

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

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

Diseño de unidad piloto de producción de biogás rural

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

Anggie Galud Garcés Loor

Charles Javier Ramírez Añazco

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

## DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mi familia, a mi hermano mayor Zahiro Garcés, y a mi compañera de vida, mi madre Sarita Loor, por ser mi apoyo incondicional, y pilar fundamental en mi formación académica.

A todas las valiosas amistades que realicé a lo largo de mis estudios, de las cuales aprendí mucho e hicieron de mi etapa universitaria un lugar memorable.

Anggie Galud Garcés Loor

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a nuestros padres por brindarnos su apoyo incondicional durante nuestra formación académica, y ser promotores de nuestros sueños, a nuestros mentores, la PhD. Emérita Delgado y el PhD. Juan Peralta, por sus consejos y lecciones ofrecidas durante el desarrollo de este proyecto.

Anggie Galud Garcés Loor

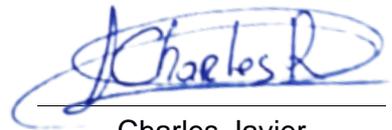
## DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Anggie Galud Garcés Loor* y Charles Javier Ramírez Añezco damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



---

Anggie Galud  
Garcés Loor



---

Charles Javier  
Ramírez Añezco

# EVALUADORES

---

**PhD. Emérita Delgado Plaza**  
PROFESOR DE LA MATERIA

---

**PhD. Juan Peralta Jaramillo**  
PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

El rancho Adriana Patricia ubicado en la zona rural en las cercanías de la ciudad Balzar en la provincia del Guayas requiere del diseño de un biodigestor le permita tratar los residuos orgánicos provenientes de su ganado bovino para la obtención de biogás, por lo que en base a las necesidades del cliente se seleccionó el modelo chino para el diseño del biodigestor. El diseño del biodigestor se realizó mediante la estimación de la cantidad de estiércol disponible y la cantidad de biogás que se espera producir, además, se seleccionó una cúpula metálica para facilitar el acceso al interior del biodigestor y poder realizar su mantenimiento de forma más simple. Bajo la suposición de un ganado de 10 vacas y de un 50% de recolección de estiércol, se obtuvo un VAR positivo y un TIR superior a la tasa de descuento, concluyendo la rentabilidad del proyecto, sin embargo, se adicionaron gráficas que muestran los valores mínimos de recolección de estiércol que permiten su rentabilidad. También se concluye que el biogás representa una mínima fracción de la ganancia que se puede obtener mediante el proyecto debido a la baja producción de este, por lo que la comercialización del biol es considerado como la principal fuente de ingreso.

**Palabras Clave:** Biodigestor, Digestión anaeróbica, Biogás, Biol.

## **ABSTRACT**

*The Adriana Patricia ranch located in the rural area near the city of Balzar in the province of Guayas requires the design of an anaerobic digester that allows it to treat organic waste from its cattle to obtain biogas, so based on the needs of the client, the Chinese model was selected for the design of the biodigester. The design of the anaerobic digester was carried out by estimating the amount of manure available and the amount of biogas that is expected to be produced, in addition, a metal dome was selected to facilitate access to the interior of the anaerobic digester and to be able to carry out its maintenance in a simpler way. Under the assumption of a herd of 10 cows and 50% of manure collection, a positive VAR and an IRR higher than the discount rate were obtained, concluding the profitability of the project, however, graphs were added showing the values manure collection minimums that allow its profitability. It is also concluded that biogas represents a minimal fraction of the profit that can be obtained through the project due to its low production, for which the commercialization of liquid biofertilizer is considered the main source of income.*

**Keywords:** *Anaerobic digester, Anaerobic digestion, Biogas, liquid biofertilizer.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
ÍNDICE DE PLANOS.....	X
CAPÍTULO 1.....	1
1.    Introducción .....	1
1.1    Definición del Problema.....	1
1.2    Justificación del problema.....	2
1.3    Objetivos.....	2
1.3.1    Objetivo General.....	2
1.3.2    Objetivos Específicos.....	2
1.4    Marco teórico.....	3
1.4.1    Digestión Anaeróbica.....	3
1.4.1.1    Etapas de la digestión anaeróbica .....	3
1.4.1.2    Parámetros que influyen en el proceso anaeróbico .....	5
1.4.1.3    Productos finales de la digestión Anaeróbica.....	7
1.4.2    Biodigestor.....	8
1.4.2.1    Modelos de biodigestores.....	9
1.4.3    Variables esenciales para el diseño de un biodigestor .....	10
1.4.4    Guías para el diseño del biodigestor.....	10
CAPÍTULO 2.....	12
2.    Metodología .....	12
2.1    Proceso de diseño.....	12
2.2    Alternativas de solución.....	13
2.2.1    Alternativa A: Tipo Chino (Domo Fijo).....	13
2.2.2    Alternativa B: Tipo Hindú (Domo Flotante).....	13
2.2.3    Alternativa C: Tipo Taiwanés (Tubular).....	14
2.3    Selección de la mejor alternativa.....	15

2.3.1	Factores de influencia.....	15
2.3.2	Matriz de comparaciones de atributos.....	16
2.3.3	Matriz de decisión.....	17
2.4	Diseño detallado de sus componentes.....	18
2.4.1	Cálculos preliminares.....	18
2.4.2	Sistema de Carga.....	21
2.4.3	Sistema de almacenamiento de biogás.....	22
2.4.4	Sistema de agitación.....	23
2.4.5	Sistema de extracción de biogás.....	26
2.4.6	Sistema de descarga.....	27
2.4.7	Válvula de seguridad.....	27
2.4.8	Trampa de agua.....	27
CAPÍTULO 3.....		29
3.	Resultados y Análisis.....	29
3.1	Producción estimada de biogás y biol.....	29
3.2	Diseño del biodigestor.....	32
3.2.1	Sistema de carga.....	33
3.2.2	Sistema de almacenamiento de biogás.....	33
3.2.3	Sistema de agitación.....	35
3.2.4	Sistema de extracción de biogás.....	37
3.3	Fichas técnicas de las partes del biodigestor.....	38
3.3.1	Sistema de extracción de biogás.....	38
3.3.2	Filtro de ácido sulfhídrico.....	38
3.3.3	Trampa de agua.....	39
3.3.4	Válvula de alivio de presión.....	40
3.3.5	Sistema de agitación.....	40
3.3.6	Estructura del biodigestor.....	41
3.4	Simulación de la presión interna en la estructura del biodigestor.....	42
3.5	Análisis de costo y factibilidad financiera.....	44
3.5.1	Egresos.....	44
3.5.2	Ingresos.....	46
3.6	Gráficas dependientes del porcentaje de recolección de estiércol.....	46
CAPÍTULO 4.....		54
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	54

4.1	Conclusiones.....	54
4.2	Recomendaciones.....	55

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

## **ABREVIATURAS**

DA	Digestión anaeróbica
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
GLP	Gas licuado de petróleo
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
C/N	Relación carbono/nitrógeno
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
TIR	Tasa interna de retorno
TRH	Tiempo de retención hidráulico
VAR	Valor en riesgo

## SIMBOLOGÍA

H <sub>2</sub> S	Ácido sulfhídrico
NH <sub>3</sub>	Amoniaco
bar	Bar
HP	Caballo de fuerza
C	Carbono
cm	Centímetro
PVC	Cloruro de Polivinilo
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
USD	Dólares americanos
°C	Grado Celsius
K	Grado Kelvin
H <sub>2</sub>	Hidrógeno molecular
h	Hora
kcal	Kilocalorías
kg	Kilogramo
km	Kilómetro
kmol	Kilomol
kPa	Kilopascal
MPa	Megapascal
CH <sub>4</sub>	Metano
m	Metro
mm	Milímetro
mol	Mol
N	Newton
N	Nitrógeno
Pa	Pascal
pH	Potencial de hidrógeno
rad	Radian
s	Segundo
W	Vatio

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama del proceso anaeróbico.....	5
Figura 1.2. Esquema básico de un biodigestor.....	9
Figura 2.1. Diagrama de flujo correspondiente al proceso de diseño.....	12
Figura 2.2. Biodigestor de domo fijo.....	13
Figura 2.3. Biodigestor de domo flotante.....	14
Figura 2.4. Biodigestor tubular.....	15
Figura 2.5. Escala de intensidad relativa.....	17
Figura 2.6. Geometría del sistema de agitación.....	23
Figura 3.1. Dimensiones referenciales de un biodigestor.....	32
Figura 3.2. Sistema de extracción de biogás.....	38
Figura 3.3. Filtro de ácido sulfhídrico.....	38
Figura 3.4. Trampa de agua.....	39
Figura 3.5. Válvula de alivio de presión.....	40
Figura 3.6. Sistema de agitación.....	40
Figura 3.7. Estructura del biodigestor.....	41
Figura 3.8. Distribución del coeficiente de seguridad en el biodigestor.....	43
Figura 3.9. Distribución de desplazamiento en la estructura del biodigestor.....	43
Figura 3.10. Distribución de los esfuerzos de Von Mises en el biodigestor.....	44

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Componentes del biogás.....	7
Tabla 1.2. Comparación de variables esenciales para el diseño de un biodigestor. ....	10
Tabla 2.1. Tabla de comparación de atributos.....	17
Tabla 2.2. Matriz de decisión.....	18
Tabla 2.3. Factor S para la velocidad crítica.....	24
Tabla 2.4. Valores de las constantes $K_L$ y $K_T$ . ....	26
Tabla 3.1. Medidas para dimensionar el biodigestor. ....	32
Tabla 3.2. Ficha técnica para el sistema de extracción de biogás.....	38
Tabla 3.3. Ficha técnica para el filtro de ácido sulfhídrico. ....	38
Tabla 3.4. Ficha técnica para la trampa de agua.....	39
Tabla 3.5. Ficha técnica para la válvula de alivio de presión.....	40
Tabla 3.6. Ficha técnica para el sistema de agitación. ....	41
Tabla 3.7. Ficha técnica para la estructura del biodigestor .....	42
Tabla 3.8. Presupuesto total.....	45
Tabla 3.9. Costo de mano de obra. ....	46
Tabla 3.10. Rentabilidad del proyecto .....	46

## ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 Estructura del biodigestor

PLANO 2 Sistema de transporte de biogás

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, para la generación de energía eléctrica se hace mucho uso de los combustibles fósiles, estos generan un gran daño ambiental y al no ser recursos renovables tienden a extinguirse y por ende a elevar su costo, por lo que es de gran importancia dar uso a fuentes de energías renovables, disminuyendo la contaminación producida por los combustibles fósiles y diversificando la matriz energética, también se debe tener en consideración que la población humana está en constante crecimiento lo cual influye en el aumento de la producción de alimentos, el sector ganadero es responsable del 9% del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) procedente de las actividades humanas, de acuerdo con estudios publicados en la revista Nature Geoscience, el estiércol de vaca forma parte de los principales contribuyentes de óxido nitroso atmosférico, produciendo un porcentaje elevado de los gases de efecto invernadero más perjudiciales. (Aneja, Schlesinger, & Erisman, 2015)

El estiércol producido por el ganado vacuno es considerado un problema ambiental por lo que es necesario innovar en tecnologías para dar un mejor manejo a este residuo. (Ruiz Pinto, 2020)

Este proyecto tiene como finalidad aprovechar el estiércol de ganado vacuno existente en el Rancho Agropecuario Adriana, para la generación de biogás a nivel domiciliario y poder ser utilizado para generar energía eléctrica o combustible para cocinar, cabe recalcar que en varias localidades rurales, no cuentan con estos servicios básicos, debido a que se encuentran lejos de redes eléctricas convencionales, por lo que hacen uso de cocinas artesanales, originando contaminación para los habitantes de las viviendas.

### 1.1 Definición del Problema

El rancho Agropecuario Adriana Patricia ubicado a 18 km de Balzar vía a San Juan tiene dificultades en cuanto al manejo y tratamiento de residuos orgánicos producidos por su ganado vacuno. La ganadería es responsable de un porcentaje considerable en cuanto a la contaminación ambiental producida en la actualidad. Es una de las principales causas de generación de gases de efecto invernadero, así como de la degradación de los suelos y la contaminación de los recursos

hídricos. Además, es un sector que se encuentra en constante crecimiento debido a la alta demanda por parte de la población en general.

## **1.2 Justificación del problema**

En la actualidad se ha incrementado en interés por la implementación de biodigestores, especialmente en espacios rurales, debido a la sencillez con la que se puede implementar su tecnología, la cual nos permite obtener biogás y biofertilizante a partir de los desechos orgánicos.

La utilización de biodigestores para el tratamiento de residuos orgánicos brinda beneficios tales como: minimizar la liberación de los gases de efecto invernadero producto del proceso anaeróbico, reducir la contaminación del suelo y de los recursos hídricos y disminuir la posibilidad de que personas mantengan contacto directo con microorganismos que resulten perjudiciales para su salud. (Scarlat, Dallemand, & Fahl, 2018)

El biogás posee una diversa cantidad de aplicaciones entre las cuales destacan su implementación como combustible en la industria energética o para producir calor, la sustitución del gas licuado de petróleo (GLP) en hogares y para su inyección en la red de gas natural. (Esteves, Herrera, Esteves, & Morgado, 2019)

El uso del biofertilizante o bioabono obtenido luego del proceso de la digestión anaeróbica permite reducir el gasto económico por el uso de fertilizantes artificiales, brinda microorganismos que permiten que los cultivos reciban el aporte de nutrientes necesarios para su buen desarrollo y permite mantener la sostenibilidad de los suelos debido a que estos no se contaminan por la acumulación de químicos artificiales. (Bhattacharyya, Roy, Tribedi, Ghosh, & Ghosh, 2020)

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar una unidad rural de biodigestor para la producción de biogás por medio del tratamiento de estiércol de ganado vacuno.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Dimensionar el biodigestor considerando la cantidad de sustrato disponible y el rango de producción de biogás.
2. Dimensionar la estructura del biodigestor empleando los criterios biológicos de operación óptima.

3. Elaborar los planos del biodigestor por medio de una herramienta CAD/CAM.
4. Desarrollar el estudio económico por medio del análisis de costos de diseño y construcción.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Digestión Anaeróbica**

Los residuos orgánicos provenientes de animales, cultivos o desechos humanos son los componentes principales utilizados para la generación de biogás y biofertilizante por medio de un proceso denominado digestión anaeróbica (DA), el cual se ve limitado por la composición del sustrato (materia orgánica utilizada para la DA), entre otros factores, por lo que no se puede considerar apropiado utilizar cualquier tipo de residuo orgánico para la generación de biogás debido a que el proceso podría ser ineficiente. Sin embargo, existen diversas técnicas que permiten mejorar el rendimiento del proceso para obtener mejores resultados. (Langeveld & Peterson, 2018) En este proceso intervienen diferentes tipos de microorganismos que trabajan sin la presencia de oxígeno, el cual es un inhibidor del proceso, para degradar la materia orgánica y formar una mezcla de gases entre los cuales destacan el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el metano (CH<sub>4</sub>). (Baredar, Khare, & Nema, 2020)

#### **1.4.1.1 Etapas de la digestión anaeróbica**

El proceso de DA se puede clasificar en cuatro etapas, hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, cada etapa representa un proceso llevado a cabo por un grupo específico de bacterias. Este proceso se muestra a detalle en la figura 1.

La materia prima contiene polímeros complejos como lípidos, proteínas y carbohidratos, en la primera etapa de la DA denominada hidrólisis, las bacterias convierten estos compuestos en ácidos grasos, aminoácidos y azúcares. Esta etapa es de principal interés debido a que su rendimiento influye significativamente en el proceso de DA, por lo que se ha estudiado la aplicación de pretratamientos a la materia orgánica para mejorar lo para optimizar la acción microbiana. (Rajin, 2018)

Las moléculas orgánicas solubles obtenidas por la hidrólisis son descompuestas en la segunda etapa conocida como acidogénesis, la cual consiste en un proceso de fermentación cuyo resultado es la formación de ácidos como el propiónico, butírico, entre otros productos intermedios. (Wid & Horan, 2018)

La acetogénesis es la tercera etapa de la DA donde las bacterias acetogénicas utilizan el producto resultante de la acidogénesis para producir hidrógeno molecular ( $H_2$ ),  $CO_2$  y ácido acético. Otras bacterias presentes en esta etapa son las homoacetogénicas, las cuales utilizan el  $H_2$  y  $CO_2$  presentes para formar ácido acético. Es importante mantener la concentración de hidrógeno en niveles relativamente bajos dado que este compuesto puede reducir el crecimiento de las bacterias acetogénicas. (Deng, Liu, & Wang, Anaerobic Digestion Microorganisms, 2020)

La última etapa de la DA es la metanogénesis y consiste en la producción de  $CH_4$  y  $CO_2$  por medio de las bacterias metanogénicas, las cuales se alimentan de los productos obtenidos mediante las etapas previas. Las bacterias que intervienen en este proceso son muy sensibles a los cambios en el ambiente, por lo que es fundamental mantener estable las condiciones del entorno a fin de conseguir un buen crecimiento bacteriano. (Anukam, Mohammadi, Naqvi, & Granström, 2019)

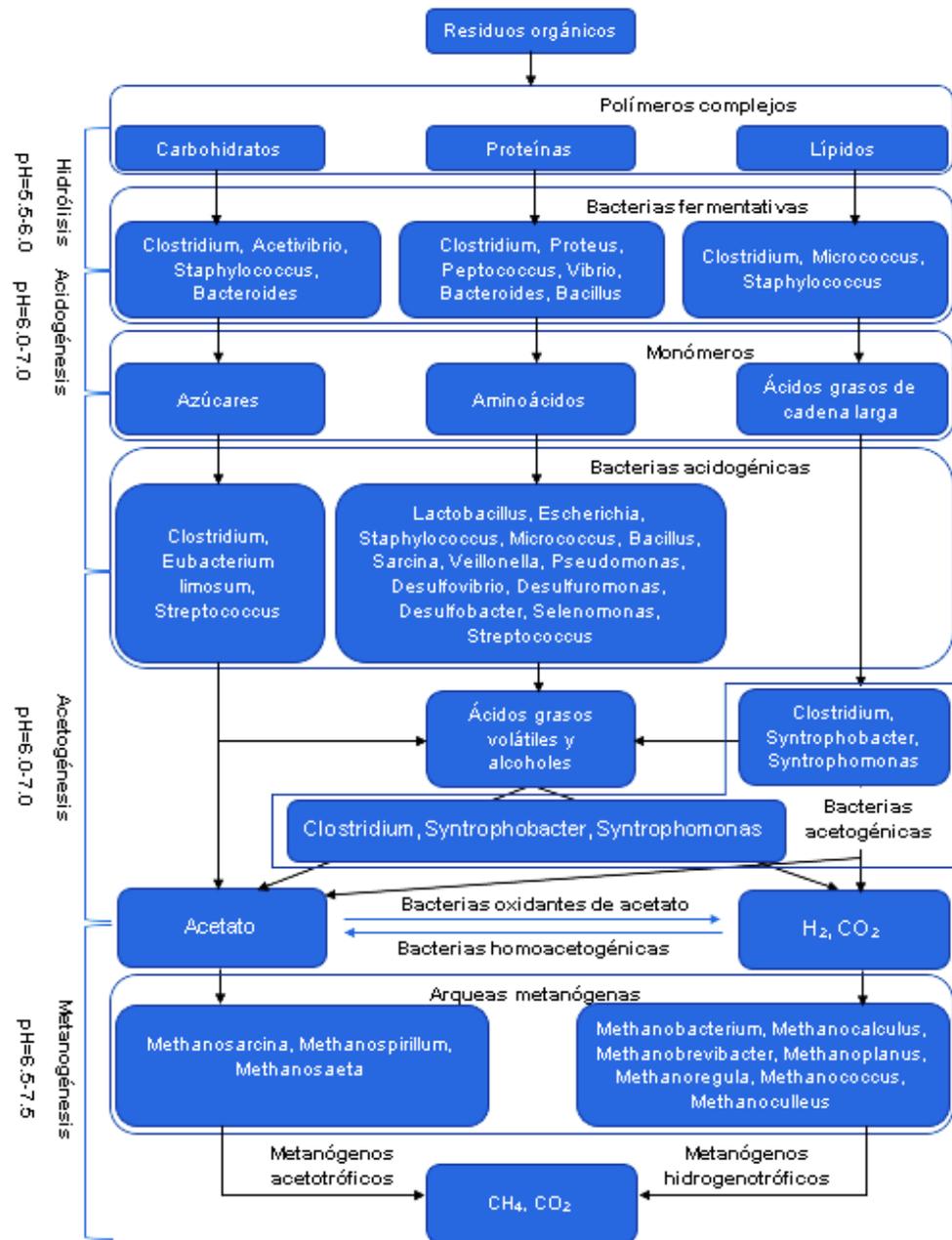


Figura 1.1. Diagrama del proceso anaeróbico. [Pramanik, Suja, Zain, & Pramanik, 2019]

#### 1.4.1.2 Parámetros que influyen en el proceso anaeróbico

Los parámetros que se deben tener en cuenta durante el proceso de DA son:

- pH: Es recomendable mantener el potencial de hidrógeno (pH) en niveles neutros para que exista un óptimo crecimiento bacteriano, se puede considerar como aceptable un rango entre 6.8 y 7.4, sin embargo, se ha demostrado que existe un mejor desarrollo en las

bacterias metanogénicas para niveles de pH de 8, mientras que para las bacterias acidogénicas prefieren niveles de pH de 6. (Sravan, Tharak, & Mohan, 2021)

- Temperatura: Este parámetro se considera de gran influencia en el proceso de DA debido a que puede acelerar o ralentizar la producción de biogás. Existen tres condiciones para la DA según la temperatura de operación, psicrófila (temperatura de operación por debajo de los 20°C), mesófila (alrededor de 37°C) y termófila (entre 55 y 70°C). (Tabatabaei, y otros, 2018)
- Relación carbono/nitrógeno (C/N): Es una cifra que relaciona la cantidad de carbono con la cantidad de nitrógeno presentes en una zona específica. (Román, Martínez, & Pantoja, 2013) Se recomienda que la relación C/N se mantenga en un rango entre 20:1 a 35:1, siendo 25:1 la relación óptima. Es decir, los niveles de carbono presentes en el ambiente deben ser mayores que los de nitrógeno, debido a que una alta presencia de nitrógeno puede inhibir la actividad microbiana debido a su toxicidad para las bacterias metanogénicas. (Sravan, Tharak, & Mohan, 2021) Por otro lado, niveles muy elevados de carbono también resultan perjudiciales para la reproducción de las bacterias.
- Tiempo de retención hidráulico (TRH): Este parámetro indica el rango de tiempo en el cuál la materia permanece dentro del biodigestor, este valor es escogido tomando en cuenta que la producción de biogás tiende a reducirse notablemente luego de alcanzar su valor máximo, por lo que es necesario renovar la materia orgánica para mantener una estable la producción de biogás. (Sravan, Tharak, & Mohan, 2021) Este valor depende del tipo de sustrato utilizado y de la temperatura de operación (a mayor temperatura de operación, menor será el TRH). (Tabatabaei, y otros, 2018)
- Sólidos totales (ST) y Sólidos volátiles (SV): El porcentaje de ST representa el contenido de materia sólida presente en el sustrato, por otro lado, el porcentaje de SV indica la cantidad de compuestos orgánicos contenidos en el sustrato. El contenido de

ST y SV difiere con relación al tipo de materia orgánica utilizada. Para procesos de DA húmeda se requiere sustratos que contengan entre 10% a 15% de ST, mientras que la DA seca utiliza sustratos con ST de entre 25% y 40%. (Tabatabaei, y otros, 2018) Es necesario mantener estos parámetros controlados para mantener un ambiente propicio para la proliferación de los microorganismos que actúan en la DA.

