2$$

Coeficiente de transferencia por agitación del tanque.

$$\frac{h_o * D_t}{k} = a * \left(\frac{D a^2 * N * \rho}{\mu} \right)^{\frac{2}{3}} * \left(\frac{C_p * \mu}{k} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.16)$$

$$\frac{h_o * 11}{0.54} = 1.5 * \left(\frac{7.3^2 * 1.6 * 920}{0.001} \right)^{\frac{2}{3}} * \left(\frac{1 * 0.001}{0.54} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$h_o = 1376 \frac{kcal}{m^2 * ^\circ C}$$

Tubería del serpentín de 1 in SCH 80, $h_i = 5000 \text{ kcal/m}^2 * ^\circ C$:

Donde:

$D_o = 33.40 \text{ mm}$, $D_i = 26.64 \text{ mm}$, $e = 3.38 \text{ mm}$

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{1376} + 3 * 10^{-4} + \frac{0.0038 * 0.0334}{38 * (0.02664 + 0.0038)} + \frac{0.0334}{0.02664 * 5000} + 6.14 * 10^{-5} * 1.25}$$

$$U_o = 683.42 \frac{kcal}{h * m^2 * ^\circ C}$$



Figura 3.8 Vista isométrica del diseño del biodigestor con sus correspondientes sistemas de operación

Fuente: Producción propia

En resumen, el proceso digestivo ocupa aproximadamente 254 kW de potencia entre los motores de los agitadores, los intercambiadores de calor para mantener la temperatura constante y las bombas de lodos encargadas de llenar o vaciar los biodigestores.

3.4 Tratamiento del biogás

El tratamiento de desulfuración por adsorción de carbón activado puede ser aplicado a escalas de hasta 500 ppmv (partes por millón) entregando un grado de pureza de hasta 1 ppmv con temperaturas cercanas a los 30 °C. El sistema está compuesto por un recipiente o columna lleno de carbón activo donde el H_2S se transforma en azufre elemental debido a la oxidación sobre la superficie porosa del carbón. El azufre es adsorbido por los microporos removiendo así el

ácido sulfhídrico del biogás. (Cooperación Alemana al desarrollo sustentable en México, 2017).

3.5 Dimensionamiento y selección de equipo de generación eléctrica.

En base al poder calorífico del biogás se puede obtener la energía y potencia disponible al día por la planta (Proyectos Energía Renovables No Convencionales (MINENERGÍA/GIZ), 2012).

$$E_T = Q_{biogás} * m * 6.4 \quad (3.17)$$

$$P_n = \frac{E_T}{24}$$

Donde:

E_T : Energía disponible al día [kWh]

$Q_{biogás}$: Caudal diario de biogás [m^3 /día]

m : Porcentaje de metano en el biogás [%]

P_n : Potencia nominal [kW]

$$E_T = 11400 \text{ m}^3 * 60\% * 7.5 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} = 51300 \text{ kWh}$$

$$P_n = \frac{51300 \text{ kWh}}{24 \text{ h}} = 2137.5 \text{ kW}$$

Considerando una eficiencia del 40%, la potencia eléctrica producida es:

$$P_e = P_n * \eta \quad (3.18)$$

Donde:

P_e : Potencia eléctrica [kW]

η : Eficiencia [%]

$$P_e = 2137.5 \text{ kW} * 40\% = 855 \text{ kW}$$

Restando los valores consumidos por la planta, aproximadamente 360 kW entre cortadora y equipos de bombeo, agitación e intercambiadores, la potencia aprovechable de la planta es de 495 kW. Por lo que el dimensionamiento propuesto en un inicio es adecuado. En base a estos resultados se puede seleccionar un equipo que cumpla con las características de generación y operación.

Tabla 3.7 Especificaciones del motor de combustión seleccionado para generación eléctrica

Marca	NPT
Modelo	1000GFT
Compañía	Weifang Naipute Gas Genset Co., Ltd.
Potencia nominal (kW/kVA)	1000/1250
Corriente nominal (A)	1800
Voltaje nominal (V)	230/400
Frecuencia nominal (Hz)	50/60
Factor de potencia nominal	0.8 gal
Peso neto (kg)	17800
Ciclo de revisión (h)	25000
Dimensiones generales (L*W*H)(mm)	11000*2300*2500

Fuente: Producción propia



Figura 3.9 Imagen referencial lateral del equipo seleccionado

Fuente: Weifang Naipute Gas Genset Co., Ltd

3.6 Análisis económico

El biogás y su aplicación como producción de electricidad es considerado una alternativa viable para el uso de energías renovables ya que elimina gases de efecto invernadero al medio ambiente. El uso exclusivo de este gas para el presente proyecto será la producción de electricidad ya que destaca como una de las aplicaciones más beneficiosas. Sin embargo, es necesario recalcar que la viabilidad del proyecto depende de factores económicos. En esta sección se detallará el análisis del factor económico, teniendo presente que dependiendo del uso que se le vaya a dar a la energía producida se le aplican diferentes tipos de tratamientos para eliminar gases como sulfuro de hidrogeno, amoniaco, e hidrocarburos.

Activos no corrientes

Se considera activos no corrientes o activos fijos a aquellos activos los cuales tienen una vida útil mayor a un año, si el plan de duración del proyecto es a largo plazo se puede conseguir liquidez por estos activos.

