



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE MECÁNICA

**DISEÑO Y SIMULACIÓN TÉRMICA DE UN BIODIGESTOR CON CAPACIDAD DE
100 L/DÍA PARA CALENTAMIENTO DE AGUA SANITARIA**

Trabajo de titulación previo del

Título de: **Ingeniera Mecánica e Ingeniero Mecánico**

AUTORES: GRACE BERENICE BRAVO TIPANTAXI

KEVIN STEVAN SIMBA CRUZ

TUTOR: CARLOS IVÁN MALDONADO DÁVILA

Quito-Ecuador

2022

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Nosotros, Grace Berenice Bravo Tipantaxi con documento de identificación N°1726241720 y Kevin Stevan Simba Cruz con documento de identificación N° 1751631647; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 11 de agosto del año 2022

Atentamente,



Grace Berenice Bravo Tipantaxi

1726241720



Kevin Stevan Simba Cruz

1751631647

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Grace Berenice Bravo Tipantaxi con documento de identificación No. 1726241720 y Kevin Stevan Simba Cruz con documento de identificación No. 1751631647, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Diseño y simulación térmica de un biodigestor con capacidad de 100 l/día para calentamiento de agua sanitaria”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Mecánica e Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

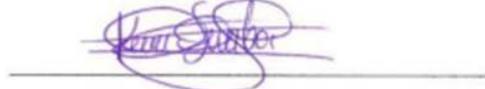
Quito, 11 de agosto del año 2022

Atentamente,



Grace Berenice Bravo Tipantaxi

1726241720



Kevin Stevan Simba Cruz

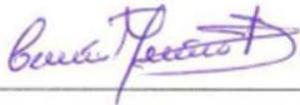
1751631647

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carlos Iván Maldonado Dávila con documento de identificación N° 1711156073, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO Y SIMULACIÓN TÉRMICA DE UN BIODIGESTOR CON CAPACIDAD DE 100 L/DÍA PARA CALENTAMIENTO DE AGUA SANITARIA , realizado por Grace Berenice Bravo Tipantaxi con documento de identificación N° 1726241720 y por Kevin Stevan Simba Cruz con documentode identificación N° 1751631647, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 11 de agosto del año 2022

Atentamente,



Ing. Carlos Iván Maldonado Dávila, MSc.

1711156073

DEDICATORIA

A mis padres, Ángel y Mery, quienes con mucho amor e indulgencia han guiado mi vida, con sus consejos iluminando mi camino a lo largo de la carrera, siendo testigos de mis derrotas y triunfos y a pesar de ello motivarme constantemente.

Mi madre, la mujer resiliente que me ha educado con su ejemplo, paciencia y amor incondicional, sin ella no lo habría logrado, su bendición a diario a lo largo de mi vida me ha protegido y llevado por el camino del bien y quien me ha demostrado que para Dios nada es imposible. Mi padre, un hombre bueno y valiente capaz de luchar contra toda adversidad por el bienestar de su familia, quien mucho antes de que yo nazca ya estaba buscando maneras de ofrecerme lo mejor trabajando duro día a día y que con un abrazo reconforta y fortalece mi espíritu.

A mi hermana Taimy, el mejor regalo que pudieron darme mis padres, mi amiga, cómplice y motivación diaria, quien con su sola presencia ilumina mis días, con su sonrisa me demuestra que a pesar de mis desaciertos seguirá apoyándome para alcanzar mis metas.

Grace

Le dedico este trabajo a Dios que me ha permitido llegar hasta donde estoy a pesar de mis tropiezos. A mis padres, por brindarme todo su apoyo en mis estudios y por enseñarme a ser una persona de bien, a mis hermanos por ser un apoyo fundamental en los malos momentos y por brindarme su compañía, a mis tíos y primos que me enseñaron mucho a lo largo de los años, a mi abuelita y tía que, aunque no se encuentren físicamente siempre me cuidan desde el cielo, a mis compañeros y amigos que me han brindado su apoyo incondicional, y a todas las personas que me han acompañado en toda mi vida universitaria.