**1.4.1.3 Productos finales de la digestión Anaeróbica.**

Los principales productos que se obtienen de la DA son el biogás y el biol.

El Biogás es una mezcla de gases obtenidos mediante un proceso biológico que consiste en la degradación de material orgánico en condiciones anaeróbicas y es la mezcla de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), entre otros gases en menor porcentaje como son el hidrógeno (H<sub>2</sub>), el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), amoniacó (NH<sub>3</sub>), entre otros. Posee alto contenido en metano, el cual es un gas incoloro, inflamable, llegando a constituir hasta un 97% del mismo, debido a esta característica, es utilizado en cocinas, calentadores, motores de combustión interna y su principal uso en zonas rurales está orientado en la producción de energía, y en la producción de fertilizantes. La composición del biogás varía de acuerdo con la biomasa utilizada como sustrato y con las condiciones en las que se realiza el proceso. (Lara Guilcapi, 2016) Su composición aproximada es presentada a continuación en la Tabla 1.1.

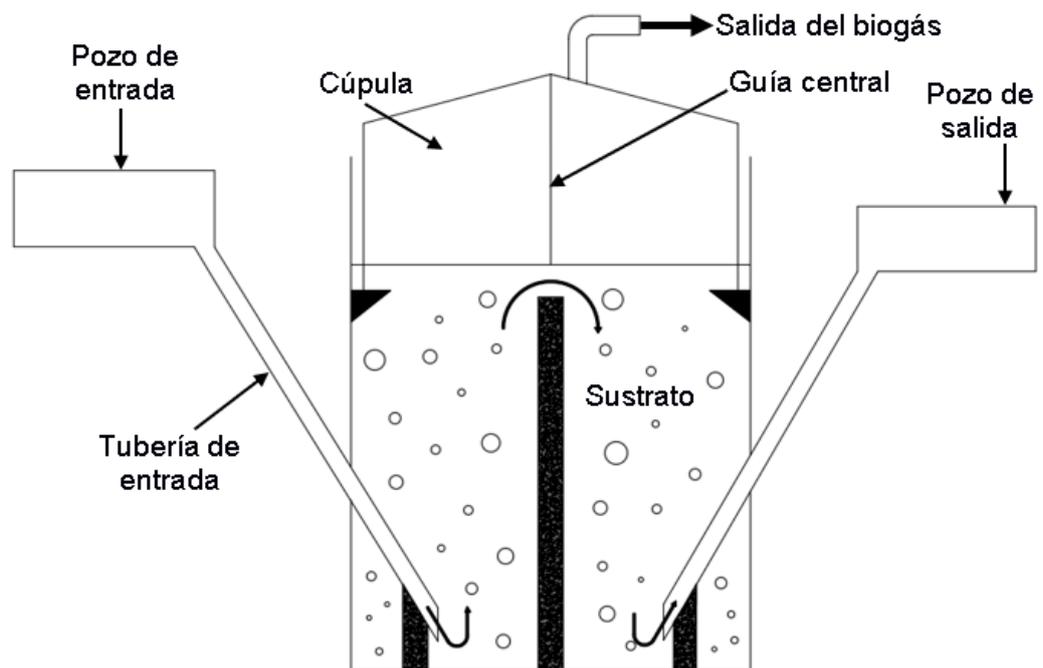
**Tabla 1.1. Componentes del biogás. [Ruiz Pinto, 2020]**

Componente	Fórmula	Porcentaje (%)
Metano	CH <sub>4</sub>	55 - 70
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	35 - 40
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0,5 - 5
Sulfuro de hidrógeno	H <sub>2</sub> S	0,1
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	1 - 3

Otro producto resultante de la DA es el efluente líquido conocido como biol, (Cotrina Lezama & Villanueva Vigo, 2015) el cual es una alternativa natural que promueve y estimula el desarrollo óptimo de las plantas, al mejorar el poder germinativo de las semillas, resulta a través del proceso de fermentación del estiércol y agua, mediante la transformación química y descomposición de residuos orgánicos, en un ambiente anaeróbico. Puede ser elaborado y enriquecido en dependencia de las necesidades que requiera el cultivo, su composición depende del sistema que se haya utilizado como de la materia orgánica alimentada, algunas de las más utilizadas son, restos de alimentos, de cosechas, de podas, a las que se les añade agua, melaza, leguminosas, entre otros componentes de origen natural, que actúen como repelentes contra plagas. (Salazar Cuaila, Amusquivar Coaquira, Llave Perez, & Rivasplata Cabanillas, 2016)

#### **1.4.2 Biodigestor**

El biodigestor es un recipiente cuyo propósito consiste en albergar la materia orgánica y los microorganismos responsables del proceso de DA, para garantizar su funcionamiento apropiado se debe asegurar que exista un entorno anaeróbico en su interior, es decir, no debe existir presencia de oxígeno. (Deng, Liu, & Wang, Rural Household Digesters, 2020) El diseño de un biodigestor se fundamenta en detallar aspectos claves (según las necesidades específicas) de una estructura básica generalizada, la cual está compuesta por una cámara de digestión, un espacio para almacenar el biogás producido, una zona de acceso para el afluente, una zona de descarga para el efluente y una válvula para la extracción del biogás. (Talia, 2018) La estructura básica de un biodigestor se muestra a continuación en la Figura 2.



**Figura 1.2. Esquema básico de un biodigestor. [Okareh, Timothy, & Shittu, 2013]**

#### **1.4.2.1 Modelos de biodigestores**

Existen diversos modelos básicos de biodigestores que pueden ser utilizados como base para realizar el diseño detallado, sin embargo, para la producción de biogás en espacios rurales los modelos más recurrentes son los de domo fijo, domo flotante y tubulares.

El biodigestor de domo fijo se construye bajo tierra para evitar que existan cambios bruscos de temperatura en su interior, está fabricado en su totalidad con materiales rígidos como hormigón o ladrillos. Este biodigestor tiene la particularidad que el domo se encuentra unido a la cámara de digestión en una sola estructura. El biogás producido por la DA se agrupa en el domo antes de ser extraído por la válvula superior. (Poudel, 2018) El modelo de domo fijo más representativo es el biodigestor chino.

El biodigestor de domo flotante se caracteriza por tener una cámara de digestión rígida y una cúpula móvil en la cual se almacena el biogás. En el momento que la DA empieza a producir biogás, este genera una presión contra la cúpula, provocando que ascienda. Por

otro lado, la cúpula desciende a medida que se extrae el biogás, este cambio de volumen del biodigestor permite mantener la presión interna constante. (Deng, Liu, & Wang, Rural Household Digesters, 2020) El modelo más utilizado es biodigestor hindú.

El biodigestor tubular presenta un diseño sencillo y su construcción se puede realizar con materiales económicos. Son cargados principalmente con estiércol de ganado. Su diseño no permite aislar térmicamente el interior, por lo que está expuesto a cambios bruscos de temperatura, debido a esto el biodigestor suele ser construido en invernaderos o en lugares que mantengan el biodigestor a una temperatura óptima para producir la DA. (Castro, y otros, 2017) El biodigestor tubular también es conocido como biodigestor flexible o biodigestor taiwanés.

### 1.4.3 Variables esenciales para el diseño de un biodigestor

Los datos mostrados en la Tabla 1.2 fueron utilizados por los distintos autores para realizar su propio diseño de un biodigestor. Estos valores son utilizados como guía en el siguiente capítulo para el diseño del biodigestor.

**Tabla 1.2. Comparación de variables esenciales para el diseño de un biodigestor.**

Parámetros	Autor 1 <sup>1</sup>	Autor 1 <sup>1</sup>	Autor 2 <sup>2</sup>	Autor 3 <sup>3</sup>	Autor 4 <sup>4</sup>	Autor 5 <sup>5</sup>
Kg/día	7.5	7.5	7.5	10	10.67	4.42
Relación Estiércol:Agua	1	1	1	1	1:0.75	1:3
TRH	49	38	50	50	28	40
m <sup>3</sup> biogás/kg estiércol	1.8E-06	2.8E-06	0.00072	0.032	0.026	0.039
Temperatura	13.35	18.17	14.27	22	26	24.53

Nota: <sup>1</sup> (Lara Guilcapi, 2016). <sup>2</sup> (Coronel Durazno, 2018). <sup>3</sup> (Castillo Monar, 2009). <sup>4</sup> (Gordón Zuleta & Samaniego Manchay, 2014). <sup>5</sup> (Barzallo Bravo, 2018)

### 1.4.4 Guías para el diseño del biodigestor

El diseño del biodigestor de este proyecto se basa en la aplicación de los lineamientos planteados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en el “manual de biogás” y en la “guía

teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores” junto con los requerimientos del cliente.

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Proceso de diseño

Para desarrollar una solución a la necesidad del cliente se realizó un conjunto de pasos ordenados y distribuidos en tres etapas, obtener información, desarrollar la solución y validar la solución, en la Figura 3 se detalla dicho proceso de forma resumida.

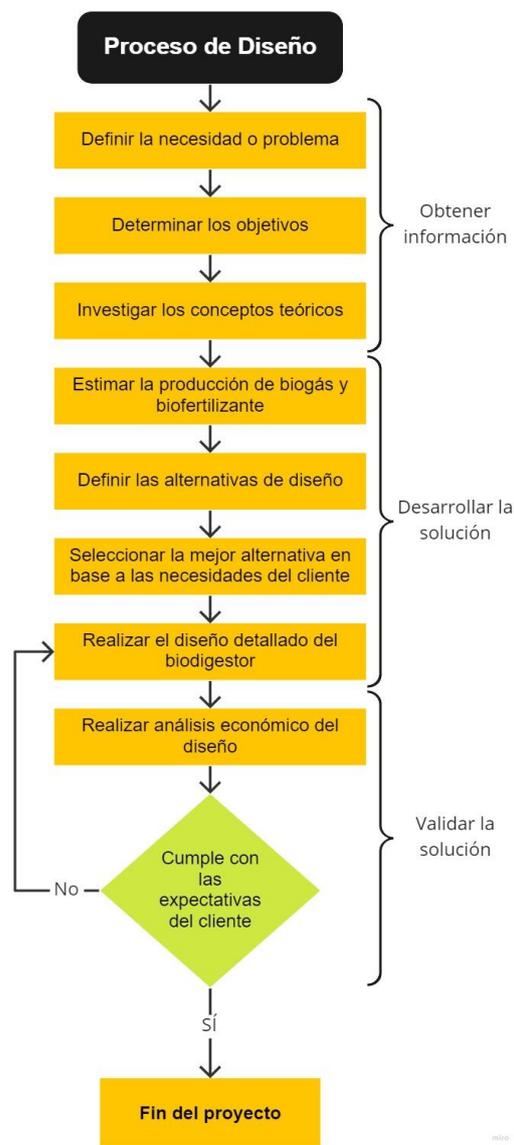


Figura 2.1. Diagrama de flujo correspondiente al proceso de diseño. [Elaboración propia]

## 2.2 Alternativas de solución

### 2.2.1 Alternativa A: Tipo Chino (Domo Fijo)

Diseño originado y altamente difundido en China, consiste en una cámara cerrada, con sus respectivas cámaras de carga y descarga, su estructura puede ser construida de concreto armado, piedra, hormigón, ladrillo, y sus paredes internas permeabilizadas con métodos como son, aplicación de cemento mezclado con porcelana, para evitar la fuga de líquido.

Durante el proceso el gas producido es almacenado debajo del domo, desplazando contenido del digestor a la cámara del efluente, esto crea fuerzas estructurales altas, razón por la que el reactor tiene forma esférica en el tope y base.

Se estima una vida útil de 15 años siguiendo un buen mantenimiento y se recomienda que la construcción sea bajo tierra en suelos estables y firmes, cabe recalcar que no ha sido difundido fuera de China donde su construcción es apoyada por política nacional a diferencia de otros países donde su construcción muchas veces no compensa su alto costo.

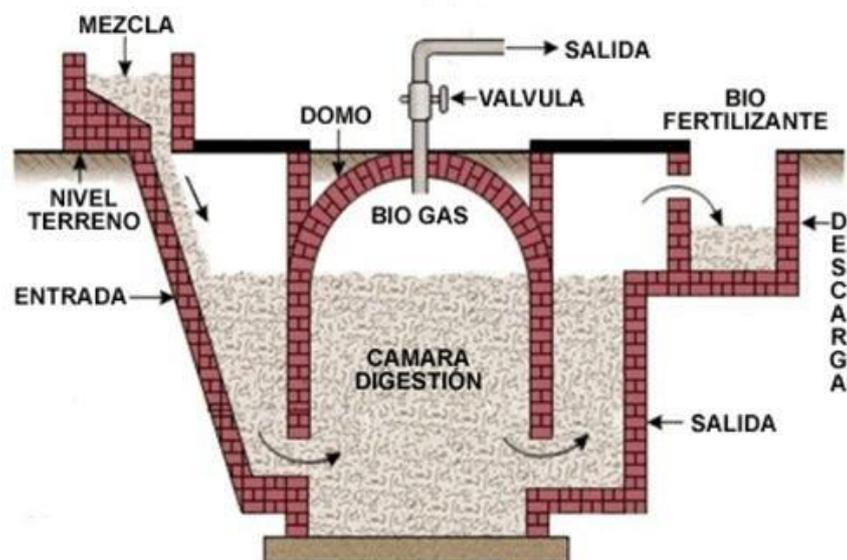


Figura 2.2. Biodigestor de domo fijo. [Zuñiga, 2015]

### 2.2.2 Alternativa B: Tipo Hindú (Domo Flotante)

Consiste en un digestor subterráneo, su diseño es en forma cilíndrica y tiene un depósito de gas móvil en forma de campana flotante, para su

construcción se usa comúnmente cemento, ladrillos, arena, grava y para la campana láminas de acero inoxidable o plástico. La campana puede flotar en la carga de fermentación o en un anillo de agua cilíndrico, el gas se acumula dentro de la campana, la cual además de subir y bajar es libre de girar, de acuerdo con la cantidad de gas almacenado.

Dos tubos PVC se conectan al tanque de almacenamiento, uno ubicado en la caja de entrada, permitiendo el acceso del sustrato y el otro en la caja de la salida para la descarga del biol.

Su tiempo de vida útil comprende un promedio de 20 años, dependiendo del mantenimiento que se realice.

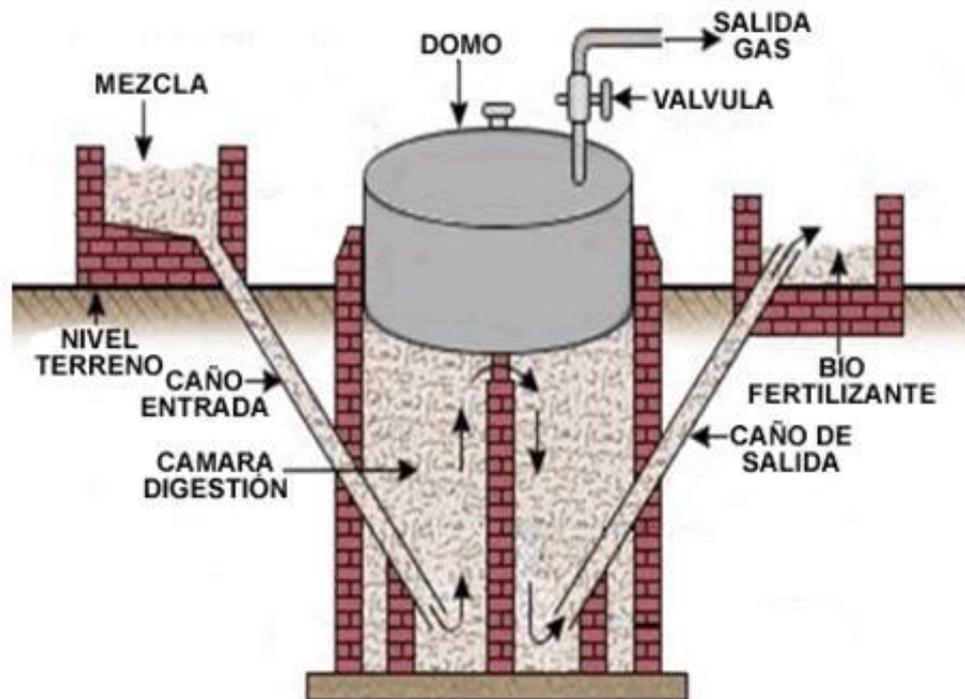


Figura 2.3. Biodigestor de domo flotante. [Zuñiga, 2015]

### 2.2.3 Alternativa C: Tipo Taiwanés (Tubular)

De origen Taiwanés, es un sistema de modelo tubular, cilíndrico, su funcionamiento consiste en introducir la materia a digerir por un lado del reactor, dentro del tanque se produce tanto la digestión como la recolección de gas, mismo que se va acumulando en la parte superior del reactor, mientras que el proceso de digestión ocurre en la parte inferior del mismo,

sección que es llenada con materia orgánica y agua, suelen ser comúnmente de polietileno o geomembrana de PVC.

Este biodigestor presenta varias ventajas como son, bajo costo de construcción, debido a que varios materiales pueden ser conseguidos de la misma propiedad, la mano de obra puede aportar la familia, es fácil de transportar debido a su bajo peso, y el mantenimiento de un biodigestor de este tipo es de costo mínimo, debido a que, en caso de que el plástico presentara algún tipo de inconveniente, puede ser reemplazado sin necesidad de invertir grandes cantidades de dinero. No obstante, también presenta desventajas como son su vulnerabilidad para fisurarse debido a condiciones climáticas adversas, a acciones de animales o incluso humanos y su corto tiempo de vida útil.