Tabla 3.8 Equipos necesarios para la operación de la planta eléctrica
Activos fijos

Equipamiento	Cantidad	Precio	Total
Tolva de recepción	1		\$1,200.00
Barcaza	2		\$60,000.00
Tanque de agua residual	1		\$1,300.00
Bomba para agua residual	1		\$3,500.00
Banda transportadora	1		\$4,000.00
Balanza	1		\$1,800.00
Bomba de sustratos	2		\$14,000.00
Tanque de mezclado	1		\$5,000.00
Bombas de solidos	4		\$14,000.00
Tanque de biodigestión	4		\$240,000.00
Caldera 150 kW	1		\$14,000.00
Separador de solidos	1		\$6,200.00

Condensador de agua para biogás	1		\$1,300.00
Generador eléctrico	1		\$271,000.00
Tanque de pretratamiento	1		\$20,000.00
Tanque de acumulación de biogás	1		\$40,000.00
Diseño de estructura			
Sala de control de operaciones			\$4,000.00
Bodega de insumos para planta			\$21,000.00
Oficinas			\$21,000.00
Estacionamiento			\$30,000.00
Taller de mantenimiento			\$19,000.00
Total			\$792,300.00

Fuente: Producción propia

Capital necesario para desarrollo del proyecto

Tabla 3.9 Gastos de trabajo para la operación de la planta eléctrica

Gastos de trabajo		
Gastos de trabajo	Costo mensual	costo trimestral
Insumos	400	\$1.200,00
Mano de obra	5000	\$15.000,00
Recursos humanos	6300	\$18.900,00
Total		\$35.100,00

Fuente: Producción propia

Presupuesto para ingresos de inicio de operación

Tabla 3.10 Proyección de ingresos por operación anual de la operación de la planta eléctrica

Proyección anual	Primer año	Segundo año	Tercer año	Cuarto año
Porcentaje de demanda real	40%	55%	75%	100%
Producción de energía eléctrica de biogás (kWh)	1752000	2409000	3285000	4380000

Fuente: Producción propia

Mantenimiento y reparación

Tabla 3.11 Resumen de gastos necesarios estimados por mantenimiento

Gastos necesarios de mantenimiento			
Descripción	costo	porcentaje	Costo anual
Infraestructura	\$182.000,00	5%	\$9.100,00
Equipamiento técnico y maquinarias	\$380.000,00	7%	\$26.600,00
Total			\$35.700,00

Fuente: Producción propia

Servicios básicos

Tabla 3.12 Resumen de gastos por servicios básicos estimados por mes y semestre

Gastos de servicios básicos		
Descripción	Costo mensual	Costo semestral
Internet	\$28,00	\$168,00
telefonía	\$24,00	\$144,00
Total		\$312,00

Fuente: Producción propia

Gastos de publicidad

Tabla 3.13 Resumen de gastos por publicidad estimados por mes y semestre

Gastos de publicidad		
Descripción	Costo mensual	Costo semestral
Capacitación	\$200,00	\$1.200,00
Publicidad	\$300,00	\$1.800,00
Total		\$3.000,00

Fuente: Producción propia

Gastos de personal

Tabla 3.14 Resumen de gastos de personal estimados por mes y año

Gastos de personal anual							
Cargo	Número de personal	Sueldo inicial	Décimo tercero	Fondo de reserva	Vacaciones	Costo mensual	Costo anual
Gerente	1	\$900,00	\$75,00	\$75,00	\$37,50	\$1.087,50	\$13.050,00
Supervisor	1	\$450,00	\$37,50	\$37,50	\$18,76	\$543,76	\$6.525,12
Operador planta	2	\$460,00	\$38,30	\$38,30	\$19,17	\$555,77	\$6.669,24
Operador barcaza	1	\$460,00	\$38,30	\$38,30	\$19,17	\$555,77	\$6.669,24
Operador tanque de biogás	1	\$400,00	\$33,30	\$33,30	\$16,17	\$482,77	\$5.793,24
Electromecánico	1	\$360,00	\$30,00	\$30,00	\$15,00	\$435,00	\$5.220,00
Cosechador	2	\$350,00	\$29,17	\$29,17	\$14,58	\$422,92	\$5.075,04
Contador	1	\$550,00	\$45,83	\$45,83	\$22,92	\$664,58	\$7.974,96
Operador banda transportadora	1	\$400,00	\$33,30	\$33,30	\$16,17	\$482,77	\$5.793,24
Guardia	2	\$340,00	\$28,30	\$28,30	\$14,17	\$410,77	\$4.929,24
Total	13	\$4.670,00	\$389,00	\$389,00	\$193,61	\$5.641,61	\$67.699,32

Fuente: Producción propia

Estimación de gastos para cuatro años de producción

Tabla 3.15 Resumen de gastos estimados para 4 años

Gastos y costos para para 4 años				
Descripción de gastos	Primer año	Segundo año	Tercer año	Cuarto año
Personal	\$67.999,32	\$68.339,32	\$68.681,02	\$69.024,43
Servicios básicos	\$624,00	\$624,00	\$624,00	\$624,00
Publicidad	\$6.000,00	\$6.000,00	\$6.000,00	\$6.000,00
Mantenimiento	\$35.700,00	\$10.480,00	\$10.480,00	\$10.480,00
Financiamiento	\$155.250,00	\$146.076,99	\$135.872,02	\$124.518,99
Operación	\$311.421,52	\$312.978,63	\$314.543,52	\$316.116,24
Producción	\$18.500,00	\$25.900,00	\$36.260,00	\$50.764,00
Total	\$595.494,84	\$570.398,94	\$572.460,56	\$577.527,66