Kevin

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios, su amor y bondad que no tiene fin, por la sabiduría otorgada que nos ha ayudado a cumplir los sueños y metas que nos hemos planteado como seres humanos, amigos y ahora como profesionales.

A nuestros padres por brindarnos su apoyo incondicional, comprensión y estímulo constante durante la carrera y por ser esa la razón el más grande incentivo para el cumplimiento de nuestros objetivos incluido este que significa alegría y orgullo para ellos y nosotros.

A la Universidad Politécnica Salesiana en la carrera de Ingeniería Mecánica por los conocimientos adquiridos y experiencia de nuestros docentes, nos encontramos con instalaciones de gran calidad y cálidas personas, amigos y profesionales que han contribuido al desarrollo de nuestra profesión.

Al Magister Carlos Maldonado Dávila, docente tutor de la presente propuesta tecnológica, por la valentía de aceptar un nuevo desafío, con el conocimiento técnico y la experiencia que nos impartió en el proceso de desarrollo de nuestro proyecto para alcanzar con éxito las metas propuestas y los resultados deseados.

Grace y Kevin

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO.....	VI
RESUMEN.....	XVI
ABSTRACT.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	1
JUSTIFICACIÓN.....	2
OBJETIVOS.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
CAPÍTULO I.....	5
GENERALIDADES DE LA ENERGÍA RENOVABLE.....	5
1.1. Energía.....	5
1.1.1. Fuentes de energía renovable.....	5
Biomasa.....	5
Biogás.....	5
Aplicaciones del biogás como fuente de energía.....	6
Componentes del biogás.....	6
Problemas del biogás.....	6
1.2. Alternativas al uso de biogás.....	7
1.2.1. Leña.....	7
Problemas con el uso de leña como combustible.....	7
Aprovechamiento de leña y su efecto en las zonas forestales del Ecuador.....	8
1.2.2. Gas natural.....	8

Gas licuado de petróleo como combustible.....	8
Importaciones y subsidio de GLP	8
Desventajas del uso de GLP como combustible	9
1.3. Biodigestión	9
1.3.1. Biodigestión aeróbica.....	9
1.3.2. Biodigestión anaeróbica	10
Etapas de la digestión.....	10
Hidrólisis	10
Acidogénesis	11
Acetogénesis.....	11
Metanogénesis.....	11
1.4. Propiedades de la mezcla	12
1.4.1. Enlace carbono-nitrógeno.....	12
1.5. Biodigestor	12
1.5.1. Tipos de biodigestores.....	13
Biodigestores de globo.....	13
Biodigestor de domo fijo.....	13
Biodigestor de tambor flotante.....	14
1.6. Aportes del biodigestor	14
1.6.1. Biodigestor y producción de combustible.....	15
1.6.2. Biodigestor y producción de fertilizante	15
1.6.3. Biodigestor y sistema de tratamiento	15
1.7. Usos del biogás.....	15
1.7.1. Generación de energía.....	15

1.7.2.	Transformación de biogás en biometano.....	16
1.7.3.	Combustible para cocinas de gas domésticas.....	16
1.7.4.	Refrigeración.....	16
1.7.5.	Calefacción.....	16
1.7.6.	Conversión de biogás en electricidad para celdas de combustible.....	16
1.7.7.	Gestión de residuos en el sector agrícola.....	17
1.7.8.	Suministro de calefacción y aparatos eléctricos.....	17
1.8.	Factores que influyen en el diseño de un biodigestor.....	17
1.8.1.	Factores físicos.....	17
	Agua.....	17
	Temperatura.....	17
	Tiempo de retención.....	18
	Cambio climático.....	18
1.8.2.	Factores biológicos.....	19
	Desechos orgánicos.....	19
	Desechos agrícolas.....	19
	Desechos animales.....	19
1.9.	Normativa ambiental.....	19
1.9.1.	Constitución de la República del Ecuador.....	19
1.9.2.	Estrategias de remediación para territorios contaminados.....	19
	Prevención de contaminación del suelo.....	20
	Disposición de derechos pecuarios.....	20
	Polución o contaminación del agua.....	20
CAPÍTULO II.....		21