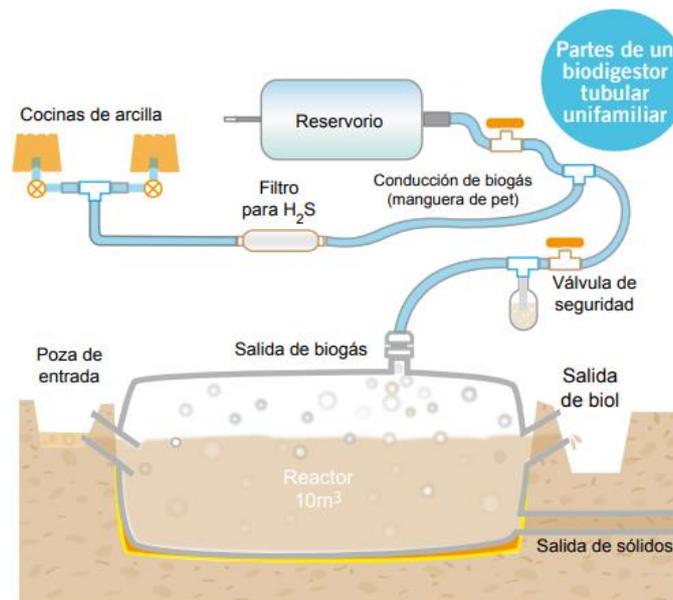


Figura 2.4. Biodigestor tubular. [Cotrina Lezama & Villanueva Vigo, 2015]

## 2.3 Selección de la mejor alternativa

### 2.3.1 Factores de influencia

Para seleccionar la mejor alternativa, se hizo consideración de factores que puedan influenciar en el diseño, al igual que su ponderación.

Los factores analizados fueron los siguientes:

- A. **Costo:** Costo que involucra la fabricación de cada uno de los biodigestores. La propuesta de diseño busca disminuir el costo de fabricación para fomentar el uso de energías renovables.
- B. **Producción de biogás:** Capacidad que poseen cada uno de los biodigestores para producir biogás.
- C. **Producción de biol:** Relaciona la capacidad que poseen cada uno de los biodigestores para producir biol.
- D. **Mantenimiento:** Facilidad de mantenimiento que posee el equipo, teniendo en cuenta el uso constante y disponibilidad de piezas.
- E. **Instalación:** Facilidad que posee el equipo para ser instalado.
- F. **Durabilidad:** En relación con la vida útil que poseen cada uno de los biodigestores.
- G. **Menor desgaste de las partes:** Duración ante el desgaste que poseen los componentes de los biodigestores.

### 2.3.2 Matriz de comparaciones de atributos

Cuando se trata de la construcción de un biodigestor de tipo rural con la finalidad de usos primarios como son, cocción de alimentos, o en pequeñas actividades productivas como panaderías, secado de granos, entre otras, la producción de biogás no suele ser elevada, estos modelos no asocian su rentabilidad a generación de biogás comercial, no obstante, una forma de aumentar la rentabilidad de un biodigestor a pequeña escala es comercializar el biol, bajo estas consideraciones de producción de biogás para uso interno, se ha procedido a la jerarquización de variables, empleando el método de matriz de diseño, donde el mayor peso de 28% fue otorgado a la producción de biol, por las condiciones mencionadas anteriormente, seguido del costo con un 23% debido a que la propuesta de diseño busca disminuir el costo de fabricación para fomentar el uso de energías renovables, teniendo en consideración los requerimientos del cliente, se tiene la durabilidad con un 18% haciendo referencia a la vida útil de los biodigestores, la producción de biogás con un 13%, la instalación que es un proceso que lleva varias etapas y es fundamental para su correcto funcionamiento se le otorgó un 10% y finalmente el mantenimiento y desgaste de partes un 4%.

CRITERIO	A	B	C	D	E	F	G	TOTAL FILA	PESO
A	1	5	0,33	3	5	1	3	18,33	0,224673
B	0,2	1	0,33	3	3	0,33	3	10,67	0,130719
C	3	3	1	3	5	3	5	23	0,281863
D	0,33	0,33	0,33	1	0,33	0,33	1	3,67	0,044935
E	0,2	0,33	0,2	3	1	0,33	3	8,07	0,098856
F	1	3	0,33	3	3	1	3	14,33	0,175654
G	0,33	0,33	0,2	1	0,33	0,33	1	3,53	0,043301
<b>TOTAL</b>								81,6	1

**Tabla 2.1. Tabla de comparación de atributos. [Elaboración propia]**

Importancia	Definición	Explicación
1	De igual importancia	Igual contribución de dos tipos de actividades al objetivo general.
3	Superioridad moderada de un criterio sobre otro	La experiencia de una ligera superioridad con respecto a otro.
5	Fuerte Superioridad	La experiencia habla de ello
7	Importancia Significativa	A un tipo de actividad se le da tal importancia que se vuelve significativo.
9	Superioridad Indiscutible	Se admite sin discusión.
2	Decisiones Intermedias entre dos apreciaciones cercanas	Se utiliza en casos de convenio y compromiso.
4	Decisiones Intermedias entre dos apreciaciones cercanas	Se utiliza en casos de convenio y compromiso.
6	Decisiones Intermedias entre dos apreciaciones cercanas	Se utiliza en casos de convenio y compromiso.
8	Decisiones Intermedias entre dos apreciaciones cercanas	Se utiliza en casos de convenio y compromiso.
Magnitudes Inversas	1/2, 1/3, 1/4, 1/5... 1/9	

**Figura 2.5. Escala de intensidad relativa. [Saaty, 1980]**

### 2.3.3 Matriz de decisión

Las alternativas de solución fueron evaluadas de acuerdo con los factores de influencia con sus respectivas ponderaciones, el criterio de calificación fue de 0-5 dependiendo del desempeño de las alternativas con respecto a los factores, en la tabla 2.2, se observa que la opción A obtuvo el mayor puntaje que corresponde al biodigestor de domo fijo, tipo chino.

**Tabla 2.2. Matriz de decisión. [Elaboración propia]**

Factores de influencia	A	B	C	D	E	F	G	
Alternativa/ ponderación	23%	13%	28%	4%	10%	18%	4%	Total
A	4	4	5	4	4	5	5	4,52
B	3	5	4	3	3	4	4	3,77
C	5	3	3	5	5	1	3	3,41

## 2.4 Diseño detallado de sus componentes

### 2.4.1 Cálculos preliminares

Para realizar el diseño del biodigestor primero fue necesario estimar el rango de producción de biogás y biol que se va a generar mediante el proceso de DA.

Debido a que el rancho no posee una cantidad fija de vacas se trabajó con un valor máximo y uno mínimo.

- $N^{\circ} vacas_{max}$ : Número máximo de vacas en el rancho
- $N^{\circ} vacas_{min}$ : Número mínimo de vacas en el rancho

La producción diaria de estiércol de una sola vaca (PEV) se estimó realizando un promedio entre los valores presentados en la Tabla 1.2 ubicada en el capítulo anterior.

Para obtener la producción diaria de estiércol considerando todas las vacas se multiplicó la cantidad de estiércol diario que produce una sola vaca por el número de vacas.

$$kg \text{ estiércol } \left[ \frac{kg}{día} \right] = PEV \left[ \frac{kg}{día * vaca} \right] * N^{\circ} vacas \quad (2.1)$$

Regularmente se considera que diariamente se alcanza a recolectar el 70% del estiércol producido por el ganado, esto se debe a las pérdidas que se producen porque el estiércol se mezcla con la tierra. (Gordón Zuleta & Samaniego Manchay, 2014) Sin embargo, se decidió reducir el porcentaje

de recolección de estiércol debido a que las vacas se encuentran dispersas en el terreno que consta de 53 hectáreas, por lo que se estima que una recolección del 50% de estiércol es un valor más factible.

$$kg \text{ real estiércol } \left[ \frac{kg}{día} \right] = kg \text{ estiércol } \left[ \frac{kg}{día} \right] * 50\% \quad (2.2)$$

El TRH utilizado fue estimado realizando el promedio de los valores presentes en la Tabla 1.2 del capítulo anterior.

La cantidad total de estiércol para la alimentación del biodigestor fue obtenida mediante la cantidad diaria de estiércol recolectado por el TRH.

$$kg \text{ total estiércol } [kg] = kg \text{ real estiércol } \left[ \frac{kg}{día} \right] * TRH [días] \quad (2.3)$$

El volumen total que ocupa el estiércol ( $V_e$ ) se lo obtuvo dividiendo la cantidad total de estiércol para su densidad ( $\rho$ ).

$$V_e [m^3] = \frac{kg \text{ total estiércol } [kg]}{\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]} \quad (2.4)$$

El sustrato que ingresa al biodigestor está compuesto por una mezcla entre la materia prima, que en este caso es el estiércol de vaca, y agua. La relación entre la cantidad de estiércol y de agua presente en el sustrato varía dependiendo de las propiedades del estiércol, sin embargo, se recomienda una relación de 1:2 (2 partes de agua y 1 parte de estiércol) para mantener las condiciones óptimas durante la DA. (Salazar Abad & Arias Bonilla, 2016)

$$\frac{Volumen \text{ de estiércol}}{Volumen \text{ de agua}} = \frac{1}{2} \quad (2.5)$$

La cantidad de agua necesaria ( $V_a$ ) para mezclar con el estiércol se obtuvo mediante la relación descrita con anterioridad.

$$V_a [m^3] = V_e [m^3] * 2 \quad (2.6)$$

Para el volumen total de sustrato se consideró la cantidad de estiércol total para alimentar el biodigestor y la cantidad de agua necesaria. (FAO, 2011)

$$Sustrato [m^3] = V_a [m^3] + V_e [m^3] \quad (2.7)$$

La producción estimada de biogás por cada kilogramo de estiércol (BE) se determinó mediante el promedio de los parámetros mostrados en la Tabla 1.2 del capítulo anterior.

La producción total de biogás se estimó considerando la producción de biogás por cada kilogramo de estiércol, la cantidad total de estiércol por utilizar, y el TRH. (FAO, 2011)

$$Biogás [m^3] = kg \text{ total estiércol } [kg] * BE \left[ \frac{m^3}{kg} \right] \quad (2.8)$$

La cantidad de sustrato utilizado en kilogramos fue obtenida mediante la multiplicación del volumen del sustrato por su densidad.

$$Sustrato [kg] = Sustrato [m^3] * \rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \quad (2.9)$$

La estimación de la producción de biogás en kilogramos fue realizada multiplicando el volumen de biogás producido por su densidad.

$$Biogás [kg] = Biogás [m^3] * \rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \quad (2.10)$$

La cantidad de biofertilizante (parte sólida y líquida) fue estimada mediante la diferencia entre el sustrato que ingresa al biodigestor y la producción de biogás.

$$\text{Biofertilizante [kg]} = \text{Sustrato [kg]} - \text{Biogás [kg]} \quad (2.11)$$

La producción estimada de biol fue considerada como el 90% del volumen del biofertilizante producido. (Casanovas, Della Vecchia, Reymundo, & Serafini, 2019)

$$\text{Biol [m}^3] = \frac{\text{Biofertilizante [kg]}}{1000 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]} * 90\% \quad (2.12)$$

El volumen del biodigestor (VB) fue estimado mediante la tabla 3.3 ubicada en el capítulo 3.

Para obtener el volumen donde se va a almacenar el biogás (Vg) se sustrajo el volumen del sustrato al volumen del biodigestor.

$$Vg[m^3] = VB [m^3] - \text{Sustrato [m}^3] \quad (2.13)$$

#### 2.4.2 Sistema de Carga

El estiércol será recolectado y almacenado en un recipiente hasta obtener la cantidad necesaria, luego se vierte el estiércol en el pozo de entrada mientras se agrega el agua. Esta mezcla ingresa al biodigestor por medio de un tubo de PVC que une el pozo y el tanque digestor.

El volumen del pozo de entrada ( $V_{pe}$ ) fue determinado considerando que debe tener la capacidad de almacenar la mitad de la cantidad de estiércol recolectado.

$$V_{pe} [m^3] = \frac{V_e}{2} [m^3] \quad (2.14)$$

La geometría del pozo de entrada fue considerada como un cubo, por lo que sus dimensiones se obtuvieron mediante la raíz cúbica del volumen del pozo, siendo "L" la longitud de cada lado del pozo.

$$L [m] = \sqrt[3]{V_{pe} [m^3]} \quad (2.15)$$

### 2.4.3 Sistema de almacenamiento de biogás

Para obtener el número de moles ( $N_{Biogás}$ ) se relacionó la cantidad de biogás producido en kilogramos con el peso molecular del biogás ( $P_m$ ).

$$N_{Biogás} [mol] = \frac{Biogás [kg]}{P_m \left[ \frac{kg}{kmol} \right]} * 1000 \left[ \frac{mol}{kmol} \right] \quad (2.16)$$

La estimación de la presión interna del biodigestor ( $P_{biogás}$ ) se realizó la asunción de que el biogás es un gas ideal, por lo que se utilizó la ecuación de gas ideal.

$$P_{biogás} [Pa] = \frac{R \left[ \frac{J}{K mol} \right] * 1 \left[ \frac{Pa * m^3}{J} \right] * T [K] * N_{Biogás} [mol]}{V_g [m^3]} \quad (2.17)$$

Donde "T" es la temperatura del biogás.

Se tomó la decisión de diseñar la cúpula o domo del biodigestor como una estructura removible con el objetivo de facilitar el mantenimiento del biodigestor. Para el diseño se optó por seleccionar una cúpula de acero inoxidable, por lo cual se requirió realizar el cálculo del espesor mínimo. El factor de seguridad ( $\eta$ ) de una estructura de material dúctil se considera como la relación entre la resistencia a la fluencia ( $S_y$ ) y el esfuerzo al que se encuentra sometido ( $\sigma$ ).

$$\eta = \frac{S_y [MPa]}{\sigma [MPa]} \quad (2.18)$$

El espesor de la estructura esférica ( $t$ ) fue estimado mediante la relación entre la presión ( $P$ ), el radio esférico ( $r$ ) y el esfuerzo al que se encuentra sometido ( $\sigma$ ). (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2020)

$$t [m] = \frac{P [kPa]r [m]}{2\sigma [MPa] * 1000 \left[ \frac{kPa}{MPa} \right]} \quad (2.19)$$

#### 2.4.4 Sistema de agitación

La agitación del sustrato permite su homogenización y ayuda a mejorar la producción de biogás, por lo que se recomienda que este proceso se realice de forma diaria. (García, Mejía, Murcia, & Prieto, 2011) Se escogió como mejor alternativa el uso y selección de un motorreductor y sistema de aspas para desempeñar dicha función.

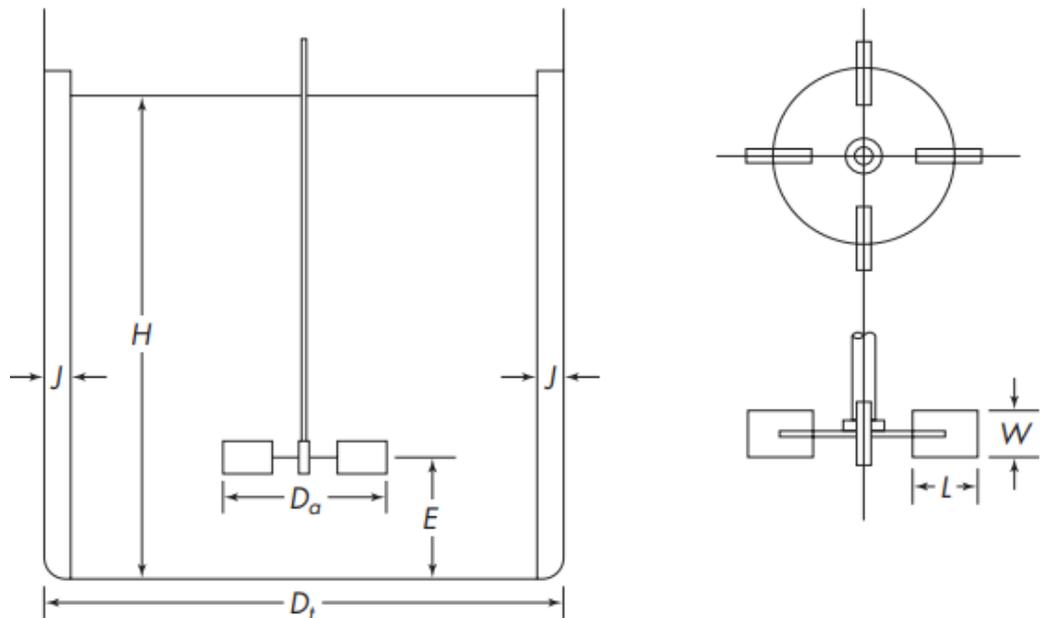


Figura 2.6. Geometría del sistema de agitación. [McCabe, Smith, & Harriott, 2005]

Las proporciones geométricas más comunes entre el tanque y el agitador son: (Geankoplis, Hersel, & Lepek, 2018)

$$\frac{D_a [m]}{D_t [m]} = 0.3 \quad (2.20)$$

$$\frac{W [m]}{D_a [m]} = \frac{1}{5} \quad (2.21)$$

$$\frac{L [m]}{D_a [m]} = \frac{1}{4} \quad (2.22)$$

$$\frac{J [m]}{D_t [m]} = \frac{1}{12} \quad (2.23)$$

$$\frac{H [m]}{D_t [m]} = 1 \quad (2.24)$$

$$\frac{E [m]}{D_t [m]} = \frac{1}{3} \quad (2.25)$$

Para obtener la velocidad crítica del sistema de agitación aplicado a un fluido con suspensión de sólidos se utilizó la siguiente ecuación:

$$n_c D_a^{0.85} = S v^{0.1} D_p^{0.2} \left( g \frac{\Delta \rho}{\rho} \right)^{0.45} B^{0.13} \quad (2.26)$$

Donde:

- $n_c$  Es la velocidad crítica en [rad/s]
- $D_a$  Es el diámetro del agitador en [m].
- $S$  Es el factor de forma.
- $v$  Es la viscosidad dinámica del fluido en [m<sup>2</sup>/s]
- $D_p$  Es el diámetro medio de partícula en [m].
- $g$  Es la aceleración de la gravedad en [m/s<sup>2</sup>].
- $\Delta \rho$  Es la diferencia de la densidad en [kg/m<sup>3</sup>].
- $\rho$  Es la densidad del líquido en [kg/m<sup>3</sup>].
- $B$  Es la relación entre la masa del sólido y la masa del líquido.

**Tabla 2.3. Factor S para la velocidad crítica. [McCabe, Smith, & Harriott, 2005]**

Tipo de impulsor	S
Turbina de seis palas	4.1
$\frac{D_a}{W} = 5$	7.5
$N_p = 6.2$	11.5
Paleta de dos palas	4.8
$\frac{D_a}{W} = 4$	8
$N_p = 2.5$	12.5

Hélice (propulsor de tres palas)	6.5
$N_p = 0.5$	8.5
	9.5

El número de Reynolds fue calculado considerando la viscosidad del agua ( $\mu$ ), la densidad del agua ( $\rho$ ), la velocidad de agitación ( $n$ ) y el diámetro del agitador ( $D_a$ ) mediante la siguiente ecuación.

$$Re = \frac{(D_a [m])^2 * n \left[ \frac{rad}{s} \right] * \rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]}{\mu \left[ \frac{Ns}{m^2} \right]} \quad (2.27)$$

Para un valor de Reynolds menor a 1000 (flujo laminar), el valor del factor de potencia ( $N_p$ ) es la relación entre la constante  $K_L$  y Reynolds.

$$N_p = \frac{K_L}{Re} \quad (2.28)$$

Para valores de Reynolds superiores a 10000 (flujo turbulento), el valor de  $N_p$  es igual al valor de la constante  $K_T$ .

$$N_p = K_T \quad (2.29)$$

Los valores de  $S$ ,  $K_L$  y  $K_T$  fueron obtenidos de acuerdo con el tipo de agitador seleccionado.

**Tabla 2.4. Valores de las constantes  $K_L$  y  $K_T$ . [McCabe, Smith, & Harriott, 2005]**

Tipo de impulsor	$K_L$	$K_T$
Impulsor hélice, tres palas		
Paso 1.0	41	0.32
Paso 1.5	48	0.87
Turbina		
Disco de seis palas	65	5.75
Seis palas inclinadas	-	1.63
Cuatro palas inclinadas	44.5	1.27
Paleta plana, dos palas	36.5	1.70
Impulsor HE-3	43	0.28
Cinta helicoidal	52	-
Ancla	300	0.35

La potencia de agitación fue obtenida mediante la siguiente ecuación.

$$P [W] = N_p \rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \left( n \left[ \frac{rad}{s} \right] \right)^3 (D_a [m])^5 \quad (2.30)$$

La potencia real de agitación fue obtenida por medio de la estimación de la eficiencia para el sistema de agitación ( $\eta_s$ ).

$$P_R [W] = \frac{P [W]}{\eta_s} \quad (2.31)$$

#### 2.4.5 Sistema de extracción de biogás

La extracción del biogás se realizará por medio de una tubería de PVC y manguera, instalada en el centro de la cúpula, esto se debe a que el biogás tiene un título de saturación de 100% y contiene sulfuro (Guaman Prado & Salazar Quishpe, 2013) por consiguiente, ninguna tubería, accesorios o válvulas que contengan metales ferrosos pueden ser utilizados para evitar daños, se conducirá el biogás almacenado en la cámara de biodigestión al lugar de consumo, y deberá tener acoplada una llave de paso, que permitirá regular la salida del biogás.