Fuente: Producción propia

Determinación del punto de equilibrio.

$$Pe = \frac{CF}{PVu - CVu} \quad (3.19)$$

Donde:

Pe: Punto de equilibrio

CF: Costos fijos

PVu: Precio de venta unitario

CVu: Costo variable unitario

$$Pe = \frac{207214,54}{0,0732 - 0,02} = 5.311.466,4$$

Tabla 3.16 Resumen porcentaje de ventas con una producción del 40%

Porcentaje de ventas			
Descripción	Volumen (m3)	Venta	Porcentaje
Capacidad planta de biogás	3800	128246.4	40%
Total		128246.4	

Fuente: Producción propia

Tabla 3.17 Margen de contribución de planta

Descripción	Electricidad
Costo variable unitario	\$0,02
Margen de contribución unitaria	\$0,05
Precio de venta	\$0.0732
Ventas	40%

Fuente: Producción propia

A continuación, se detallan los costos fijos y variables del proyecto para poder empezar con el análisis correspondiente de flujo de cajas.

Tabla 3.18 Resumen de costos fijos estimados para 4 años

Costos fijos				
Descripción de gastos	Primer año	Segundo año	Tercer año	Cuarto año
Personal	\$67.999,32	\$68.339,32	\$68.681,02	\$69.024,43
Servicios básicos	\$624,00	\$624,00	\$624,00	\$624,00
Publicidad	\$6.000,00	\$6.000,00	\$6.000,00	\$6.000,00
Mantenimiento	\$10.480,00	\$10.480,00	\$10.480,00	\$10.480,00
Financiamiento	\$155.250,00	\$146.076,99	\$135.872,02	\$124.518,99
Total	\$265.573,32	\$231.520,31	\$221.657,04	\$210.647,42

Fuente: Producción propia

Tabla 3.19 Resumen de costos variables estimados para 4 años

Costos variables				
Descripción de gastos	Primer año	Segundo año	Tercer año	Cuarto año
Producción	\$18.500,00	\$27.750,00	\$36.075,00	\$48.701,25

Fuente: Producción propia

Tabla de amortización para el préstamo necesario para poner en marcha el proyecto planteado.

Tabla 3.20 Tabla de amortización del préstamo para 10 años

Tabla de amortización				
Año	Intereses	Cuota	Capital	Residuo del Capital
0		236.787,84		\$ 1.380.000,00
1	\$ 155.250,00	236.787,84	\$ 81.537,84	\$ 1.298.462,16
2	\$ 146.076,99	236.787,84	\$ 90.710,85	\$ 1.207.751,31
3	\$ 135.872,02	236.787,84	\$ 100.915,82	\$ 1.106.835,50
4	\$ 124.518,99	236.787,84	\$ 112.268,85	\$ 994.566,65
5	\$ 111.888,75	236.787,84	\$ 124.899,09	\$ 869.667,56
6	\$ 97.837,60	236.787,84	\$ 138.950,24	\$ 730.717,32
7	\$ 82.205,70	236.787,84	\$ 154.582,14	\$ 576.135,18
8	\$ 64.815,21	236.787,84	\$ 171.972,63	\$ 404.162,55
9	\$ 45.468,29	236.787,84	\$ 191.319,55	\$ 212.843,00
10	\$ 23.944,84	236.787,84	\$ 212.843,00	\$ 0,00

Fuente: Producción propia

Flujo de caja, VAN y TIR

Tabla 3.21 Resumen de flujo de cajas para 5 años

Flujo de caja						
Inflación		0%	0%	0%	0%	0%
Año	0	1	2	3	4	5
Ingresos	128.246.40	\$ 128,246.40	\$ 176,338.80	\$ 240,462.00	\$ 320,616.00	\$ 320,616.00
Costos	\$ 284,073.00	\$ 284,073.00	\$ 284,073.00	\$ 284,073.00	\$ 284,073.00	\$ 284,073.00
Depreciación	\$ 140,725.18	\$140,725.18	\$ 140,725.18	\$ 140,725.18	\$ 140,725.18	\$ 140,725.18
Gastos financieros		\$ 155,250.00	\$ 146,076.99	\$ 135,872.02	\$ 124,518.99	\$ 111,888.75
Utilidad antes de impuestos		\$ (451,801.78)	\$ (394,536.37)	\$ (320,208.20)	\$(228,701.17)	\$ (216,070.93)
Impuestos		\$ (112,950.45)	\$ (98,634.09)	\$ (80,052.05)	\$ (57,175.29)	\$ (54,017.73)
Utilidad después de impuestos		\$ (338,851.34)	\$ (295,902.28)	\$ (240,156.15)	\$(171,525.88)	\$ (162,053.20)
Capital		\$ 81,537.84	\$ 90,710.85	\$ 100,915.82	\$ 112,268.85	\$ 124,899.09
Valor de salvamento				\$ 80,955.16	\$ 80,955.16	\$ 80,955.16
Flujo neto de efectivo	\$ 19,044.84	\$ (279,663.99)	\$ (245,887.95)	\$ (119,391.63)	\$(62,114.39)	\$ (65,271.95)
VPN		(\$442,227.99)				
VAN	\$ (423,183.15)					
TIR	23.60%					

Fuente: Producción propia

Acorde a la tabla 3.21 se puede conocer la tasa interna de retorno (TIR) del proyecto en base al valor fijado de 0.0732 ctvs. es negativa de 23.6 %. Esto indica que la rentabilidad del proyecto visto desde la perspectiva económica no es posible, al menos no de forma autosostenible. Analizando otras opciones como un incremento del costo energético hasta un valor de 0.14 ctvs. e incrementando los ingresos mediante el tratamiento de efluentes y la venta de fertilizante se puede alcanzar una tasa de retorno interna positiva de cerca del 9.4%, pues de acuerdo con sus características, el Jacinto de agua posee un 85% de solidos volátiles, por lo tanto, la cantidad de efluente que puede

procesar es de 684 kg. De este valor solo el 15% es aprovechable para la obtención de fertilizantes, con un valor promedio de \$500 por tonelada se podría obtener un ingreso extra de alrededor de \$15000 mensuales.