DESARROLLO METODOLÓGICO DEL PROCESO DE BIODIGESTIÓN	21
2.1. Parámetros que influyen en el funcionamiento del biodigestor	21
2.1.1. Factores geográficos.....	21
2.2. Factores de funcionamiento de un biodigestor.....	21
2.2.1. Temperatura.....	22
2.2.2. Tiempo de retención.....	22
2.2.3. Producción de estiércol fresco.....	22
2.3. Cálculos para determinar la cantidad de biogás	22
2.3.1. Consumo de gas en cada equipo de calentamiento	23
2.4. Volumen de líquido y gas por cada carga de materia orgánica.....	23
2.4.1. Producción de biogás.....	24
2.4.2. Sólidos totales.....	24
2.4.3. Sólidos volátiles	24
2.4.4. Nivel de sólidos totales y sólidos volátiles.....	25
Densidad:.....	25
Calor específico y conductividad térmica de la mezcla	25
2.5. Softwares especializados.....	26
2.5.1. Software ANSYS Fluent CFD	26
2.5.2. Software SolidWorks	26
CAPÍTULO III	27
DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CON CAPACIDAD PARA CALENTAR 100 l/día DE AGUA SANITARIA.....	27
3.1. Diseño.....	27
3.1.1. Componentes.....	27

Biodigestor.....	27
Entrada y salida de materia orgánica.....	28
Salida de biogás.....	28
Válvula de seguridad.....	28
Válvula para drenaje de agua.....	28
Conducción de gas.....	29
Invernadero.....	29
3.1.2. Materiales para la construcción de un biodigestor.....	29
3.1.3. Dimensiones del tanque de digestión.....	30
Volumen de líquido y gas por cada carga de materia orgánica.....	30
3.1.4. Dimensionamiento de las tuberías.....	32
3.1.5. Dimensión de la fosa.....	32
3.2. Ubicación geográfica del biodigestor.....	33
3.2.1. Ubicación del biodigestor con respecto al hogar familiar.....	34
3.2.2. Ubicación con respecto al termotanque.....	34
CAPÍTULO IV.....	35
SIMULACIÓN Y RESULTADOS DE UN BIODIGESTOR.....	35
4.1. Cálculos para determinar la cantidad de biogás necesario.....	35
Consumo de gas en un termotanque.....	35
Factor de producción.....	35
Sólidos totales de la materia orgánica de ganado bovino y equino.....	35
Sólidos totales de la materia orgánica de ganado porcino.....	36
Producción de biogás total entre ganado equino, porcino y bovino.....	36
4.2. Análisis de resultados de simulación transferencia de calor.....	38

4.2.1.	Simulación del biodigestor con relación al ambiente y luz solar en ANSYS Fluent.	38
4.2.2.	Simulación interna del biodigestor	38
4.2.3.	Propiedades térmicas de la mezcla orgánica	39
	Densidad de la mezcla líquida.....	39
	Calor específico.....	39
	Conductividad térmica	39
	Viscosidad dinámica.....	40
	Entalpía de estado estándar.	41
	Temperatura interna del biodigestor.....	41
4.2.4.	Resultados simulación durante el verano y el invierno	42
	Mañana de verano.	43
	Medio día de verano.....	43
	Noche de verano.....	45
	Mañana de invierno.....	46
	Medio día invierno.	46
	Noche de invierno.	47
CAPÍTULO V		49
COSTO DE CONSTRUCCIÓN DEL BIODIGESTOR Y ANÁLISIS ECONÓMICO DEL SECTOR.....		49
5.1.	Análisis económico del sector.....	49
5.1.1.	Agricultura y ganadería.....	49
5.1.2.	Turismo	49
5.1.3.	Explotación minera.....	50
5.1.4.	Servicios financieros	50