La presión necesaria para que el biogás pueda recorrer desde el biodigestor hasta su punto de aplicación fue estimada mediante la ecuación de Renouard para media presión (presiones entre 0.05 y 5 bar). (López Sopena, 2001)

$$P_A [bar] = \sqrt{\frac{51.5d_c \left(Q \left[\frac{m^3}{h}\right]\right)^{1.82} L_c [m]}{(D [mm])^{4.82}} + (P_B [bar])^2} \quad (2.32)$$

Donde:

- $P_A$  Es la presión absoluta dentro del biodigestor.
- $P_B$  Es la presión ambiental.
- $d_c$  Es la densidad corregida del biogás.
- $L_c$  Es la longitud de cálculo.
- $Q$  Es el flujo volumétrico del gas.
- $D$  Es el diámetro interior de la tubería.

#### 2.4.6 Sistema de descarga

La descarga del sistema se realiza por medio del desplazamiento del biol, este proceso inicia al momento de ingresar la nueva carga de sustrato, empujando el biol que se encuentra en el interior del biodigestor hacia el pozo de salida, en donde se realiza la extracción del biol de forma manual.

#### 2.4.7 Válvula de seguridad

La válvula de seguridad o válvula de alivio de presión evita que el nivel de presión llegue a valores muy elevados, llegándose a destruir el biodigestor, su misión es evitar la explosión del sistema, de un equipo o tuberías, por un exceso de presión, permitiendo al gas escaparse al aire, cuando ésta supera un límite preestablecido, denominada presión de trabajo. (Salazar Abad & Arias Bonilla, 2016)

#### 2.4.8 Trampa de agua

El gas es extraído del biodigestor lleno de vapor de agua, durante las horas de sol, se enfría y el vapor se condensa en agua líquida, la trampa de agua es un mecanismo que tiene como función evacuar el agua acumulada sin permitir el escape de gas, evitando posibles obstrucciones al paso de este, de esta manera el agua condensada recorre la tubería hasta la trampa de

agua, donde es expulsada al exterior. (Guaman Prado & Salazar Quishpe, 2013)

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Producción estimada de biogás y biol

Se conoce que el rancho posee entre 10 a 15 vacas.

$$N^{\circ} \text{ vacas}_{max} = 15 \text{ vacas}$$

$$N^{\circ} \text{ vacas}_{min} = 10 \text{ vacas}$$

Producción diaria de estiércol de una sola vaca:

$$PEV \left[ \frac{kg}{día} \right] = \frac{7.5 \left[ \frac{kg}{día} \right] + 7.5 \left[ \frac{kg}{día} \right] + 7.5 \left[ \frac{kg}{día} \right] + 10 \left[ \frac{kg}{día} \right] + 10.67 \left[ \frac{kg}{día} \right] + 4.42 \left[ \frac{kg}{día} \right]}{6}$$
$$PEV = 7.9 \left[ \frac{kg}{día} \right]$$

Producción diaria de estiércol considerando todas las vacas:

$$kg \text{ estiércol}_{min} = 7.9 \left[ \frac{kg}{día} \right] * 10 \text{ vacas} = 79 \left[ \frac{kg}{día} \right]$$

$$kg \text{ estiércol}_{max} = 7.9 \left[ \frac{kg}{día} \right] * 15 \text{ vacas} = 118.5 \left[ \frac{kg}{día} \right]$$

Cantidad de estiércol recolectado:

$$kg \text{ real estiércol}_{min} = 79 \left[ \frac{kg}{día} \right] * 50\% = 39.5 \left[ \frac{kg}{día} \right]$$

$$kg \text{ real estiércol}_{max} = 118.5 \left[ \frac{kg}{día} \right] * 50\% = 59.25 \left[ \frac{kg}{día} \right]$$

TRH estimado:

$$TRH = \frac{49 [días] + 38 [días] + 50 [días] + 50 [días] + 28 [días] + 40 [días]}{6}$$

$$TRH = 43 \text{ [días]}$$

Cantidad total de estiércol recolectado:

$$kg \text{ total estiércol}_{min} = 39.5 \left[ \frac{kg}{día} \right] * 43 \text{ [días]} = 1705 [kg]$$

$$kg \text{ total estiércol}_{max} = 59.25 \left[ \frac{kg}{día} \right] * 43 \text{ [días]} = 2558 [kg]$$

La densidad del estiércol es de 1 [kg/L], es decir, que un kilogramo de estiércol ocupa un volumen de un litro. (FAO, 2011) Por lo tanto, el volumen de estiércol recolectado se estimó con un valor de:

$$Ve_{min} = \frac{1705 [kg]}{1 \left[ \frac{kg}{L} \right] * 1000 \left[ \frac{L}{m^3} \right]} = 1.7 [m^3]$$

$$Ve_{max} = \frac{2558 [kg]}{1 \left[ \frac{kg}{L} \right] * 1000 \left[ \frac{L}{m^3} \right]} = 2.5 [m^3]$$

Cantidad de agua necesaria para mezclar con el estiércol:

$$Va_{min} = 1.7 [m^3] * 2 = 3.4 [m^3]$$

$$Va_{max} = 2.5 [m^3] * 2 = 5.1 [m^3]$$

Volumen total de sustrato:

$$Sustrato_{min} = 1.7 [m^3] + 3.4 [m^3] = 5.1 [m^3]$$

$$Sustrato_{max} = 2.5 [m^3] + 5.1 [m^3] = 7.6 [m^3]$$

La estimación de la producción de biogás por cada kilogramo de estiércol fue de:

$$BE = \frac{1.8 \times 10^{-6} \left[ \frac{m^3}{kg} \right] + 2.8 \times 10^{-6} \left[ \frac{m^3}{kg} \right] + 0.00072 \left[ \frac{m^3}{kg} \right] + 0.032 \left[ \frac{m^3}{kg} \right] + 0.026 \left[ \frac{m^3}{kg} \right] + 0.039 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]}{6}$$

$$BE = 0.016 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

Producción total de biogás:

$$Biogás_{min} = 1705 \left[ \frac{kg}{día} \right] * 0.016 \left[ \frac{m^3}{kg} \right] = 27.7 [m^3]$$

$$Biogás_{max} = 2558 \left[ \frac{kg}{día} \right] * 0.016 \left[ \frac{m^3}{kg} \right] = 41.6 [m^3]$$

Cantidad de sustrato en kg:

$$Sustrato_{min} = 1000 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] * 5.1 [m^3] = 5115 [kg]$$

$$Sustrato_{max} = 1000 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] * 7.6 [m^3] = 7673 [kg]$$

Para calcular la cantidad de biogás en kg se consideró una densidad de 1.2 [kg/m<sup>3</sup>].  
(FAO, 2011)

$$Biogás_{min} = 1.2 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] * 27.7 [m^3] = 33.33 [kg]$$

$$Biogás_{max} = 1.2 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] * 41.6 [m^3] = 50 [kg]$$

Cantidad de biofertilizante en kg:

$$Biofertilizante_{min} = 5115 [kg] - 33.88 [kg] = 5082 [kg]$$

$$Biofertilizante_{max} = 7673 [kg] - 50.82 [kg] = 7623 [kg]$$

Cantidad estimada de biol:

$$Biol_{min} = \frac{5082 [kg]}{1000 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]} * 90\% = 4.57 [m^3]$$

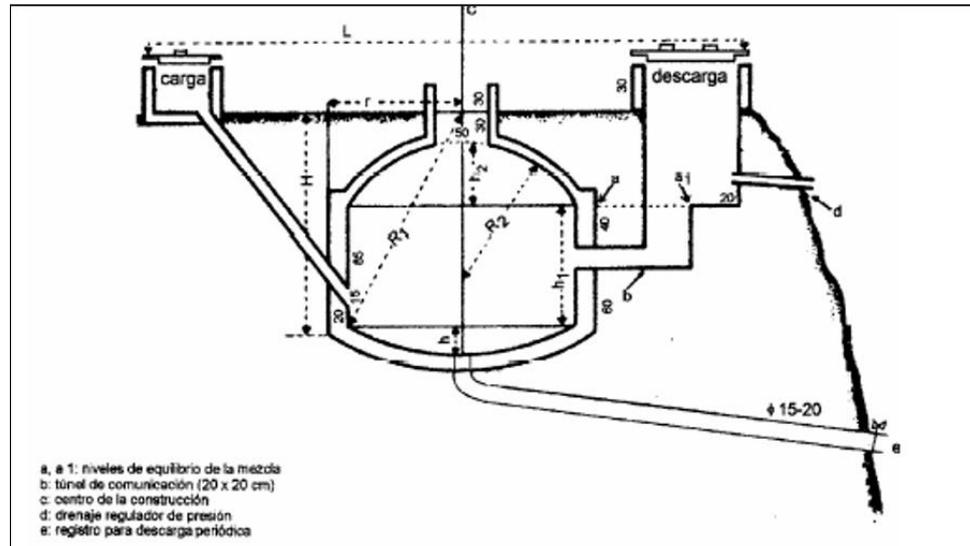
$$Biol_{max} = \frac{7623 [kg]}{1000 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]} * 90\% = 6.86 [m^3]$$

### 3.2 Diseño del biodigestor

El volumen máximo de carga es de  $7.6 [m^3]$ , no obstante, para realizar el diseño del biodigestor, se consideró que el volumen máximo de sustrato es de  $14.51 [m^3]$ , esto para evitar inconvenientes, en caso de que el usuario adquiera más vacas, y la producción de estiércol aumente. Las medidas generales del biodigestor fueron obtenidas de la tabla 3.1, cabe recalcar que, al ser medidas referenciales, pueden estar sujetas a cambios.

**Tabla 3.1. Medidas para dimensionar el biodigestor. [Groppelli & Giampaoli, 2001]**

Volumen $m^3$		Medidas en cm							
Total	Carga	L	r	H	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	h	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>
7.60	6.14	660	120	220	255	150	30	120	60
9.84	7.78	680	130	230	266	160	32	130	70
12.46	9.72	700	140	240	296	170	35	140	80
14.80	11.23	720	150	250	321	180	37	150	90
19.01	14.51	740	160	260	346	190	40	160	100



**Figura 3.1. Dimensiones referenciales de un biodigestor. [Groppelli & Giampaoli, 2001]**

Es decir, el volumen total del biodigestor es de  $19.01 m^3$ . Por lo tanto, para obtener el volumen mínimo de almacenamiento de biogás se debe restar el volumen máximo del sustrato del volumen total del biodigestor. Por otro lado, para obtener

el volumen máximo de almacenamiento de biogás se debe restar el volumen mínimo del sustrato.

$$V_{g_{min}} = 19.01 [m^3] - 5.1 [m^3] = 11.41 [m^3]$$

$$V_{g_{max}} = 19.01 [m^3] - 7.6 [m^3] = 13.91 [m^3]$$

### 3.2.1 Sistema de carga

Volumen del pozo de entrada:

$$V_{pe} = \frac{2.5 [m^3]}{2} = 1.25 [m^3]$$

La longitud del pozo de entrada es:

$$L = \sqrt[3]{1.25 [m^3]} = 1.08 [m]$$

### 3.2.2 Sistema de almacenamiento de biogás

Para estimar el peso molecular se consideró la producción de biogás de baja calidad, es decir, con una concentración del 40% de metano y 60% de CO<sub>2</sub>. (Vitázek, Klůčik, Uhrinová, Mikulová, & Mojžiš, 2017)

$$P_m = 0.4 * 16.04 \left[ \frac{kg}{kmol} \right] + 0.6 * 44.01 \left[ \frac{kg}{kmol} \right] = 32.82 \left[ \frac{kg}{kmol} \right]$$

El número de moles del biogás fue de:

$$N_{Biogás}(min) = \frac{33.33 [kg]}{32.82 \left[ \frac{kg}{kmol} \right]} * 1000 \left[ \frac{mol}{kmol} \right] = 1015 [mol]$$

$$N_{Biogás}(max) = \frac{50 [kg]}{32.82 \left[ \frac{kg}{kmol} \right]} * 1000 \left[ \frac{mol}{kmol} \right] = 1523 [mol]$$

Para el cálculo de la presión ejercida por el biogás se definió la temperatura mínima como la temperatura más baja en la ciudad de Balzar, Guayas donde se encuentra el rancho, es decir, 21 [°C] y temperatura máxima de

33 [°C]. (Whitelightskyes, 2022) Por último, la constante de los gases ideales es definida como 8.314 [J/k mol].

$$P_{biogás}(\min) = \frac{8.314 \left[ \frac{J}{K \text{ mol}} \right] * 1 \left[ \frac{Pa * m^3}{J} \right] * (21 + 273.15) [K] * 1015 [mol]}{13.91 [m^3] * 1000}$$

$$P_{biogás}(\min) = 178.7 [kPa]$$

$$P_{biogás}(\max) = \frac{8.314 \left[ \frac{J}{K \text{ mol}} \right] * 1 \left[ \frac{Pa * m^3}{J} \right] * (33 + 273.15) [K] * 1523 [mol]}{11.41 [m^3]}$$

$$P_{biogás}(\max) = 342 [kPa]$$

La cúpula del biodigestor fue diseñada de tal forma que pueda ser desmontada del tanque digestor, esto se realizó con el objetivo de simplificar el mantenimiento del biodigestor. El material escogido para la cúpula fue de acero inoxidable AISI 304, el cual posee una resistencia a la fluencia de 176.58 [MPa]. (DIPAC Manta S.A., 2021) El factor de seguridad asumido fue de 2.5.

$$\sigma = \frac{176.58 [MPa]}{2.5} = 70.6 [MPa]$$

El espesor de la cúpula fue determinado con la presión máxima calculada para asegurar su correcto funcionamiento en el caso más crítico. El radio de la cúpula es de 1.9 [m].

$$t = \frac{342 [kPa] * 1.9 [m] * 1000 \left[ \frac{mm}{m} \right]}{2 * 70.6 [MPa] * 1000 \left[ \frac{kPa}{MPa} \right]} = 4.6 [mm] \approx 5 [mm]$$

Es necesario recalcar que el espesor de 5 [mm] fue obtenido considerando un porcentaje de recolección de estiércol del 50%, es decir, en el caso que se optimice el proceso de recolección de estiércol y se logre obtener un mayor porcentaje será necesario recalcular el espesor mínimo para la cúpula.

### 3.2.3 Sistema de agitación

Se conoce que el diámetro del tanque digestor es de 3.18 [m]

$$D_t = 3.18 \text{ [m]}$$

Por lo tanto:

$$D_a = 3.18 \text{ [m]} * 0.3 = 0.95 \text{ [m]}$$

$$W = \frac{0.95 \text{ [m]}}{5} = 0.19 \text{ [m]}$$

$$L = \frac{0.95 \text{ [m]}}{4} = 0.24 \text{ [m]}$$

$$J = \frac{3.18 \text{ [m]}}{12} = 0.26 \text{ [m]}$$

$$H = 3.18 \text{ [m]}$$

$$E = \frac{3.18 \text{ [m]}}{3} = 1.06 \text{ [m]}$$

Para la estimación de la velocidad crítica se utilizaron los valores listados a continuación:

Propiedades del agua a 27 [°C]:

$$\rho_{agua} = 996.45 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

$$v_{agua} = 0.000000862 \left[ \frac{m^2}{s} \right]$$

$$\mu_{agua} = 0.00085885 \left[ \frac{Ns}{m^2} \right]$$

Propiedades del estiércol:

$$\rho_{estiércol} = 1000 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

$$D_p = 0.0005 \text{ [m]}$$

Relación entre la masa de la biomasa y la masa del agua:

$$B = 100 * \frac{2558 [kg]}{5.1 [m^3] * 996.45 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]}$$

$$B = 50.2$$

Tomando en cuenta la tabla 2.3 del capítulo anterior, el factor de forma S para un sistema de agitación con relación  $Da/W=5$  es de 7.5.

$$S = 7.5$$

Velocidad crítica:

$$n_c = \frac{(7.5) \left( 0.000000862 \left[ \frac{m^2}{s} \right] \right)^{0.1} (0.0005 [m])^{0.85} \left( 9.81 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \frac{3.55 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]}{996.45 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]} \right)^{0.45} 50.2^{0.13}}{(0.95 [m])^{0.85}}$$

$$n_c = 0.15 \left[ \frac{rad}{s} \right]$$

Se escogió que la velocidad del agitador sea de 10 [rpm] (1 [rad/s]), debido a que el valor obtenido en la velocidad crítica es muy bajo, a causa de consideraciones que están fuera del caso de estudio.

$$Re = \frac{(0.95 [m])^2 * 1 \left[ \frac{rad}{s} \right] * 996.45 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]}{0.00085885 \left[ \frac{Ns}{m^2} \right]} = 1107234$$

Cómo el número de Reynolds es superior a 10000, entonces el factor de potencia  $N_p$  es igual a la constante  $K_T$ . En base a la tabla 2.4 ubicada en el capítulo anterior, se obtuvo el valor de la constante  $K_T$  para una turbina de 4 palas inclinadas.

$$N_p = K_T = 1.27$$

La potencia de agitación:

$$P = 1.27 * 996.45 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] * \left( 1 \left[ \frac{rad}{s} \right] \right)^3 (0.95 [m])^5 = 1152 [W]$$

Se asume un 80% de eficiencia para el sistema de agitación

$$P_R = \frac{1152 [W]}{0.8} = 1440 [W] * 0.00134102 \left[ \frac{HP}{W} \right] = 1.9 [HP]$$

Por lo tanto, se seleccionó un motor de 2 HP para el sistema de agitación.

### 3.2.4 Sistema de extracción de biogás

La densidad corregida del biogás es de 0.83. (Arrieta Palacios, 2016) La presión ambiental en la ciudad Balzar es de 1.01058 [bar]. (Whitelightskyes, 2022) El consumo de biogás en una cocina de dos hornillas se encuentra dentro del rango entre 0.2 [m<sup>3</sup>/h] a 0.42 [m<sup>3</sup>/h]. (FAO, 2011) Para el flujo volumétrico del biogás se utilizó el valor medio del rango de consumo, el cual es 0.31 [m<sup>3</sup>/h]. La tubería seleccionada para el transporte de biogás es de PVC de ¾" célula 80. El diámetro interno de la tubería es de 22.8 [mm]. La distancia que debe recorrer el biogás hasta llegar a su punto de aplicación es de 20 [m].

$$P_A = \sqrt{\frac{51.5(0.83) \left( 0.31 \left[ \frac{m^3}{h} \right] \right)^{1.82} (20 [m])}{(22.8 [mm])^{4.82}} + (1.01058 [bar])^2}$$

$$P_A = 1.0106 [bar] * 100 \frac{[kPa]}{[bar]} = 101.06 [kPa]$$

### 3.3 Fichas técnicas de las partes del biodigestor.

#### 3.3.1 Sistema de extracción de biogás.

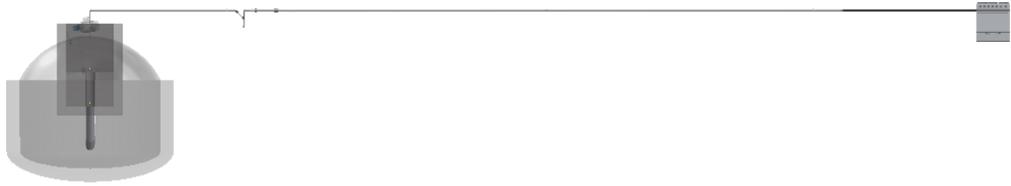


Figura 3.2. Sistema de extracción de biogás. [Elaboración propia]

Tabla 3.2. Ficha técnica para el sistema de extracción de biogás.