Sin embargo, el incremento energético difícilmente pueda ser solventado por los usuarios finales, ya que como objetivo de diseño la planta debe ser aplicable en comunidades no servidas aledañas a embalse y represas. Por lo tanto, es necesario que instituciones gubernamentales ecuatorianas como el ministerio del ambiente (MMA) y la agencia de regulación y control de electricidad (ARCONEL) apoyen este tipo de iniciativas y feliciten el acceso a financiamiento mediante subsidios para obtener los beneficios sociales y ambientales que puede impulsar este tipo de proyectos.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El jacinto de agua es una planta acuática altamente invasiva catalogada como una de las 100 especies más peligrosas que afecta diversos espejos de agua alrededor del mundo. En Ecuador esta maleza genera un conjunto de problemas ambientales, sociales, económicos y sanitarios que afectan principalmente a las comunidades aledañas a embalses y represas. Según la EPPO su presencia debe ser controlada y en lo posible aprovechada. No obstante, no se debe promover su crecimiento o reproducción con fines productivos o industriales. Su aprovechamiento como biomasa residual se utiliza principalmente para fines energéticos en la obtención de biocombustibles para la producir energía térmica o eléctrica.
- El jacinto de agua posee sus pro y contras para ser aprovechado para la obtención de energía mediante procesos biológicos; es un tipo de biomasa lignocelulósica que crece libremente en la naturaleza por lo que es de fácil acceso y coste cero. Su composición indica que tiene gran potencial para solubilizar azúcares y generar metano. No obstante, sus limitaciones radican en su alto contenido de agua que es mayor al 90% y la presencia de lignina en su estructura, que inhibe y restringe el proceso de obtención de metano y crecimiento de bacterias anaeróbicas. Por ello, se debe optimizar el proceso a través de pretratamientos que destruyan este polímero y permitan metabolizar las moléculas de celulosa y hemicelulosa. Lo contraproducente de este pre-proceso es la alta demanda de energía que afecta directamente a la potencia neta de la planta y a la rentabilidad de esta.
- Acorde al diseño y dimensionamiento realizado se obtuvo que la producción eléctrica bruta es de 2.07 KWh por m³ de biogás obtenido de monodigestión

anaeróbica de Jacinto de agua, esto supone que en promedio se necesita aproximadamente 12000 m³ de biogás al día para cumplir con los requerimientos de producción eléctrica neta definidos en los objetivos. Por lo tanto, la planta se dimensionó para que operen 3 biodigestores de 3800 m³ simultáneamente con una semana de crecimiento bacteriano de desfase mientras que un cuarto biodigestor se encuentre en proceso de preparación para cuando sea necesario realizar el llenado de un nuevo lote de biomasa fresca; esto garantiza una producción constante que asegure el abastecimiento continuo de biogás para la producción eléctrica.

- Desde el punto de vista económico producir energía eléctrica mediante biogás obtenido de jacintos de agua no es rentable, más aún en un país con gran potencial de hidroeléctrico, esto se debe en principio al gran consumo energético que conlleva realizar los de pretratamiento y procesos biológicos en biomásas de tipo lignocelulosa como lo es el Jacinto de agua, ya que tanto el pretratamiento como la digestión anaeróbica requieren al menos de un 25% de la energía total generada por la planta, por lo que de forma general el dimensionamiento de producción debe ser del doble de la energía neta para comercializar. Por otro lado, enfocado desde el aspecto ambiental y social este proyecto posee gran potencial dado que cumple varios objetivos de desarrollo sostenible, mitigando la liberación de metano al medio ambiente y promoviendo la inclusión y servicio a las comunidades no servidas. Por ello, se debería buscar el financiamiento con organizaciones internacionales como por ejemplo el Fondo para el Medio Ambiente Mundial o el Global Environment Facility (GEF), además las instituciones gubernamentales locales como el MMA y la ARCONEL tendrían que dar su total apoyo a estas iniciativas para explotar los beneficios sociales y económicos que pueden ofrecer.

4.2 Recomendaciones.

- Una alternativa para incrementar la rentabilidad económica de este proyecto es el cobro de servicios por supresión o eliminación de los Jacintos de agua. Según registros en las represas asociadas al río Paute en Ecuador se han

gastado alrededor de 1 millón de dólares anuales causados por extracción de esta planta.

- Otra alternativa para incrementar el potencial de producción de biogás es utilizar un proceso de cogeneración con otro tipo de biomasa residual que mejore la relación carbono-nitrógeno “C/N” y complemente las cualidades energéticas del jacinto de agua, contribuyendo a la reproducción de las bacterias mesófitas. No obstante, esta alternativa requiere de un costo de producción mayor debido a la dificultad que implica la obtención de esta biomasa complementaria y su transporte; por lo tanto, esta alternativa solo podría ser viable mediante un estudio de campo previo en el que se determine un lugar propicio para la obtención tanto del Jacinto de agua como de la biomasa complementaria residual.