5.2. Análisis del costo de ensamblaje del biodigestor	50
5.3. Costos del biodigestor y otras fuentes de energía	52
CONCLUSIONES	54
RECOMENDACIONES	55
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
ANEXOS.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Biodigestor de globo</i>	13
Figura 2. <i>Biodigestor de domo fijo</i>	14
Figura 3. <i>Biodigestor de tambor flotante</i>	14
Figura 4. <i>Válvula para salida de biogás excedente fabricado con una botella de plástico</i>	28
Figura 5. <i>Dimensiones del biodigestor</i>	31
Figura 6. <i>Forma de la fosa para el biodigestor</i>	32
Figura 7. <i>Ubicación del barrio San Isidro de Píntag</i>	33
Figura 8. <i>Lote para la construcción del biodigestor</i>	33
Figura 9. <i>Ubicación del biodigestor respecto a la casa y dimensiones del terreno y la casa</i>	34
Figura 10. <i>Mallado del diseño del biodigestor</i>	38
Figura 11. <i>Mallado del tanque del sistema en 2D</i>	39
Figura 12. <i>Configuración de carga solar</i>	43
Figura 13. <i>Configuración de la calculadora solar para la zona de estudio</i>	43
Figura 14. <i>Condiciones de operación de borde</i>	44
Figura 15. <i>Criterios de simulación</i>	44
Figura 16. <i>Temperatura externa del tanque a medio día en verano</i>	45
Figura 17. <i>Temperatura del biodigestor después de 50 minutos en verano</i>	45
Figura 18. <i>Producción de biogás al interior del sistema</i>	46
Figura 19. <i>Configuración del día y hora en época de invierno</i>	46
Figura 20. <i>Temperatura externa del tanque a medio día de invierno</i>	47
Figura 21. <i>Temperatura del biodigestor después de 50 minutos en invierno</i>	47
Figura 22. <i>Producción de biogás al interior del tanque</i>	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Valores máximos admisibles de determinados elementos para el sulfuro de hidrógeno...</i>	6
Tabla 2. <i>Rango de tiempo y temperatura para la digestión anaeróbica.....</i>	18
Tabla 3. <i>Temperatura promedio en la parroquia Píntag de acuerdo a la temporada.....</i>	22
Tabla 4. <i>Materiales para la construcción del biodigestor</i>	29
Tabla 5. <i>Composición de diferentes estiércoles</i>	40
Tabla 6. <i>Porcentaje por cada elemento de composición de la materia orgánica.....</i>	41
Tabla 7. <i>Propiedades de las fases de la materia.....</i>	42
Tabla 8. <i>Propiedades del polietileno de alta densidad</i>	42
Tabla 9. <i>Materiales y presupuesto estimado para la construcción del biodigestor.....</i>	51
Tabla 10. <i>Materiales adicionales sin coste específico</i>	52

RESUMEN

La presente propuesta tecnológica tiene como propósito el análisis térmico de un biodigestor capaz de calentar 100 l de agua sanitaria al día en el sector de Píntag. La metodología utilizada fue el diseño experimental a base de datos obtenidos tras la investigación y haciendo uso del software de simulación ANSYS Fluent CFD. En base a los resultados analíticos se obtuvo que el porcentaje de biogás que se puede generar en el diseño propuesto del biodigestor es de 4.0375 m³, en la simulación gracias a la radiación solar el biodigestor puede alcanzar externamente en las temporadas de invierno y verano una temperatura de 35 °C y 37 °C respectivamente, con estos datos obtenidos se realizó una segunda simulación donde se obtuvo la temperatura al interior de la bolsa donde alcanza una temperatura aproximada de 35 °C, la cual, cumple para realizar el proceso de fermentación mesofílica, haciendo posible el funcionamiento del biodigestor en el sector, el costo de fabricación del biodigestor puede llegar a ser de \$ 547 aproximadamente, siendo un precio accesible para las personas del sector.

Palabras clave: biogás, biodigestor, simulación, diseño, fermentación.