[Elaboración propia]

CANTIDAD	COMPONENTES	CARACTERÍSTICAS
3	Tubería PVC	Ø <sup>3</sup> / <sub>4</sub> " x 6 m
4	Válvula de bola	Ø <sup>3</sup> / <sub>4</sub> "
1	Codo	90° x Ø <sup>3</sup> / <sub>4</sub> "
2	Acople	Ø <sup>3</sup> / <sub>4</sub> "
1	Acople Tubería-Manguera	Ø <sup>3</sup> / <sub>4</sub> "
1	Manguera para gas	Ø <sup>3</sup> / <sub>4</sub> "

#### 3.3.2 Filtro de ácido sulfhídrico



Figura 3.3. Filtro de ácido sulfhídrico. [Elaboración propia]

Tabla 3.3. Ficha técnica para el filtro de ácido sulfhídrico. [Elaboración

propia]

CANTIDAD	COMPONENTES	CARACTERÍSTICAS
1	Tubería PVC	Ø2" x 40 cm
2	Reductor tipo acople	2" a <sup>3</sup> / <sub>4</sub> "
2	Acoples	Ø2"
1 libra	Virutas de hierro	-

### 3.3.3 Trampa de agua

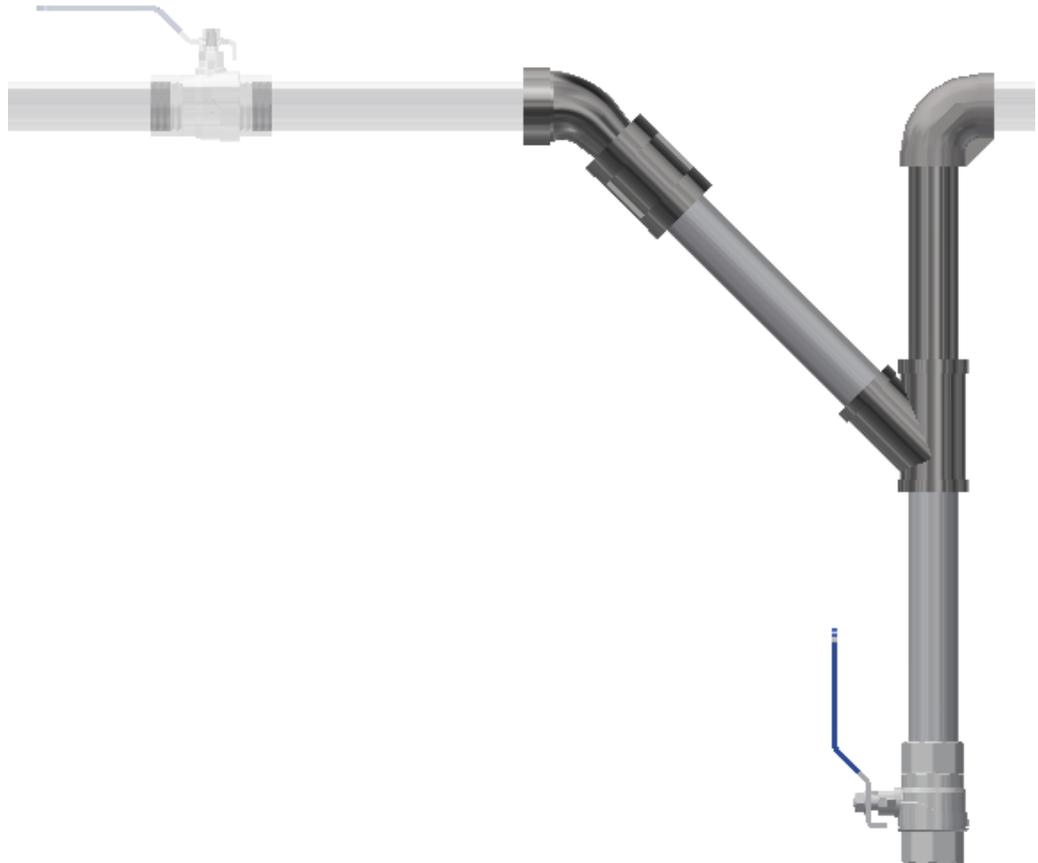


Figura 3.4. Trampa de agua. [Elaboración propia]

Tabla 3.4. Ficha técnica para la trampa de agua. [Elaboración propia]

CANTIDAD	COMPONENTES	CARACTERÍSTICAS
1	Codo	45° x Ø <sup>3/4</sup> "
1	Codo	90° x Ø <sup>3/4</sup> "
1	Tubería PVC	Ø <sup>3/4</sup> " x 6"
2	Tubería PVC	Ø <sup>3/4</sup> " x 12.2 cm
1	Tubería en Y	Ø <sup>3/4</sup> "
1	Válvula de bola	Ø <sup>3/4</sup> "

### 3.3.4 Válvula de alivio de presión

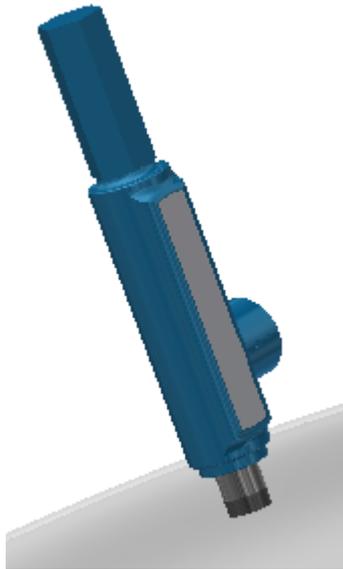


Figura 3.5. Válvula de alivio de presión. [Elaboración propia]

Tabla 3.5. Ficha técnica para la válvula de alivio de presión. [Elaboración propia]

UNIDADES	COMPONENTES	CARACTERÍSTICAS
1	Válvula de alivio de presión 50 psi	$\text{Ø}3/4''$
1	Tubería PVC	$\text{Ø}3/4'' \times 1.5''$

### 3.3.5 Sistema de agitación

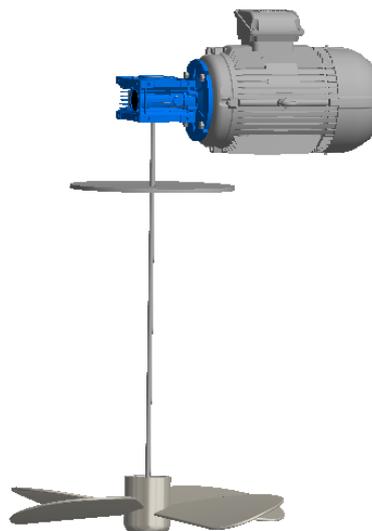
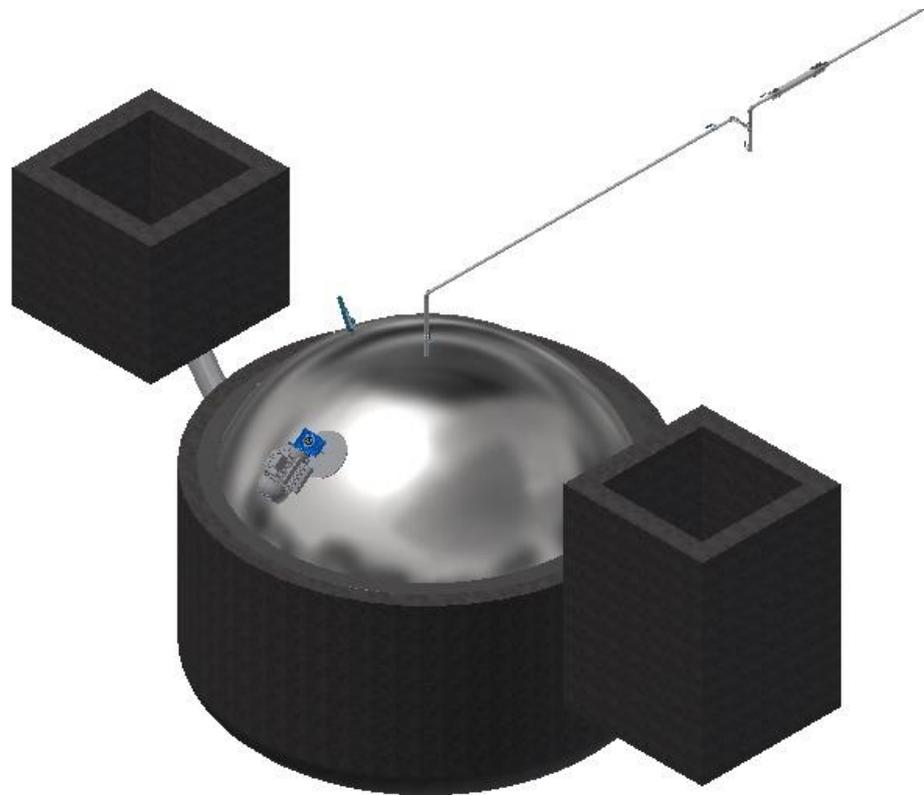


Figura 3.6. Sistema de agitación. [Elaboración propia]

**Tabla 3.6. Ficha técnica para el sistema de agitación. [Elaboración propia]**

CANTIDAD	COMPONENTES	CARACTERÍSTICAS
1	Motor	5 HP 900 rpm
1	Reductor	90:1
1	Eje	Ø12 mm x 2 m
1	Hélice	Ø800 mm
1	Platina	Ø400 mm
1	Acople	Ø12 mm

### 3.3.6 Estructura del biodigestor



**Figura 3.7. Estructura del biodigestor. [Elaboración propia]**

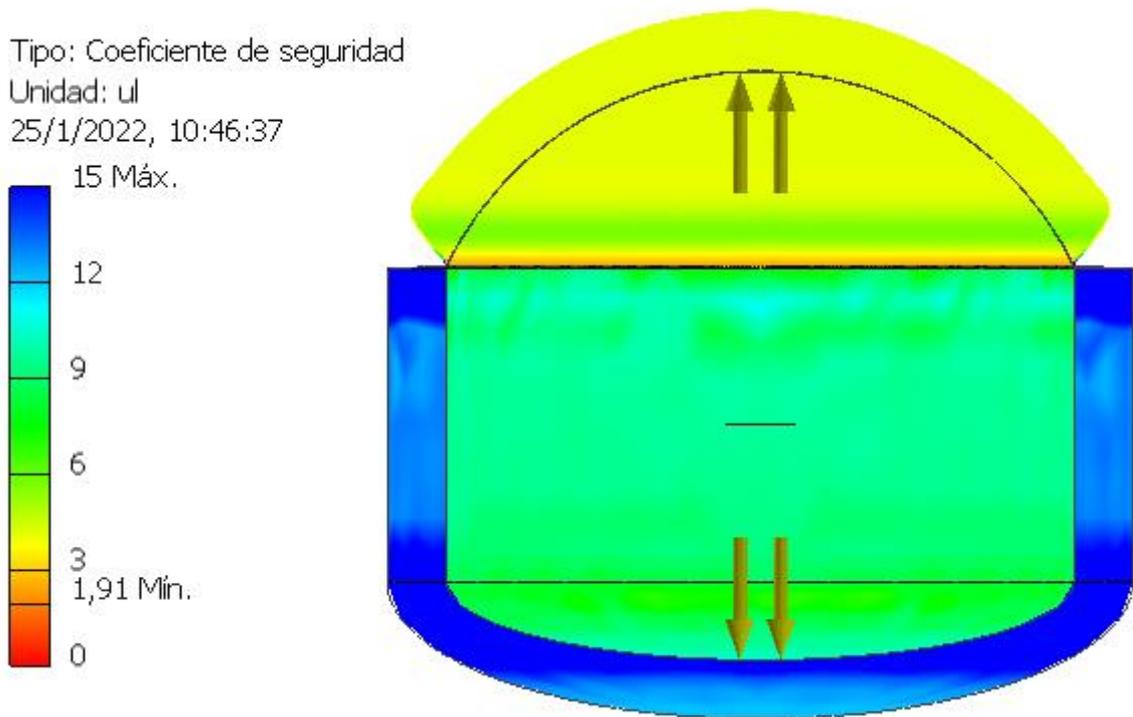
**Tabla 3.7. Ficha técnica para la estructura del biodigestor. [Elaboración propia]**

CANTIDAD	COMPONENTES	CARACTERÍSTICAS
1	Cúpula de acero inoxidable 304	$\varnothing_{ext}$ 3.184 m x 5 mm
1	Tanque de concreto	$\varnothing_{ext}$ 3.38 m x 3.6 m x 200 mm
20	Pernos autoperforantes	M5.5 x 70 mm
20	Arandelas	-
1	Tubería PVC	$\varnothing$ 8" x 2.1 m
1	Tubería PVC	$\varnothing$ 8" x 1.8 m
1	Tanque de concreto	1485 mm x 1485 mm x 1485 mm 200 mm de espesor
1	Tanque de concreto	1485 mm x 1485 mm x 2285 mm 200 mm de espesor

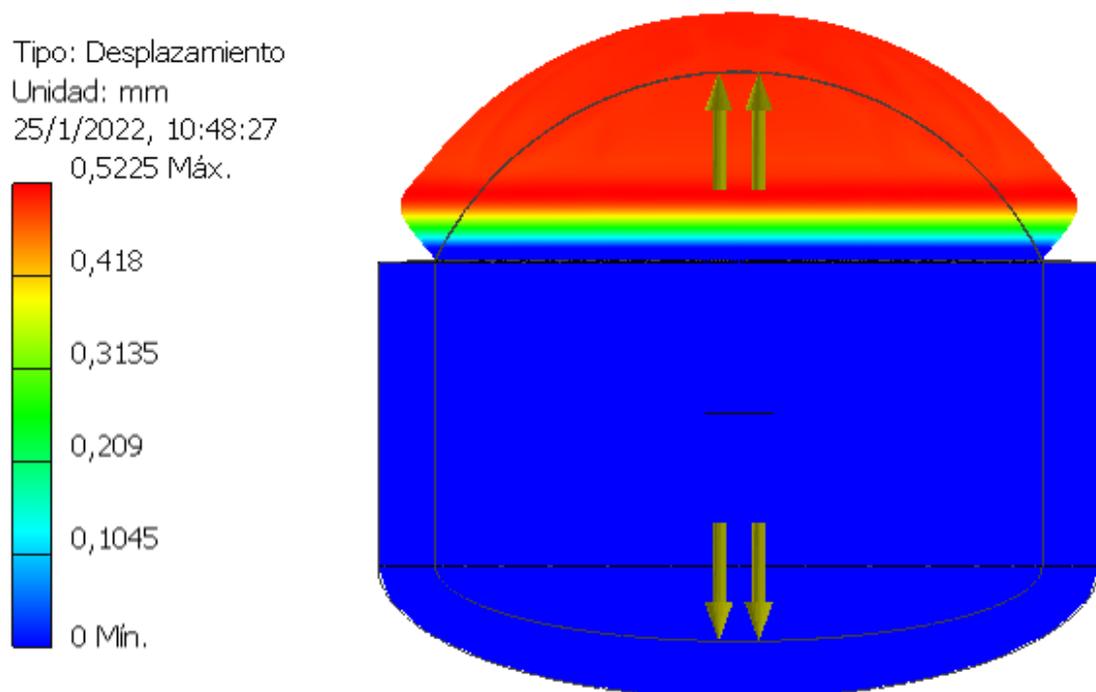
### 3.4 Simulación de la presión interna en la estructura del biodigestor

La simulación permite conocer si la estructura del biodigestor podría fallar debido a la presión interna a la que está sometida. En la figura 16 se puede observar que el coeficiente de seguridad mínimo es de 1.91, por lo tanto, se concluye que la estructura puede soportar los esfuerzos a los que se encuentra sometida debido a la presión.

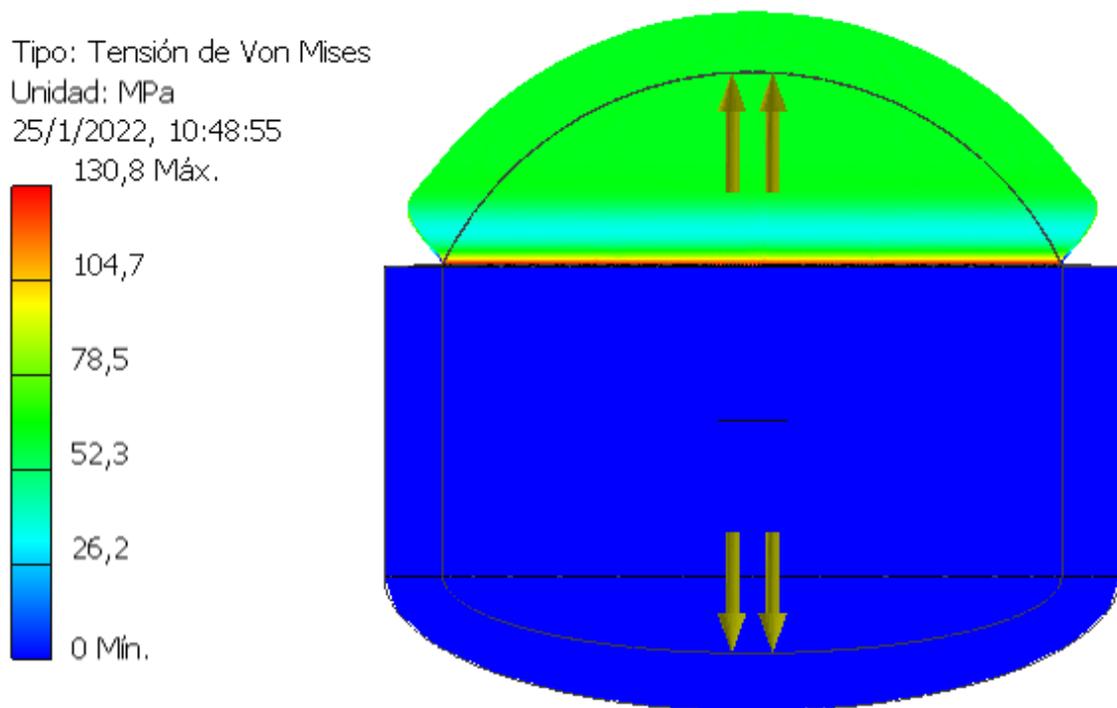
La figura 18 muestra los esfuerzos distribuidos por toda la estructura del biodigestor, se puede apreciar que los esfuerzos máximos se producen en el cambio de sección de la cúpula.



**Figura 3.8. Distribución del coeficiente de seguridad en el biodigestor. [Elaboración propia]**



**Figura 3.9. Distribución de desplazamiento en la estructura del biodigestor. [Elaboración propia]**



**Figura 3.10. Distribución de los esfuerzos de Von Mises en el biodigestor.**  
**[Elaboración propia]**

### 3.5 Análisis de costo y factibilidad financiera.

Se calculó los ingresos y los egresos, para finalmente obtener los beneficios netos.

#### 3.5.1 Egresos

Están determinados por la inversión total para la construcción del biodigestor, esto implica, costos de materiales, de mano de obra y de mantenimiento para un periodo de vida de 20 años.

**Tabla 3.8. Presupuesto total. [Elaboración propia]**

Detalles	Cantidad	Unidad	Valor unitario	Total
Cemento Rocafuerte	40	Quintal	\$ 7.71	\$ 308.40
Malla electrosoldada de 10x10	1	-	\$ 120.00	\$ 120.00
Material pétreo (arena fina)	4		\$ 20.00	\$ 80.00
Material pétreo (ripio)	1		\$ 15.00	\$ 15.00
Hiero 8mm	1	Quintal	\$ 36.50	\$ 36.50
Tablas	25	-	\$ 4.00	\$ 100.00
Triplex de 0.5 mm	2	-	\$ 13.00	\$ 26.00
Clavos de 2 1/2 pulgada	2	Libra	\$ 0.52	\$ 1.04
Clavos de 2 pulgadas	1	Libra	\$ 0.52	\$ 0.52
Clavos de 3 pulgadas	2	Libra	\$ 0.53	\$ 1.06
Alambre de amarre blanco	2	Libra	\$ 0.68	\$ 1.36
Tubo PVC Ø¾"	3	-	\$ 15.00	\$ 45.00
Acople tubería-manguera Ø¾"	1	-	\$ 2.00	\$ 2.00
Acoples	5	-	\$ 2.00	\$ 10.00
Válvula de bola Ø¾"	5	-	\$ 4.00	\$ 20.00
Manguera para gas Ø¾"	1	-	\$ 1.00	\$ 1.00
Codo 90° x Ø¾"	3	-	\$ 1.00	\$ 3.00
Motor 5 HP 900 rpm	1	-	\$ 535.00	\$ 535.00
Teflón	1	M	\$ 1.00	\$ 1.00
Válvula de alivio de presión 50 psi	1	-	\$ 30.00	\$ 30.00
Eje Ø12 mm x 2 m	1	-	\$ 20.00	\$ 20.00
Hélice acero inoxidable	1	-	\$ 120.00	\$ 120.00
Reductor 90:1	1	-	\$ 400.00	\$ 400.00
Platina	1	-	\$ 5.00	\$ 5.00
Virutas de hierro	1	-	\$ 1.00	\$ 1.00
Reductor tipo acople 2" a ¾"	2	-	\$ 3.00	\$ 6.00
Tubería PVC Ø2"	1	-	\$ 20.00	\$ 20.00
Codo 45° x Ø¾"	1	-	\$ 1.00	\$ 1.00
Tubería en Y Ø¾"	1	-	\$ 10.00	\$ 10.00
Planchas de acero inoxidable	6	-	\$ 1,027.04	\$ 6,162.24
Mecanizado de planchas de acero	1	-	\$ 400.00	\$ 400.00
Pernos autoperforantes	20	-	\$ 5.00	\$ 100.00
Arandelas	20	-	\$ 4.00	\$ 80.00
Tubo PVC Ø8'	1	-	\$ 82.30	\$ 82.30
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 8,744.42</b>

**Tabla 3.9. Costo de mano de obra. [Elaboración propia]**

Detalles	Cantidad	Unidad	Valor unitario/día	Días	Valor total
Limpieza y excavación del área.	4	Jornal Obrero	\$15.00	5	\$300.00
Encofrado y fundido de tanque del biodigestor.	4	Jornal Obrero	\$15.00	5	\$ 300.00
	2	Jornal Albañil	\$25.00	5	\$250.00
Construcción de la caja de entrada y salida del biodigestor.	1	Jornal obrero	\$15.00	2	\$15.00
	1	Jornal Albañil	\$25.00	2	\$25.00
Instalación del biodigestor	1	Jornal obrero	\$15.00	2	\$15.00
TOTAL					\$905.00

### 3.5.2 Ingresos

Los ingresos están determinados, por la cantidad de dinero que se deja de gastar en la compra de GLP, y los ingresos obtenidos por el biol, una vez descontados los gastos de compra de tanques y transporte para la comercialización de este.