- Los efluentes resultantes del proceso biológico deben aprovecharse para la obtención de abono orgánico que posee excelentes características fertilizantes. Esto impulsaría el desarrollo agrícola en las poblaciones cercanas a la planta estimulando el desarrollo económico y la inclusión a la sociedad de estas comunidades.

- Instituciones gubernamentales deberían de apoyar este tipo de iniciativas mediante subsidios y capacitaciones a las comunidades aledañas, el aprovechamiento del jacinto de agua además de controlar el crecimiento de esta plaga y mitigar su impacto ambiental ayudaría a impulsar el desarrollo de comunidades no servidas y dar empleo al personal local para las tareas operativa.

BIBLIOGRAFÍA

- AGENCIA DE CONTROL Y REGULACIÓN DE ELECTRICIDAD - ARCONEL . (2019). *Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2019*. Obtenido de ESTADÍSTICAS DEL SECTOR ELÉCTRICO ECUATORIANO: https://www.regulacioneolica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/06/Est_2019_Borrador_08-06-2020_1606.pdf
- Akunna, J. C. (2019). *Anaerobic Waste-Wastewater Treatment and Biogas Plants A Practical Handbook*. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC.
- Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., & Janssen, R. (2008). *Biogas Handbook*. Esbjerg: University of Southern Denmark Esbjerg.
- Albanna, M. (2013). *Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste*. In: Malik A., Grohmann E., Alves M. (eds) *Management of Microbial Resources in the Environment*. Dordrecht: Springer Science.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (2009). *2009 ASHRAE Handbook Fundamentals*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Baredar, P., Khare, V., & Nema, S. (2020). *Design and Optimization of Biogas Energy Systems*. London: ELSEVIER Inc.
- Barrera-Cardoso, E., Odales-Bernal, L., Carabeo-Pérez, A., Alba-Reyes, Y., & Hermida-García, F. (30 de Abril de 2020). Recopilación de aspectos teóricos sobre las tecnologías de producción de biogás a escala rural. *Tecnología Química*, 303-321. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852020000200303
- BERNAL-MARTINEZ, A., GONZÁLEZ-LÓPEZ, G., & CUEVAS-RODRIGUEZ, G. (2020). Codigestión anaerobia como alternativa para el tratamiento de aguas residuales lácteas y la generación de biogás y biosólidos. *División de Ingenierías, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de Guanajuato*, 115-141.
- Carta Gonzáles, J. A., Calero Pérez, R., Colmenar Santos, A., & Castro Gil, M. A. (2009). *Centrales de energías renovables Generación eléctrica con energías renovables*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- Cheng, J., Xie, B., Zhou, J., Song, W., & Cen, K. (Abril de 2010). Cogeneration of H₂ and CH₄ from water hyacinth by two-step anaerobic fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(7), 3029-3035.

- Chicas, S., Melara, A., & Pérez, M. (2021). *Propuesta para el manejo y control del Jacinto de agua (Eichhornia crassipes) en el lago Suchitlán, El Salvador*.
- Cleveland, C. J., & Morris, C. (2015). *Dictionary of Energy*. Amsterdam: Elsevier Ltd.
- Coorporación Alemana al desarrollo sustentable en México. (2017). *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás de plantas de tratamiento de aguas residuales*. Ciudad de México.
- Cruz, W. D. (2016). *MODELO DE NEGOCIO INCLUSIVO PARA PRODUCIR BIOGÁS Y ABONO ORGÁNICO A PARTIR DEL TRATAMIENTO ANAERÓBICO DEL LECHUGUÍN DEL EMBALSE DAULE PERIPA*. Guayaquil: ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.
- Desarrollo, B. I., Gabriel Blanco, Estela Santalla, Verónica Córdoba, & Alberto Levy. (2017). *Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico*. Washington, DC.: NOTA TÉCNICA N° IDB-TN-1260.
- Diwakar Rana, Dhrubojyoti D. Laskar, Keerthi Srinivas, & Birgitte K. Ahring. (2015). Wet explosion pretreatment of loblolly pine leads to an increase in methoxylation of the lignin. *Bioresources and Bioprocessing*, 1-10.
- Duque, A., Manzanares, P., Ballesteros, I., & Ballesteros, M. (2016). Steam Explosion as Lignocellulosic Biomass Pretreatment. *CIEMAT*, 349-368.
- El Telégrafo. (02 de Marzo de 2016). Ecuador, quinto en el mundo en seguridad energética. *eltelégrafo*. Obtenido de Ecuador, quinto en el mundo en seguridad energética.
- European and Mediterranean Plant Protection Organization (EPPO). (2008). Data sheets on quarantine pests - *Eichhornia crassipes*. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin*, 441 - 449.
- Gavala, H. N., Angelidaki, I., & Ahring, B. K. (2003). *Kinetics and Modeling of Anaerobic Digestion Process*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Harley, K. L. (1990). The role of biological control in the management of water hyacinth, *Eichhornia crassipes*. *Biocontrol News and Information*, 11-22.
- Horikawa, M., Rossi, F., Gimenes, M., C. C., & Silva, M. d. (2004). *Chemical Absorption of H₂S for Biogas Purification*. Brazilian Journal of Chemical Engineering.
- Instituto Superior del Medio Ambiente. (s.f.). *Valorización de Residuos*. España.
- Irene, D. A. (2010). *Tratamiento biológico combinado aneróbico/aeróbico de estiércol generado en la cría intensiva de cerdo*. Mar del Plata: Universidad Fasta.
- Marjolaine. (13 de Abril de 2021). *BIOGASWORLD*. Obtenido de STATE-OF-THE-ART DRY AND WET ANAEROBIC DIGESTION SYSTEMS FOR SOLID WASTE: <https://www.biogasworld.com/news/dry-wet-anaerobic-digestion-systems/>