ABSTRACT

The purpose of this technological proposal is the thermal analysis of a biodigester capable of heating 100 l of sanitary water per day in the Píntag sector. The methodology used was the experimental design based on data obtained after the investigation and using the ANSYS Fluent CFD simulation software. Based on the analytical results, it was obtained that the amount of biogas that can be generated in the proposed design of the biodigester is 4.0375 m³, in the simulation, thanks to solar radiation, the biodigester can reach externally in the winter and summer seasons a temperature of 35 °C and 37 °C respectively, with these data obtained a second simulation was carried out where the temperature inside the bag was obtained where it reaches an approximate temperature of 35 °C, which, meets to carry out the mesophilic fermentation process, making possible the operation of the biodigester in the sector, the cost of manufacturing the biodigester can be approximately \$ 547, being an affordable price for people in the sector.

Keywords: *biogas, biodigester, simulation, design, fermentation.*

INTRODUCCIÓN

En la parroquia Píntag cercana al Valle de los Chillos, existen algunos poblados ganaderos que no cuentan con suficiente energía eléctrica ni suministro diario de gas para abastecer de agua a las familias para el aseo diario de sus integrantes, al tratarse de un área ubicada en la región andina, la temperatura ambiente varía entre los 9 °C y 20 °C.

La principal materia prima utilizada por los habitantes de la región es la leña misma que se utiliza con el propósito de cocer alimentos y el aseo personal, sin embargo, el proceso de combustión contamina el medio ambiente, sin contar que también representa un gasto significativo si se trata de una familia numerosa. Además, los combustibles fósiles son empleados como fuente de energía teniendo así el carbón y el petróleo, que suministran entre el 75 % y 85 % de la energía aprovechada. El suministro de combustibles fósiles es limitado y el uso de combustibles alternativos biológicos se vuelve imprescindible con el tiempo. Los biocombustibles incluyen el bioetanol, biomasa y biogás, que están menos contaminados por su uso y genera contaminación ambiental a menor escala además de ser una alternativa viable a la desaparición ya vulnerable de energías fósiles.

La presente propuesta plantea el diseño y simulación de un biodigestor capaz de calentar 100 l/día de agua sanitaria, partiendo de residuos orgánicos de ganado equino, bovino y vacuno por digestión anaerobia. Donde por falta de oxígeno los desechos ecológicos se convierten en biogás formando principalmente por metano evitando el uso de otras fuentes de calor como el GLP y leña, lo que reduce costos y contribuye además a la protección del medio ambiente.

El capítulo I recopila información sobre a la energía, fuentes de energía renovable y varios usos, componentes y alternativas para el biogás como el GLP y leña. El metano como componente principal de alimentación de un biodigestor contribuyen a la producción de energía como fuente de calor, equipos de refrigeración y desechos agrícolas. Los factores que influyen en el diseño del biodigestor como: temperatura, tiempo de retención y cambio climáticos se explican a detalle.

El capítulo II se estudian los parámetros que contribuyen al funcionamiento del biodigestor, así

como también factores geográficos y biológicos, además de considerar la temperatura ambiente y el interior del biodigestor, el tiempo de retención de acuerdo a la zona geográfica, la producción de estiércol fresco dependiendo del tipo y cantidad de ganado disponible, Formulando ecuaciones sobre la producción de biogás total entre los diferentes tipos de ganado.

El capítulo III abarca los parámetros de diseño y componentes del biodigestor, se detalla el material y ubicación de cada elemento, entrada y salida de materia orgánica, salida de biogás, válvula de seguridad, drenaje de agua y conducción de gas, para el diseño se utiliza el software SolidWorks. Describiendo las dimensiones del tanque de digestión, tuberías y carga de gas por cada materia orgánica finalmente definiendo la ubicación geográfica del biodigestor y asimismo localización del tanque respecto a la casa y al termotanque.

El capítulo IV se enfoca en la simulación y análisis del comportamiento térmico de los fluidos al interior del biodigestor la evaluación de este proceso se ejecuta en el software Fluent CFD. Se realizan los cálculos de consumo de gas de un termotanque, del volumen de líquido y gas por cada carga orgánica incluyendo producción de gas, sólidos totales y volátiles.