Para realizar la evaluación económica se optó por una tasa de interés del 12% con relación al mercado.

**Tabla 3.10. Rentabilidad del proyecto. [Elaboración propia]**

<b>VNA</b>	\$9.307,84
<b>TIR</b>	31%

Se observa que se obtuvo un valor actual neto de \$9.307,84 con una TIR de 31%, por lo que el proyecto es rentable, debido a que el VAR es positivo, y la TIR mayor a la tasa de descuento.

### 3.6 Gráficas dependientes del porcentaje de recolección de estiércol

En vista que la recolección de estiércol puede variar dependiendo de las condiciones del terreno, la dispersión de las vacas y del método utilizado, hemos decidido realizar diferentes gráficas que muestren el comportamiento de las

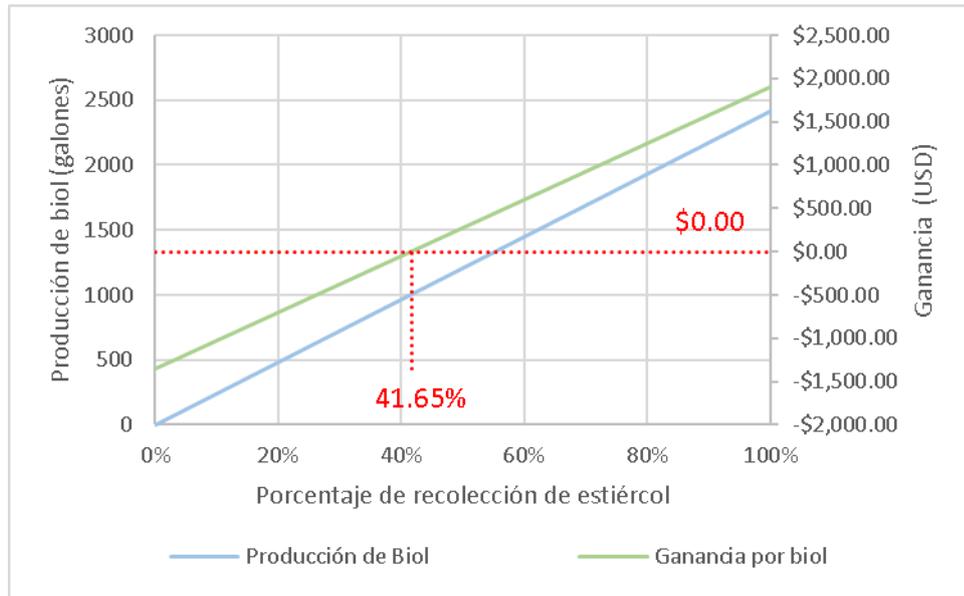
distintas variables que dependen del porcentaje de recolección de estiércol. Las condiciones más críticas se encuentran a continuación, sin embargo, en la sección anexos están ubicadas las gráficas restantes. Todas las gráficas muestran los resultados considerando un tiempo de 43 días, es decir, el TRH.

Es necesario remarcar que el consumo de tanques de GLP en el rancho es de aproximadamente 2 tanques cada 43 días, en base a esto se procedió a estimar el ahorro que se produce al empezar a consumir biogás en función de cuanto estiércol se recolecta.

Para establecer una equivalencia energética entre el GLP y el biogás, se decidió relacionarlos por medio de sus poderes caloríficos, de este modo se puede obtener una estimación de cuanto biogás se requiere para obtener la misma cantidad de energía que un tanque de GLP. El poder calorífico del GLP es de 10830 [kcal/kg], (Lojagas) Por otro lado, el poder calorífico del biogás con bajo contenido de metano se estima en 4700 [kcal/m<sup>3</sup>]. (Moncayo Romero, 2017)

$$Equivalencia = \frac{4700 \left[ \frac{kcal}{m^3 \text{ Biogás}} \right] * \frac{1}{1.2 \left[ \frac{kg \text{ Biogás}}{m^3 \text{ Biogás}} \right]}}{10830 \left[ \frac{kcal}{kg \text{ GLP}} \right]} = 0.36 \left[ \frac{kg \text{ GLP}}{kg \text{ Biogás}} \right]$$

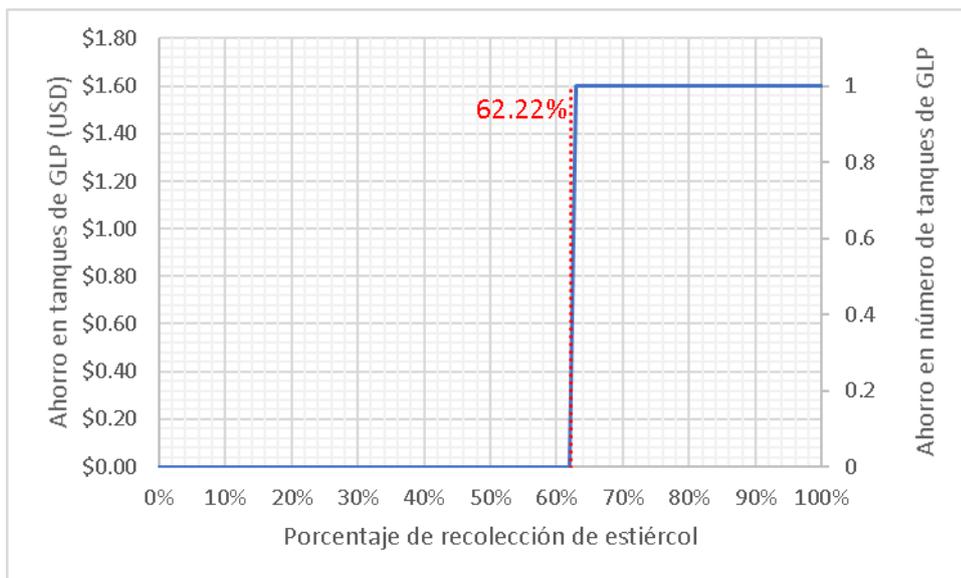
Por lo tanto, se estima que 0.36 [kg] de GLP producen la misma cantidad de energía que 1 [kg] de biogás.



**Figura 3.11. Porcentaje de recolección de estiércol vs Producción de biol y ganancia. Para el caso crítico de análisis (10 vacas). [Elaboración propia]**

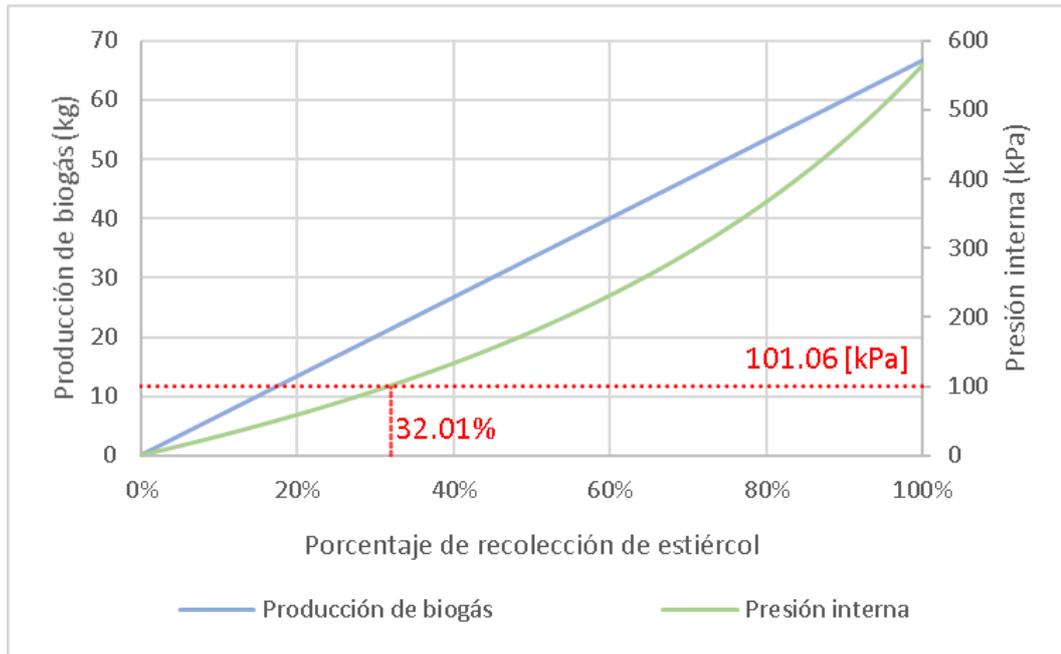
En la Figura 3.11 se puede visualizar que a mayor porcentaje de recolección de estiércol se obtiene una mayor producción de biol y por lo tanto de ganancia. Cabe recalcar que el monto de ganancia que se muestra en la gráfica incluye el costo de transporte y de tanques de almacenamiento de biol. Para el costo de transporte se estimó un recorrido de 150 [km] y un consumo de 35 litros de diésel cada 100 km, (Webfleet Solutions, 2019) siendo el costo del diésel USD \$1.9 por galón, además, se consideró que el biol se almacena en tanques de 55 galones, los cuales tienen un precio de USD \$30.

El valor fijado para la venta del biol fue estimado en USD \$0.50 por cada litro de biol, pero dicho valor puede variar dependiendo del comprador. Tomando en cuenta el precio de venta, se puede analizar que el 41.65% es el porcentaje mínimo necesario de recolección de estiércol para que el cliente recupere la inversión tanto en tanques como en recorrido.



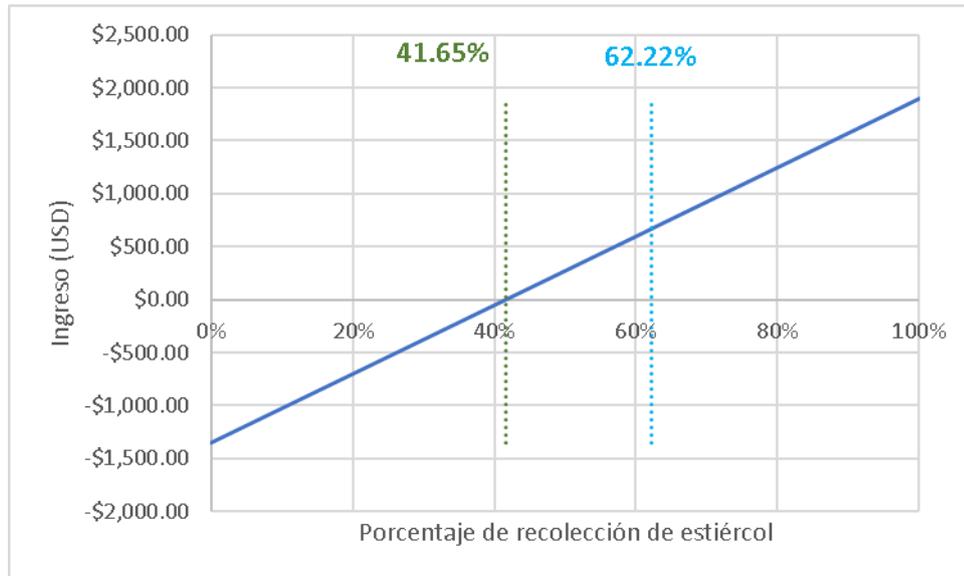
**Figura 3.12. Porcentaje de recolección de estiércol vs Ahorro en tanques de GLP. Para el caso crítico de análisis (10 vacas). [Elaboración propia]**

A la fecha de realización de este proyecto, en Ecuador, el precio del tanque de GLP de 15 [kg] es de USD \$1.60. (La Hora, 2021) En vista de que se busca una aplicación doméstica para el biogás, se requiere conocer cuántos tanques de GLP se pueden ahorrar. En la Figura 3.12 se puede apreciar que para una recolección de estiércol por encima del 62.22% se estima una producción de biogás equivalente a un tanque de GLP, por lo que se considera que existe un ahorro de USD \$1.60.



**Figura 3.13. Porcentaje de recolección de estiércol vs producción de biogás y presión interna. Para el caso crítico de análisis (10 vacas y temperatura de 21 °C). [Elaboración propia]**

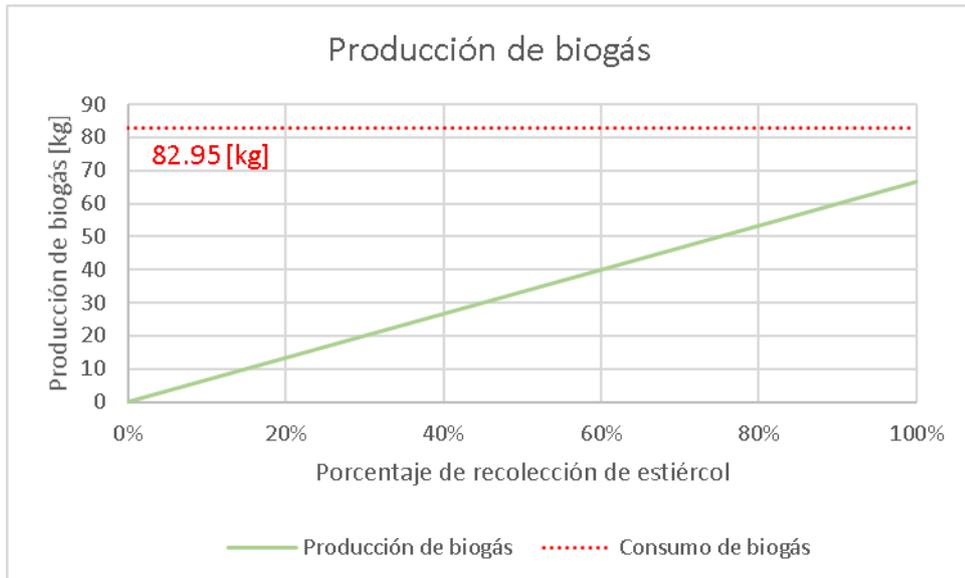
Como se observa en la Figura 3.13, a menor recolección de estiércol se tiene una menor producción de biogás y a su vez un mayor volumen disponible para almacenamiento de este, produciendo una menor presión interna en el biodigestor. También se puede observar que al 32.01% de recolección de estiércol se obtiene la presión mínima para que el biogás llegue a la cocina del cliente a la distancia establecida de 20 [m], estableciendo el límite de recolección que permite la utilización del biogás en un periodo de 43 días.



**Figura 3.14. Porcentaje de recolección de estiércol vs Ingreso. Para el caso crítico de análisis (10 vacas). [Elaboración propia]**

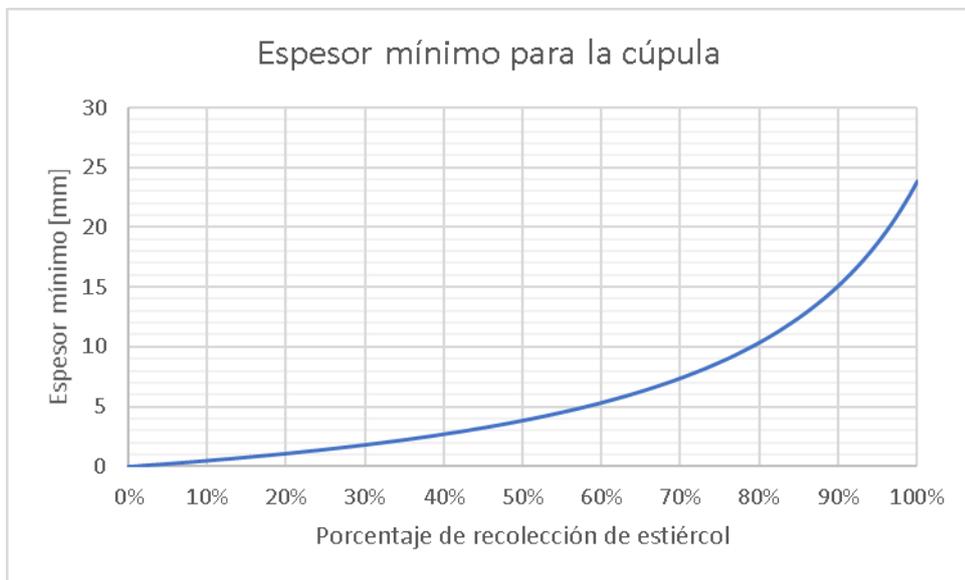
La Figura 3.14 proporciona una guía que relaciona el porcentaje de recolección de estiércol y el ingreso total, cabe destacar que se restó el monto de almacenamiento y transporte de biol al valor del ingreso, además, se considera como ingreso el ahorro en tanques de GLP.

Se puede observar que destacan las tres zonas que dividen la gráfica, la primera zona que incluye los porcentajes de recolección de estiércol menores al 41.65% representa la zona inviable del proyecto, es decir, la construcción del biodigestor no resulta rentable debido a que se generan pérdidas. La segunda zona que abarca los porcentajes entre 41.65% y 62.22% representa la zona de viabilidad parcial del proyecto, en este intervalo la producción de biol permite la rentabilidad del proyecto, sin embargo, la producción de biogás no es lo suficientemente alta como para producir un ingreso. La última zona que considera los porcentajes mayores al 62.22% representa la viabilidad total del proyecto, es decir, a partir del 62.22% de recolección de estiércol se genera la cantidad suficiente de biogás para que el cliente pueda prescindir de la compra de un tanque de GLP (dato que se puede observar en la Figura 3.12), por lo que se genera un ahorro, asimismo, la producción de biol sigue siendo lo suficientemente alta como para ser considerada la razón principal de la rentabilidad del proyecto.



**Figura 3.15. Porcentaje de recolección de estiércol vs Producción y consumo de biogás. Para el caso crítico de análisis (10 vacas). [Elaboración propia]**

En la Figura 3.15 se puede visualizar que, para el caso mínimo de 10 vacas, la producción de biogás es insuficiente para satisfacer la demanda de dos tanques de GLP, cuya equivalencia en biogás es de 82.95 [kg].



**Figura 3.16. Porcentaje de recolección de estiércol vs Espesor mínimo para la cúpula. Para el caso crítico de análisis (15 vacas y temperatura de 33 °C). [Elaboración propia]**

Se conoce que a mayor porcentaje de recolección de estiércol se produce una mayor cantidad de biogás, por lo que la presión interna del biodigestor aumentaría y se requeriría de un mayor espesor en la cúpula para poder soportar dicha presión sin que el material falle, asimismo, al aumentar la temperatura en el interior del biodigestor también se incrementa la presión interna. En la Figura 3.16 se muestra una relación polinómica entre el porcentaje de recolección de estiércol y el espesor de cúpula mínimo necesario para el correcto funcionamiento del biodigestor, requiriendo un mayor espesor a medida que aumenta el porcentaje de recolección de estiércol.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

Se realizó el dimensionamiento del biodigestor tomando en consideración que la cantidad de sustrato disponible puede variar en función de la recolección de estiércol y la cantidad de ganado presente.

Para el caso mínimo de análisis, que son 10 vacas, el porcentaje mínimo de recolección de estiércol, para estimar un ahorro de \$1.60, correspondiente a un tanque de GLP, es 62.22%, a diferencia del caso máximo correspondiente a 15 vacas, donde el porcentaje mínimo de recolección de estiércol para obtener una ganancia aproximada de \$1.60 es 41.43% y 82.96% para una ganancia estimada de \$3.20.

Dentro del biodigestor se logra la presión mínima de operación de diseño, al obtener un porcentaje de recolección de al menos 32.01%, no obstante, el porcentaje mínimo de recolección de estiércol, para obtener ganancias por biol, es 41.65% debido que, a valores inferiores a dicho porcentaje, el costo de transporte y almacenamiento de biol a las condiciones asumidas, excede el monto de ganancia. El porcentaje mínimo de recolección de estiércol para que el proyecto sea viable en su totalidad es 62.22%, a dicho porcentaje, el biogás se genera lo suficiente como para ahorrar la compra de un tanque de GLP, al igual que la producción de biol, como para ser aprovechado en su comercialización.