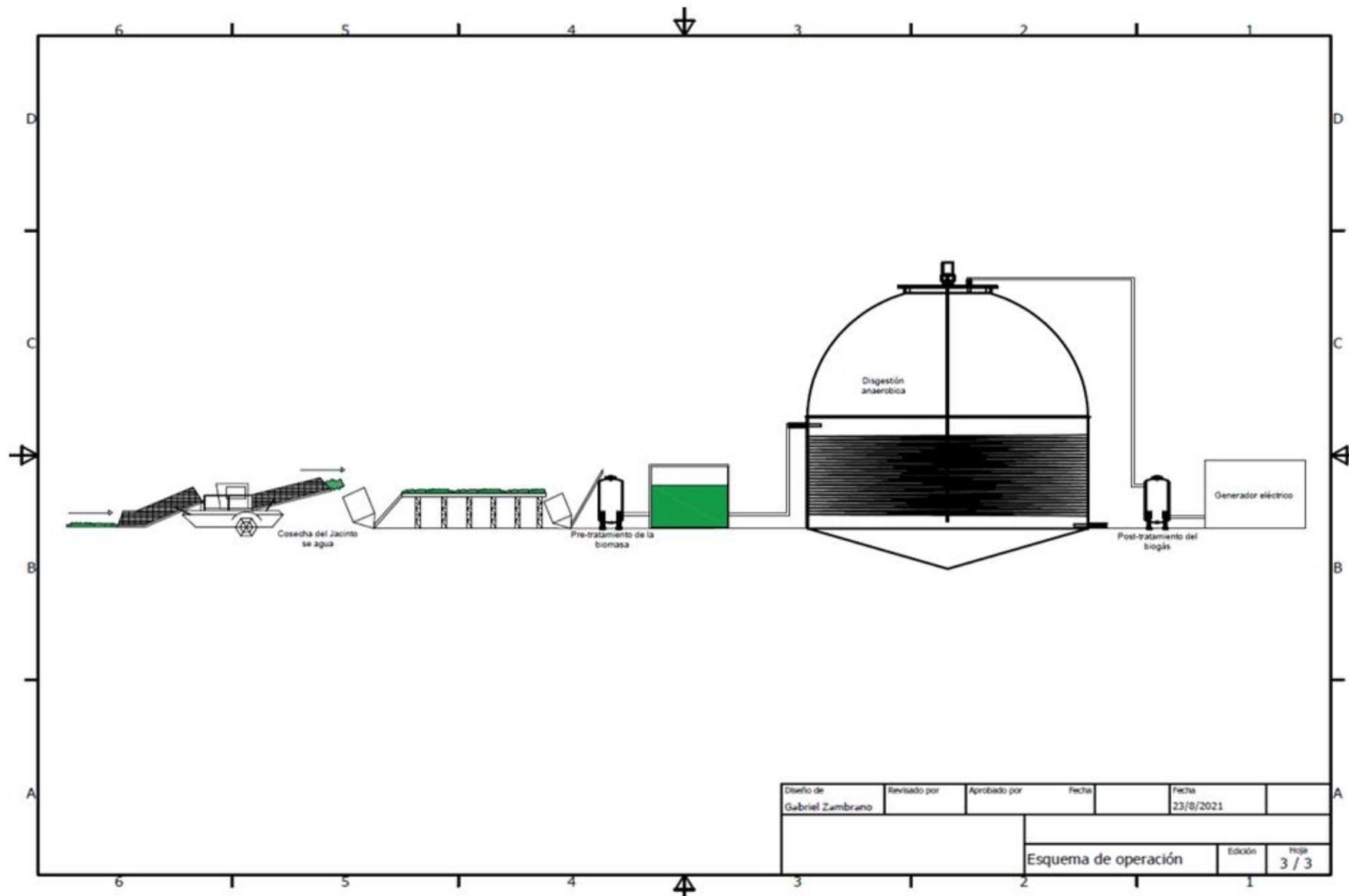
- Marzieh Shafiei, Keikhosro Karimi, Hamid Zilouei, & Mohammad J. Taherzadeh. (2014). Economic Impact of NMMO Pretreatment on Ethanol and Biogas Production from Pinewood. *BioMed Research International*, 13.
- Montenegro Aquino, G. E., Tapia Molina, M. M., & Cárdenas Murillo, J. (2010). *Diseño, Construcción y Puesta en Marcha de un Biodigestor con Biomasa Obtenida del Jacinto de Agua (Eichornia crassipes)*. Guayaquil.
- Mora, J. J. (2013). *Evaluación del pretratamiento explosión por vapor en las características fisicoquímicas de harina de yuca y sus hidrolizados*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Njoku, S., Ahring, B., & Uellendahl, H. (2012). Pretreatment as the crucial step for a cellulosic ethanol biorefinery: Testing the efficiency of wet explosion on different types of biomass. *Bioresource Technology*, 105-110.
- Nugraha, W. D., Syafrudin, & Pradita, L. L. (2020). Biogas Production from Water Hyacinth. *IntechOpen*, 17.
- Olaya Arboleda, Y. (2009). *Fundamentos para el diseño de biodigestores*. Palmira: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.
- Ortiz, W. G. (2014). Tratamientos Aplicables a Materiales Lignocelulósicos para la Obtención de Etanol y Productos Químicos. *Revista de Tecnología*, 39-44.
- Pérez Martínez, M., Cuesta Santianes, M. J., Núñez Crespí, S., & Cabrera Jiménez, J. A. (2008). *Utilización de Biogás en Pilas de Combustible*.
- Proyectos Energía Renovables No Convencionales (MINENERGÍA/GIZ). (2012). *Guía de Planificación para Proyectos de Biogás en Chile*. Santiago de Chile: Ministerio de Energía - Gobierno de Chile.
- Rana, D., Rana, V., & Teller, P. (s.f.). *Pretreatment of lignocellulosic materials using wet explosion*. Washington: Washington State University.
- Rodríguez Meléndez, A., Colmenares Mestizo, F. A., Barragán Vera, J. C., & Mayorga Betancourt, M. A. (Febrero de 2017). Aprovechamiento energético integral de la *Eichornia crassipes* (Buchón de agua). *Ingenium*, 18(35), 134 - 151.
- Santana, E. F., Muñoz, S. R., & Rico, R. F. (2005). *Procedimiento de Purificación Biológica. Factible para Diferentes Fuentes de Energía*. La Habana.
- SENER Secretaria de energía Mexico. (2016). *Reporte de inteligencia tecnologica: Biocombustibles gaseosos*. Mexico.
- Shandong Kehan Ecology Tech Co., Ltd. (s.f.). *kehandredger*. Obtenido de Floating aquatic weed harvester: https://www.kehandredger.com/product/floating_aquatic_weed_harvester

- Uche, A. M., Emmanuek, O. T., Paul, O. U., Olawale, A., Frank, K. B., Rita, O. O., & Martin, O. S. (2020). Design and construction of fixed dome digester for biogas production using cow dung and water hyacinth. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 15-25.
- Uribe, V. C. (2013). *DISEÑO Y CÁLCULO DE UN AGITADOR DE FLUIDOS* . Biobío: Universidad del Bío-Bío.
- Varnero, M., Carú, M., Galleguillos, K., & Achondo, P. (2012). *Tecnologías disponibles para la purificación de biogás usado en la generación eléctrica*. Santiago - Chile.
- Vögeli, Y., Lohri, C. R., Gallardo, A., Diener, S., & Zurbrügg, C. (2014). *Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries Information and Case Studies Practical Information and Case Studies*.
- Y, Cengel. (2012). *Termodinámica*. España: McGraw-Hill.

APÉNDICES

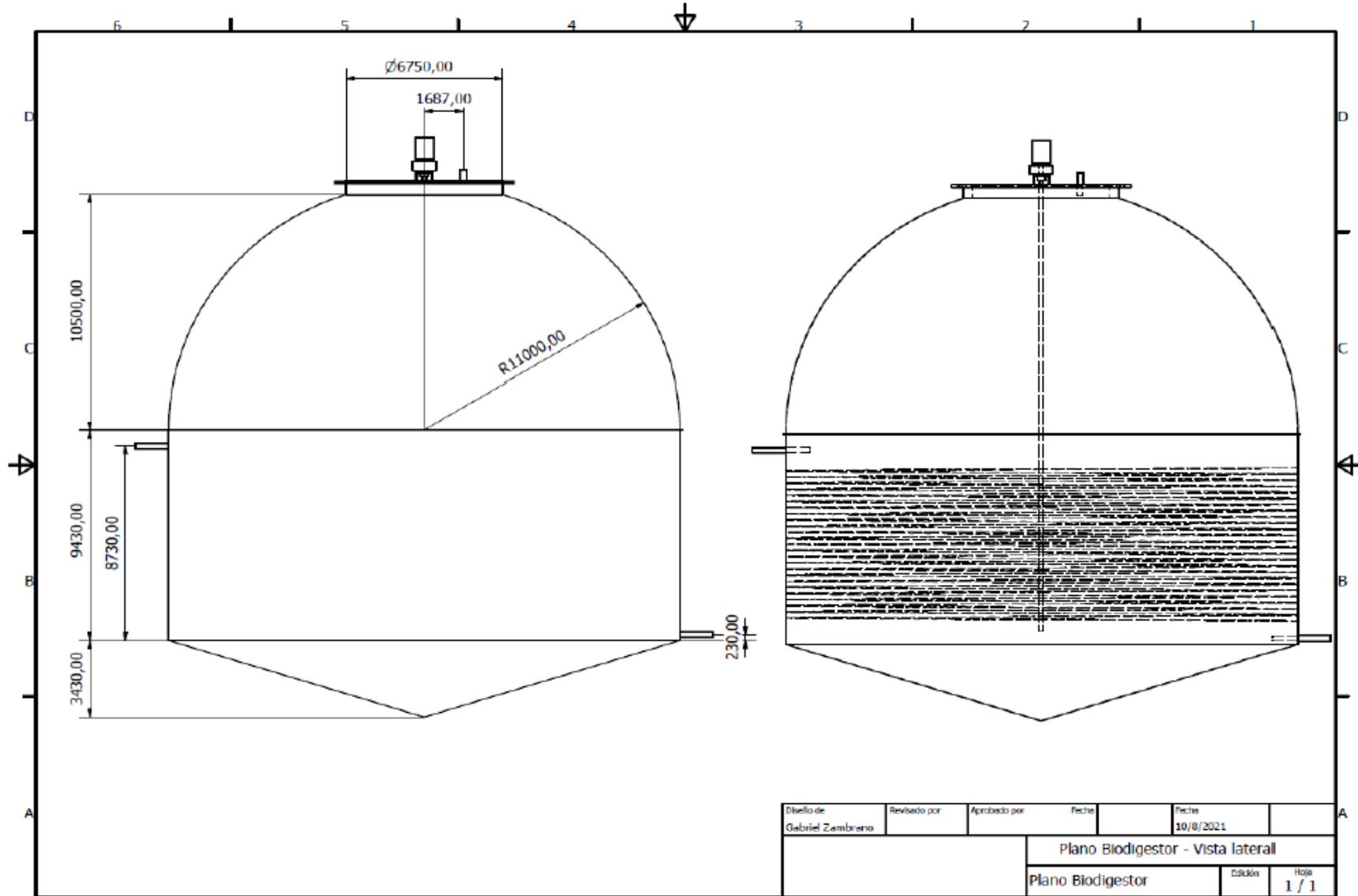
APÉNDICES – PLANOS

Plano 1. Esquema operativo de la planta

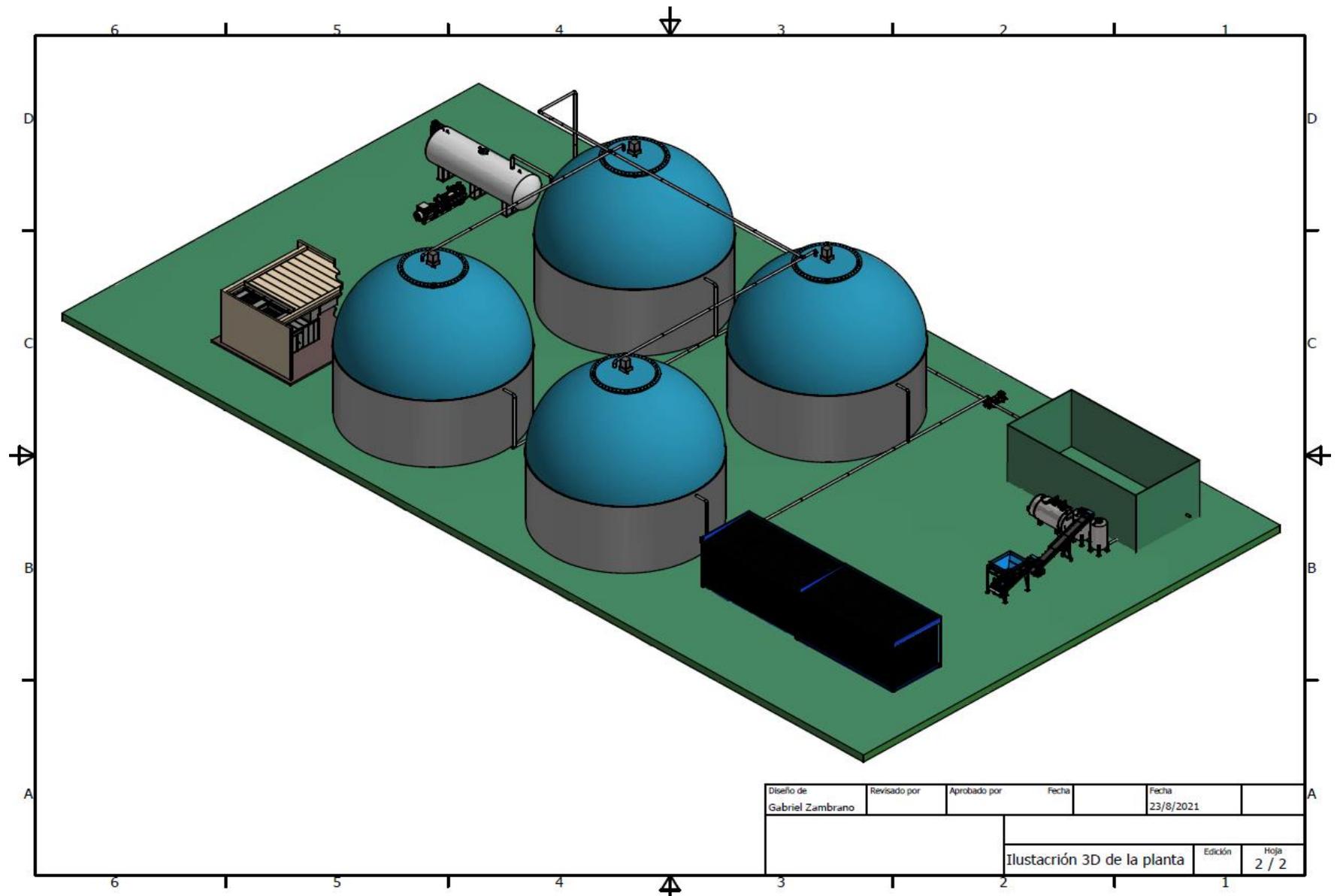


Diseño de Gabriel Zambrano	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
				23/8/2021	
			Esquema de operación		Edición 3 / 3

Plano 2. Biodigestor – vista lateral



Plano 3. Ilustración 3D de la planta



Diseño de Gabriel Zambrano	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 23/8/2021	
			Ilustración 3D de la planta		Edición Hoja 2 / 2