Para el caso correspondiente a 10 vacas, el biogás producido no es suficiente para abastecer el consumo del hogar, el cual es de dos taques de GLP, equivalente a 82.95 kg de biogás, a diferencia del caso máximo con 15 vacas, donde se necesita un porcentaje de recolección mínimo de estiércol de 82.96 % para abastecer el consumo de la vivienda.

A medida que aumente el porcentaje de recolección de estiércol, o se incremente la temperatura, se requerirá de un mayor espesor en la cúpula, para que el biodigestor funcione de manera correcta, debido al aumento de biogás en el interior del biodigestor e incremento de la presión interna.

La inversión total del biodigestor es de \$8.744,42, con un costo de mano de obra aproximado de \$905, correspondiente al precio subtotal SIN IVA, en cuanto al TIR y el VAN obtenidos, son valores positivos, con periodo de recuperación de 5 años, por lo que, a partir de los resultados logrados, se concluye que es factible, económica y financieramente llevar el proyecto a cabo.

La comercialización del biol permite la rentabilidad del proyecto debido a que representa un porcentaje considerablemente alto de los ingresos totales en comparación al biogás.

#### **4.2 Recomendaciones**

Se recomienda realizar pruebas para conocer las propiedades del estiércol, de este modo se pueden realizar estimaciones más certeras acerca de la producción de biol y biogás.

Para un funcionamiento óptimo se puede optar por el diseño de un sistema de nivelación manual para la cúpula, esto permite aumentar o disminuir la elevación de la cúpula en función de la cantidad de sustrato que ingresa y de la presión interna que se desea mantener.

En caso de que se desee un mejor control del proceso de DA se puede instalar instrumentos para la medición del pH, temperatura y presión, de este modo se puede tomar acciones correctivas en caso de que algún parámetro se salga del rango recomendado.

# BIBLIOGRAFÍA

- Aneja, V., Schlesinger, W., & Erisman, J. W. (2015). Farming pollution. *Nature Geoscience*, 409–411 .
- Anukam, A., Mohammadi, A., Naqvi, M., & Granström, K. (2019). *A Review of the Chemistry of Anaerobic Digestion: Methods of Accelerating and Optimizing Process Efficiency*. doi:<https://doi.org/10.3390/pr7080504>
- Arrieta Palacios, W. (2016). *Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado*. Universidad de Piura, Facultad de ingeniería, Piura, Perú. Obtenido de [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2575/IME\\_200.pdf](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2575/IME_200.pdf)
- Baredar, P., Khare, V., & Nema, S. (2020). Chapter 2 - Optimum sizing and modeling of biogas energy system. En P. Baredar, V. Khare, & S. Nema, *Design and Optimization of Biogas Energy Systems* (págs. 33-78). Academic Press. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822718-3.00002-2>
- Barzallo Bravo, L. A. (2018). *Diseño, construcción y estandarización operativa de biodigestor anaerobio para finca productora de leche*. Universidad Central del Ecuador, Quito. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/15473/1/T-UCE-0012-FIG-002.pdf>
- Beer, F., Johnston, E., DeWolf, J., & Mazurek, D. (2020). *Mechanics of Materials* (8th Edition ed.). McGraw Hill Education.
- Bhattacharyya, C., Roy, R., Tribedi, P., Ghosh, A., & Ghosh, A. (2020). Chapter 11 - Biofertilizers as substitute to commercial agrochemicals. En M. N. Prasad, *Agrochemicals Detection, Treatment and Remediation* (págs. 263-290). Butterworth-Heinemann. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103017-2.00011-8>
- Casanovas, G., Della Vecchia, F., Reymundo, F., & Serafini, R. (2019). *Guía Teórico-Práctica sobre el biogás y los biodigestores*. Buenos Aires: FAO.
- Castillo Monar, R. U. (2009). *Diseño de un biodigestor para una finca del recinto San Luís de las Mercedes del Cantón Las Naves – Provincia de Bolívar*. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/90869/D-65882.pdf>

- Castro, L., Escalante, H., Jaimes-Estévez, J., Díaz, L., Vecino, K., Rojas, G., & Mantilla, L. (2017). Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of biogas and digestate quality. *Bioresource Technology*, *Volume 239*, 311-317. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.035>
- Coronel Durazno, D. A. (2018). *Valoración de estiércol bovino y porcino en la producción de biogás en un biodigestor de producción por etapas*. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15445/1/UPS-CT007585.pdf>
- Cotrina Lezama, R. F., & Villanueva Vigo, G. (2015). *Biodigestores tubulares unifamiliares: Cartilla práctica para instalación, operación y mantenimiento*. Lima-Perú: Block Grant.
- Deng, L., Liu, Y., & Wang, W. (2020). Anaerobic Digestion Microorganisms. En L. Deng, Y. Liu, & W. Wang, *Biogas Technology* (págs. 1-29). Singapore: Springer. doi:[https://doi.org/10.1007/978-981-15-4940-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-15-4940-3_1)
- Deng, L., Liu, Y., & Wang, W. (2020). Rural Household Digesters. En L. Deng, Y. Liu, & W. Wang, *Biogas Technology* (págs. 31-67). Singapore: Springer. doi:[https://doi.org/10.1007/978-981-15-4940-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-15-4940-3_2)
- DIPAC Manta S.A. (2021). *Planchas de acero inoxidable*. Obtenido de DIPAC: <https://www.dipacmanta.com/planchas-inoxidables>
- Esteves, E. M., Herrera, A. M., Esteves, V. P., & Morgado, C. d. (2019). Life cycle assessment of manure biogas production: A review. *Journal of Cleaner Production*, *Volumen 219*, 411-423. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.091>
- FAO. (2011). *Manual de biogás*. Santiago de Chile.
- García, L. E., Mejía, M. F., Murcia, R. A., & Prieto, R. E. (2011). *Diseño de un biodigestor de flujo inducido con el uso de corrientes térmicas*. Universidad América, Facultad de ingeniería mecánica. Obtenido de <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/778/1/2011639x-2011-2-IM.pdf>
- Geankoplis, C. J., Hersel, A. A., & Lepek, D. H. (2018). *Transport processes and separation process principles* (Fifth Edition ed.). Pearson Education, Inc.
- Gordón Zuleta, J. E., & Samaniego Manchay, J. A. (2014). *Diseño y construcción de un biodigestor chino anaerobio a partir del estiércol vacuno en la finca "Los 5 hermanos" de la parroquia el dorado*. Escuela Superior Politécnica de

- Chimborazo, Riobamba. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/3400/1/236T0094%20.pdf>
- Groppelli, E. S., & Giampaoli, O. A. (2001). *El camino de la biodigestión: Ambiente y tecnología socialmente apropiada*. Universidad Nacional del Litoral.
- Guaman Prado, N. E., & Salazar Quishpe, J. E. (2013). *DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS EN LA QUINTA PUNZARA DE LA UNIVERSIDAD DE LOJA*. Loja-Ecuador.
- La Hora. (4 de agosto de 2021). *El subsidio por tanque de gas supera los \$13*. Obtenido de La Hora: <https://www.lahora.com.ec/pais/el-subsidio-por-tanque-de-gas-supera-los-13/>
- Langeveld, J. W., & Peterson, E. C. (2018). Feedstocks for Biogas Production: Biogas and Electricity Generation Potentials. En M. Tabatabaei, & H. Ghanavati, *Biogas. Biofuel and Biorefinery Technologies*, vol 6 (págs. 35-49). Cham, Switzerland: Springer. doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-319-77335-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-77335-3_2)
- Lara Guilcapi, M. F. (2016). *Diseño de un biodigestor para la producción de biogás generado por las excretas de ganado vacuno, en el criadero Jersey Chugllin*. Riobamba. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/6261/1/236T0242.pdf>
- Lojagas. (s.f.). *HOJA DE SEGURIDAD DEL GAS LICUADO DE PETROLEO*. Obtenido de Lojagas: <http://lojagas.com/nueva/wp-content/uploads/2017/08/G-99.-HOJA-DE-SEGURIDAD-GAS-LICUADO-DE-PETROLEO.pdf>
- López Sopena, J. E. (2001). *Manual de instalaciones de GLP*. CEPSA ELF GAS, S.A. Obtenido de <http://www.blancogas.com/estilo/normas/bg/09-glp-cepsa.pdf>
- McCabe, W., Smith, J., & Harriott, P. (2005). *Unit Operations of Chemical Engineering*. McGraw Hill.
- Moncayo Romero, G. (2017). *¿Qué es el biogás?* Aqualimpia Engineering E.K., Uelzen.
- Okareh, O. T., Timothy, A., & Shittu, I. (2013). Enrichment of pig dung with selected crop wastes for the production of biogas. *International Research Journal of Medicine and Medical Sciences, Volumen 4*. doi:10.14303/irjm.2012.093
- Poudel, R. C. (2018). Small Scale Biogas Production. En M. Tabatabaei, & H. Ghanavati, *Biogas. Biofuel and Biorefinery Technologies*, vol 6 (págs. 437-448). Cham, Switzerland: Springer. doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-319-77335-3\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-319-77335-3_17)
- Pramanik, S. K., Suja, F. B., Zain, S. M., & Pramanik, B. K. (2019). The anaerobic digestion process of biogas production from food waste: Prospects and

- constraints. *Bioresource Technology Reports*, Volumen 8. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100310>
- Rajin, M. (2018). A Current Review on the Application of Enzymes in Anaerobic Digestion. En N. Horan, A. Z. Yaser, & N. Wid., *Anaerobic Digestion Processes. Green Energy and Technology* (págs. 55-70). Singapore: Springer. doi:[https://doi.org/10.1007/978-981-10-8129-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-10-8129-3_4)
- Román, P., Martínez, M. M., & Pantoja, A. (2013). *Manual de Compostaje del Agricultor. Experiencias en America Latina*. Santiago de Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Ruiz Pinto, B. E. (2020). *Diseño de un biodigestor para generación de energía a partir del estiércol de ganado vacuno para una vivienda rural en el cc.pp. las canteras del distrito de Pátapo – Chiclayo - Lambayeque*. Chiclayo. Obtenido de [https://tesis.usat.edu.pe/bitstream/20.500.12423/2498/1/TL\\_RuizPintoBill.pdf](https://tesis.usat.edu.pe/bitstream/20.500.12423/2498/1/TL_RuizPintoBill.pdf)
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill.
- Salazar Abad, J. B., & Arias Bonilla, J. L. (2016). *Diseño y construcción de un biodigestor para producción de biogás a partir de estiércol vacuno en la finca Isabel de la parroquia Taracoa, provincia de Orellana*. Trabajo de titulación, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Riobamba.
- Salazar Cuaila, J. L., Amusquivar Coaquira, C., Llave Perez, J. J., & Rivasplata Cabanillas, C. (2016). *Producción de biogás y biol a partir de excretas de ganado: experiencias en la ciudad de Tacna*. Tacna. Obtenido de <http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2013/01/6.pdf>
- Scarlat, N., Dallemand, J.-F., & Fahl, F. (2018). Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*, Volumen 129, Part A, 457-472. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006>
- Sravan, J. S., Tharak, A., & Mohan, S. V. (2021). Status of biogas production and biogas upgrading: A global scenario. En N. Aryal, L. D. Ottosen, M. V. Kofoed, & D. Pant, *Emerging Technologies and Biological Systems for Biogas Upgrading* (págs. 3-26). Academic Press. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822808-1.00002-7>
- Tabatabaei, M., Valijanlian, E., Aghbashlo, M., Ghanavati, H., Sulaiman, A., & Wakisaka, M. (2018). Prominent Parameters in Biogas Production Systems. En M. Tabatabaei, & H. Ghanavati, *Biogas. Biofuel and Biorefinery Technologies, vol 6* (págs. 135-161). Cham: Springer. doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-319-77335-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-77335-3_6)

- Talia, L. (2018). Biogas Plants: Design and Fabrication. En M. Tabatabaei, & H. Ghanavati, *Biogas. Biofuel and Biorefinery Technologies*, vol 6 (págs. 51-93). Cham, Switzerland: Springer. doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-319-77335-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-77335-3_3)
- Vitázek, I., Klůčik, J., Uhrinová, D., Mikulová, Z., & Mojžiš, M. (2017). Thermodynamics of combustion gases from biogas. *Research in Agricultural Engineering*, 62, S8-S13. doi:10.17221/34/2016-RAE
- Webfleet Solutions. (16 de enero de 2019). *¿Conoces el consumo de diésel de un camión por km?* Obtenido de Webfleet Solutions: [https://www.webfleet.com/es\\_es/webfleet/blog/conoces-el-consumo-de-diesel-de-un-camion-por-km/](https://www.webfleet.com/es_es/webfleet/blog/conoces-el-consumo-de-diesel-de-un-camion-por-km/)
- Whitelightskyes. (5 de Enero de 2022). *El Clima en Balzar*. Obtenido de White Light Sky Es: <https://whitelightskyes.com/administrative-area/4381561-balzar/>
- Wid, N., & Horan, N. J. (2018). Anaerobic Digestion of Screenings for Biogas Recovery. En N. Horan, A. Z. Yaser, & N. W. Editors, *Anaerobic Digestion Processes. Green Energy and Technology* (págs. 85-103). Singapore: Springer. doi:[https://doi.org/10.1007/978-981-10-8129-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-10-8129-3_6)
- Zuñiga, I. C. (2015). *Biodigestores*. Estado de Hidalgo, México.

# APÉNDICES

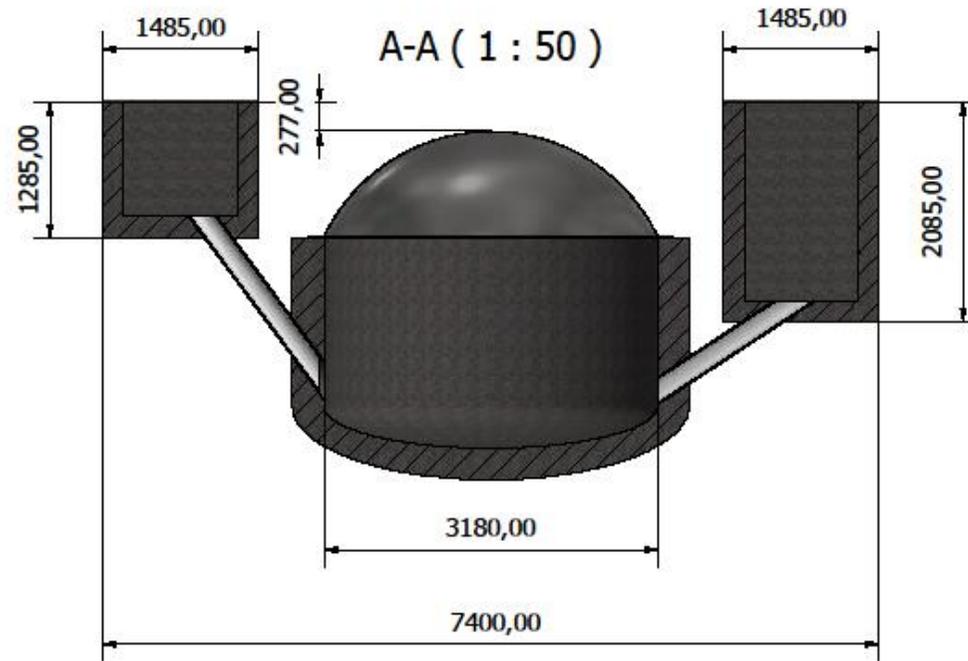
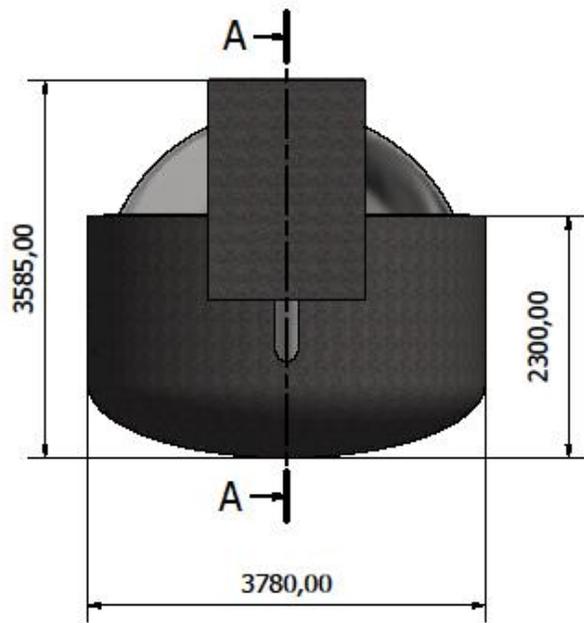
# APÉNDICE A

## FLUJO DE CAJA

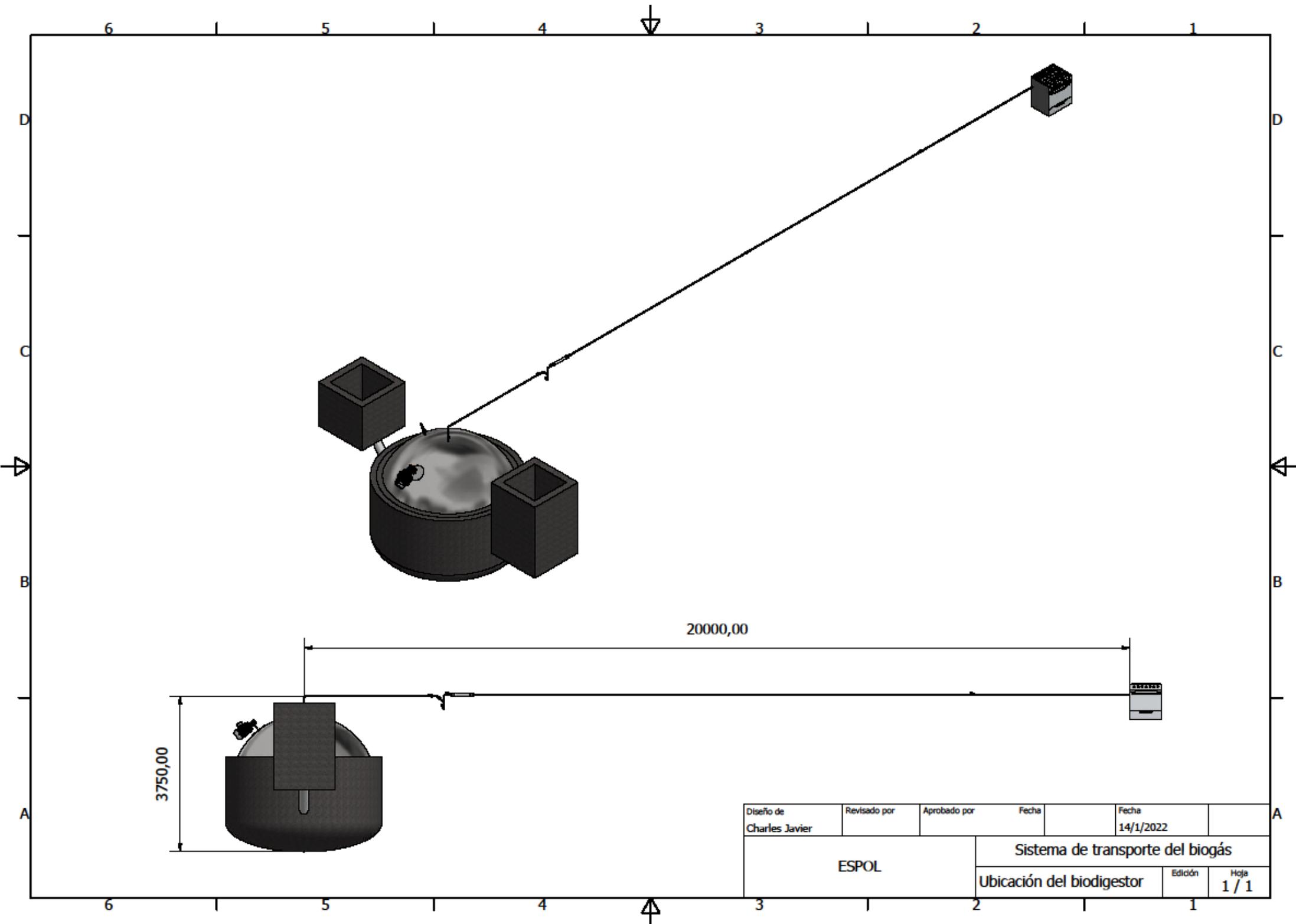
**Tabla A.1. Cálculos realizados en el flujo de caja. [Elaboración propia]**

<b>Años</b>	<b>Egresos</b>	<b>Inversión</b>	<b>Mano de obra</b>	<b>Mantenimiento</b>	<b>Ingresos</b>	<b>GLP</b>	<b>Biol</b>	<b>Beneficios Netos</b>
1	\$ -9,649.42	\$ -8,744.42	\$ -905.00		\$ 2,311.82	\$ 9.60	\$ 2,302.22	\$ -7,337.60
2	\$ -				\$ 2,313.42	\$ 11.20	\$ 2,302.22	\$ 2,313.42
3	\$ -20.00			\$ -20.00	\$ 2,313.42	\$ 11.20	\$ 2,302.22	\$ 2,293.42
4	\$ -				\$ 2,313.42	\$ 11.20	\$ 2,302.22	\$ 2,313.42
5	\$ -300.00			\$ -300.00	\$ 2,313.42	\$ 11.20	\$ 2,302.22	\$ 2,013.42
6	\$ -				\$ 2,313.42	\$ 11.20	\$ 2,302.22	\$ 2,313.42
7	\$ -				\$ 2,311.82	\$ 9.60	\$ 2,302.22	\$ 2,311.82
8	\$ -20.00			\$ -20.00	\$ 2,313.42	\$ 11.20	\$ 2,302.22	\$ 2,293.42
9	\$ -				\$ 2,313.42	\$ 11.20	\$ 2,302.22	\$ 2,313.42
10	\$ -300.00			\$ -300.00	\$ 2,313.42	\$ 11.20	\$ 2,302.22	\$ 2,013.42
11	\$ -				\$ 2,313.42	\$ 11.20	\$ 2,302.22	\$ 2,313.42
12	\$ -				\$ 2,313.42	\$ 11.20	\$ 2,302.22	\$ 2,313.42
13	\$ -20.00			\$ -20.00	\$ 2,311.82	\$ 9.60	\$ 2,302.22	\$ 2,291.82
14	\$ -				\$ 2,313.42	\$ 11.20	\$ 2,302.22	\$ 2,313.42
15	\$ -300.00			\$ -300.00	\$ 2,313.42	\$ 11.20	\$ 2,302.22	\$ 2,013.42
16	\$ -				\$ 2,313.42	\$ 11.20	\$ 2,302.22	\$ 2,313.42
17	\$ -				\$ 2,313.42	\$ 11.20	\$ 2,302.22	\$ 2,313.42
18	\$ -20.00			\$ -20.00	\$ 2,313.42	\$ 11.20	\$ 2,302.22	\$ 2,293.42
19	\$ -				\$ 2,313.42	\$ 11.20	\$ 2,302.22	\$ 2,313.42
20	\$ -				\$ 2,311.82	\$ 9.60	\$ 2,302.22	\$ 2,311.82

**APÉNDICE B**  
**PLANOS DEL BIODIGESTOR**



Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
Charles Javier				15/1/2022	
ESPOL			Estructura del biodigestor		
			Estructura biodigestor	Edición	Hoja
				1	1 / 1

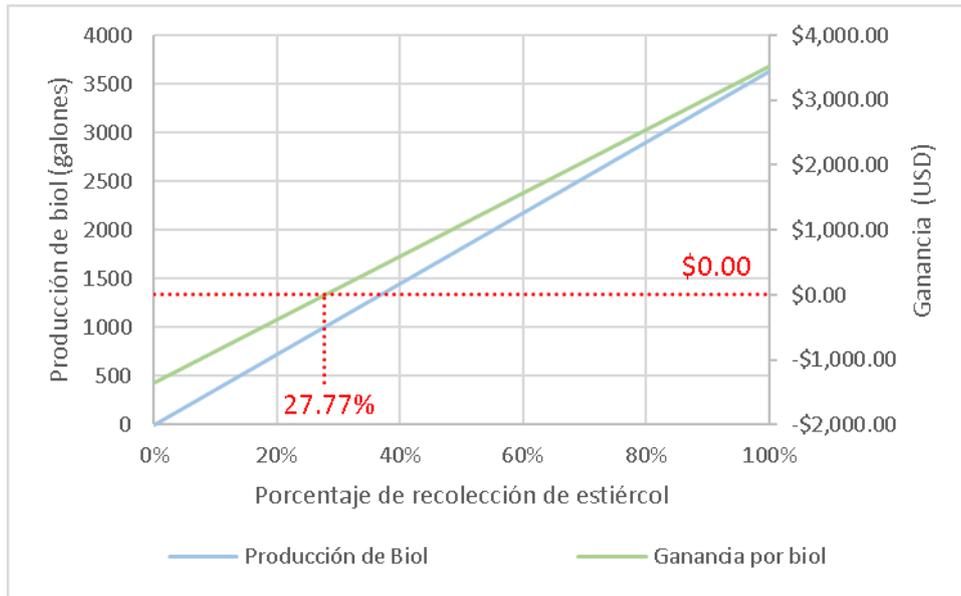


3750,00

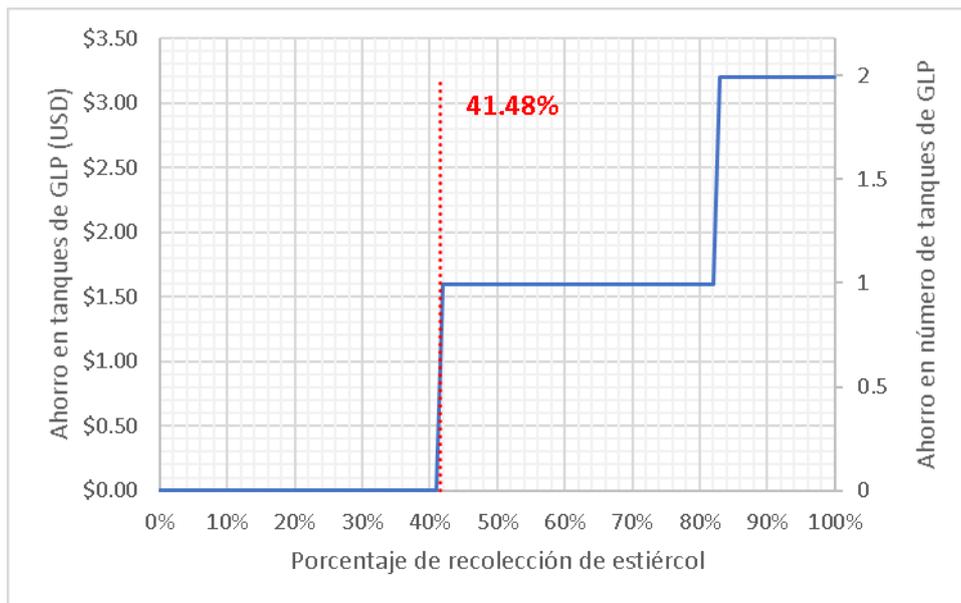
20000,00

Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha
Charles Javier				14/1/2022
ESPOL			Sistema de transporte del biogás	
			Ubicación del biodigestor	Edición 1 / 1

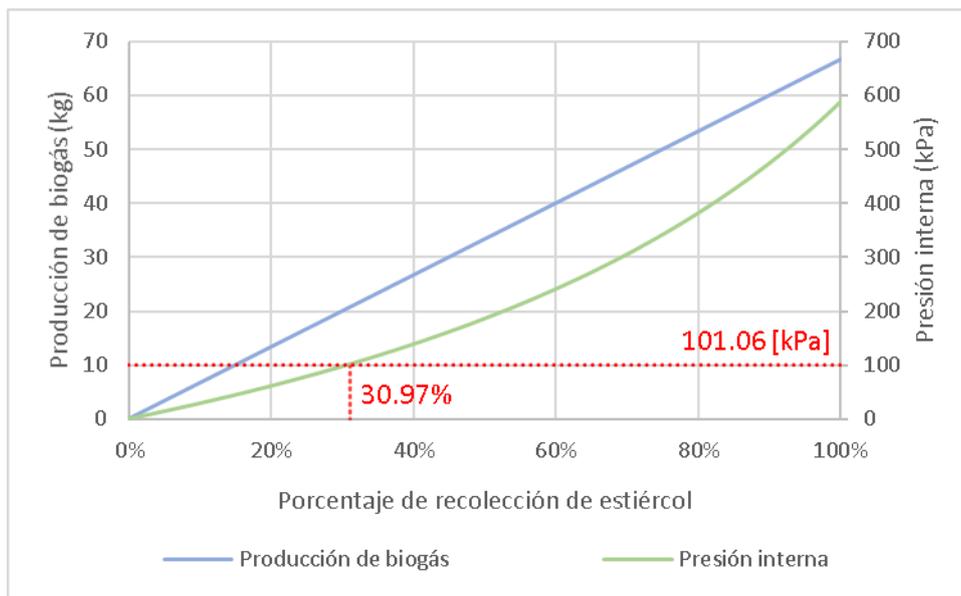
**APÉNDICE C**  
**GRÁFICAS DE RESULTADOS DEPENDIENTES DEL**  
**PORCENTAJE DE RECOLECCIÓN DE ESTIÉRCOL**



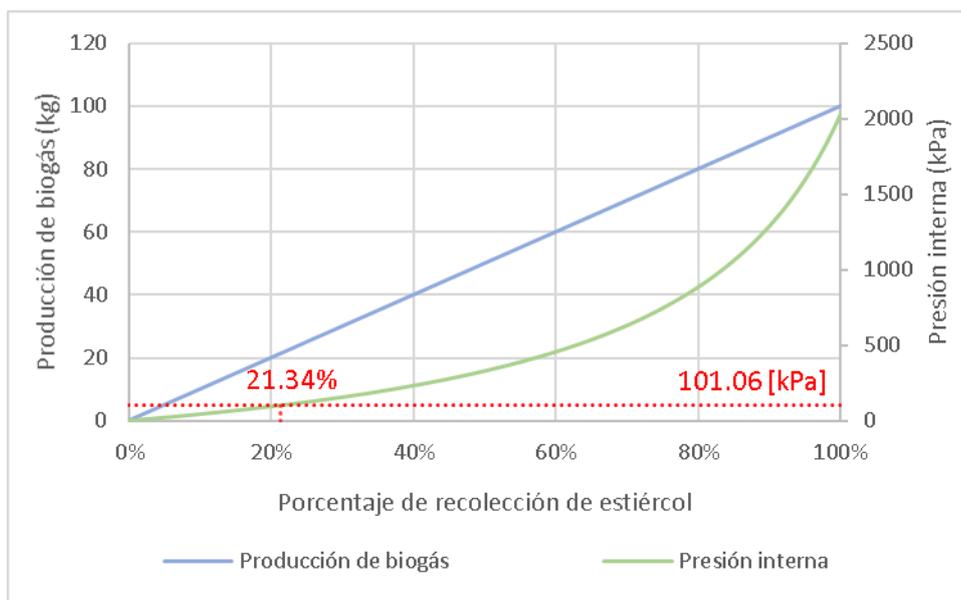
**Figura C.1. Porcentaje de recolección de estiércol vs Producción de biol y ganancia (15 vacas). [Elaboración propia]**



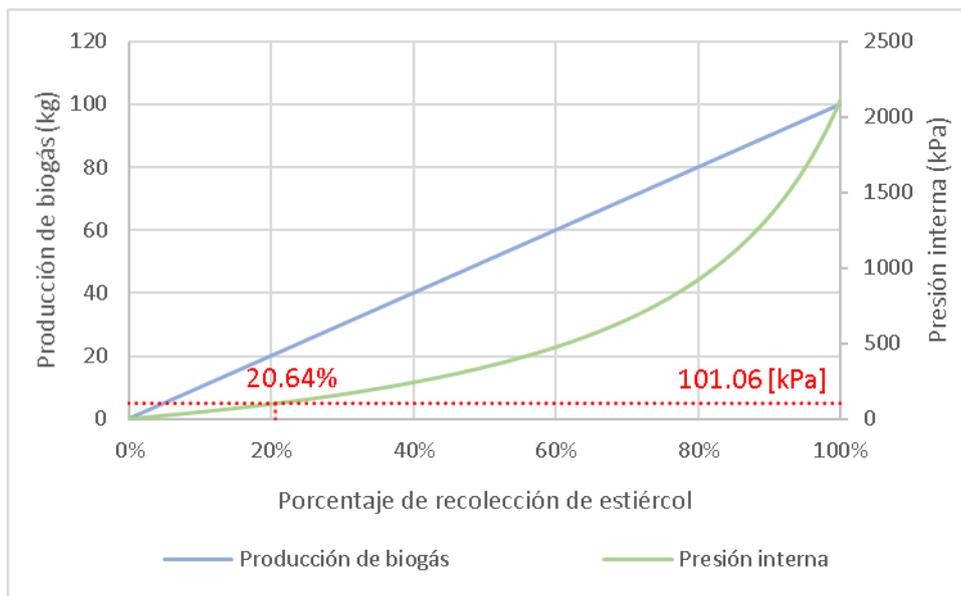
**Figura C.2. Porcentaje de recolección de estiércol vs Ahorro en tanques de GLP (15 vacas). [Elaboración propia]**



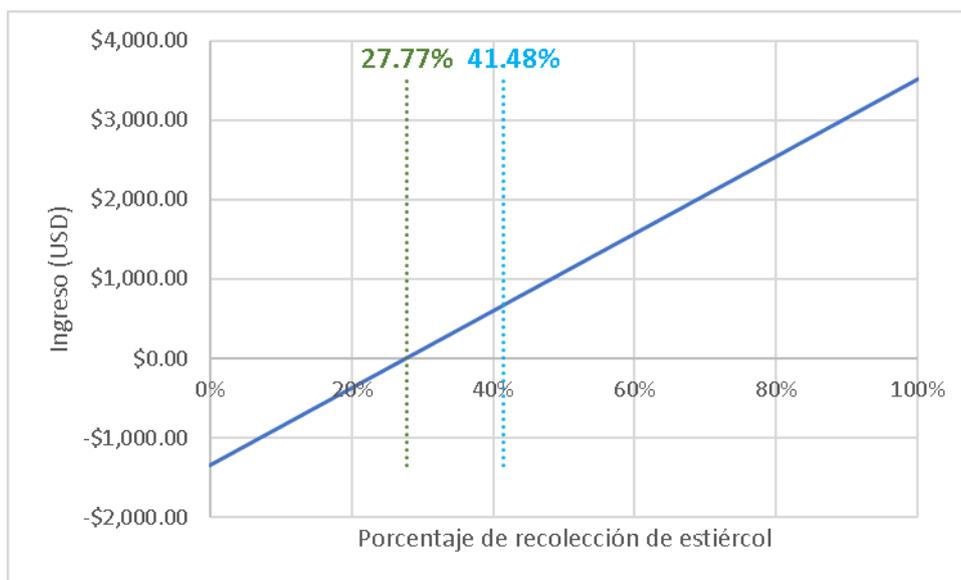
**Figura C.3. Porcentaje de recolección de estiércol vs producción de biogás y presión interna (10 vacas y temperatura de 33 °C). [Elaboración propia]**



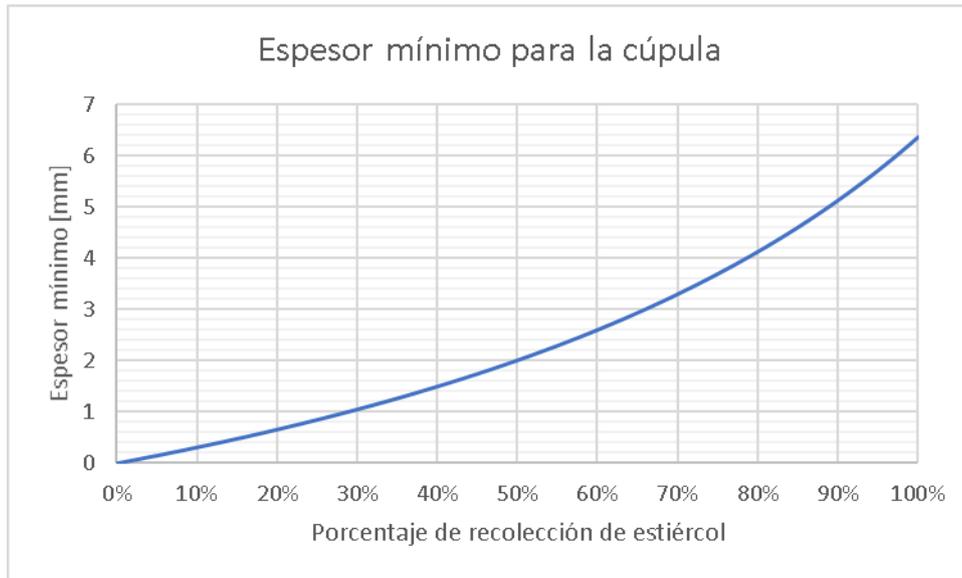
**Figura C.4. Porcentaje de recolección de estiércol vs producción de biogás y presión interna (15 vacas y temperatura de 21 °C). [Elaboración propia]**



**Figura C.5. Porcentaje de recolección de estiércol vs producción de biogás y presión interna (15 vacas y temperatura de 33 °C). [Elaboración propia]**



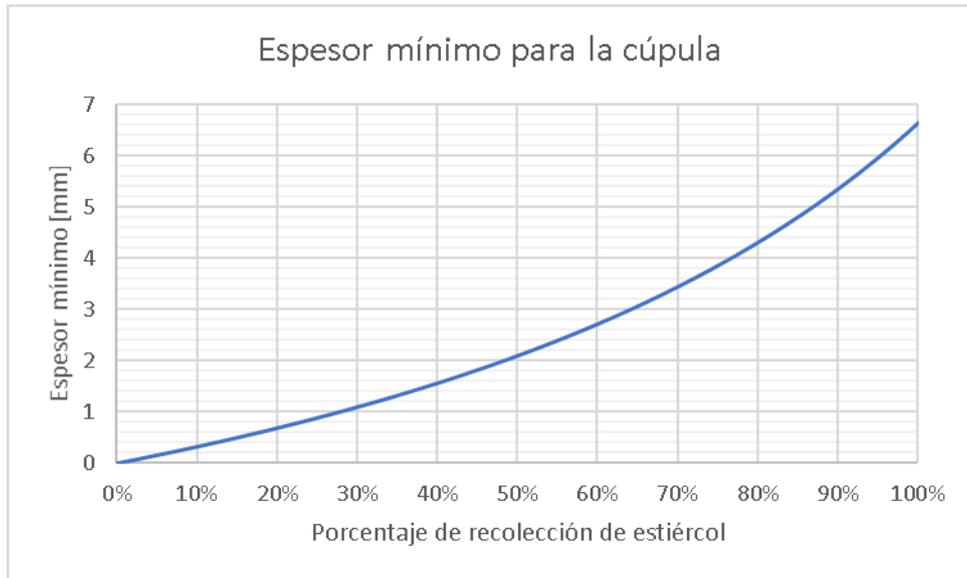
**Figura C.6. Porcentaje de recolección de estiércol vs Ingreso (15 vacas). [Elaboración propia]**



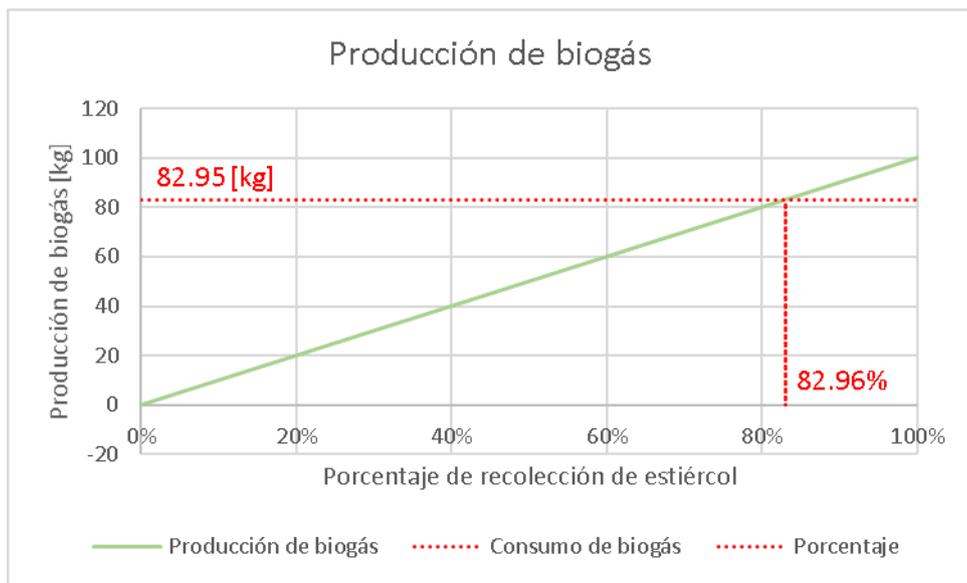
**Figura C.7. Porcentaje de recolección de estiércol vs Espesor mínimo para la cúpula (10 vacas y temperatura de 21 °C). [Elaboración propia]**



**Figura C.8. Porcentaje de recolección de estiércol vs Espesor mínimo para la cúpula (15 vacas y temperatura de 21 °C). [Elaboración propia]**



**Figura C.9. Porcentaje de recolección de estiércol vs Espesor mínimo para la cúpula (10 vacas y temperatura de 33 °C). [Elaboración propia]**



**Figura C.10. Porcentaje de recolección de estiércol vs Producción y consumo de biogás (15 vacas). [Elaboración propia]**