En el capítulo V se presenta la revisión económica del sector destacando la importancia de diferentes áreas como agricultura, ganadería, turismo, explotación minera y servicios financieros que contribuyen a la expansión de la zona, posteriormente se presenta un análisis del costo de ensamblaje del biodigestor y costo de equipo de calentamiento.

JUSTIFICACIÓN

En el sector de Píntag, la población suele comprar tanques de GLP doméstico para calentar el agua mediante el uso de un calefón que funciona con baterías, sin embargo, el transporte de estos tanques y la obtención de los mismos suponen un costo adicional, ya que se utiliza maquinaria para llegar al área explotada, esto requiere la creación de nuevos caminos, además de la pérdida en las áreas de explotación puede afectar a las cadenas alimentarias. Una alternativa al uso de GLP es el uso de biogás mismo que se puede producir con el empleo de un biodigestor casero cuya materia prima son los desechos orgánicos de ganado porcino, vacuno y equino gracias a que es una zona ganadera el acceso de la materia prima no implica mayor complicación. El manejo de residuos orgánicos es

técnicamente inadecuado, y al estar esparcidos por el terreno provoca condiciones insalubres por frecuentes pestes y enfermedades, resultando en desperdicio de excrementos.

Actualmente, la demanda de energía es enorme ya que, es necesaria para satisfacer los requerimientos de toda la población, lo que la convierte en un tema económico y ambiental, con la intención de solucionar la falta de agua sanitaria caliente se propone la implementación de un biodigestor casero que cumple con este proceso a partir de la generación de gas metano producido por la fermentación anaeróbica de desechos orgánicos, además al emplear desechos orgánicos se contribuye al medio ambiente.

Para facilitar el mejor aprovechamiento de estos residuos, evitar problemas ambientales y de salud, es importante dar a conocer a las personas este tipo de proyectos de captación y extracción de biogás, de fácil disponibilidad en la zona de trabajo, porque además de reducir el efecto invernadero que producen las excretas descomponerse al aire libre, produce también fertilizante que se utiliza en los cultivos, reduciendo así la cantidad de compostaje y promoviendo la agricultura orgánica.

Al final del proceso de dimensionamiento, se puede usar los valores obtenidos para establecer una relación proporcional y determinar si el uso de biogás es más económico con relación al empleo de GLP, leña y otros sistemas de calentamiento.

OBJETIVOS

Objetivo general

Diseñar y simular térmicamente un biodigestor con capacidad de calentamiento 100 l/día de agua sanitaria.

Objetivos específicos

- Identificar los factores ambientales y meteorológicos que influyen en la producción de biogás con relación al tiempo de descomposición de la materia orgánica.

- Diseñar un biodigestor para calentamiento de 100 l/día de agua sanitaria.
- Validar los resultados analíticos del diseño mediante simulación en un software especializado.
- Evaluar la factibilidad económica y accesibilidad de la población para la implementación de un sistema de biodigestión casero.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES DE LA ENERGÍA RENOVABLE

En este capítulo se abordarán términos relacionados al diseño de un biodigestor y los elementos que lo componen, además de conceptos relacionados a la producción de biogás y fuentes de energía alternativa.

1.1. Energía

La energía se encuentra en cualquier forma esto significa que, se puede obtener de cualquier elemento o producto, ya sea natural o artificial.

En las estadísticas energéticas sólo se incluyen los datos derivados de la "energía" donde se menciona el calor o electricidad producidos [1].

Las fuentes energéticas son primarias y secundarias. Estas se diferencian en que la primaria se obtiene de manera natural en su forma base, mientras que la secundaria se obtiene siempre por conversión de energía a partir de otras primarias o secundarias [1].

1.1.1. Fuentes de energía renovable

Se define como un recurso que no altera el equilibrio térmico de la Tierra, produce residuos reciclables, buscando mantener un nivel igual o superior a la energía recuperada de las materias primas utilizadas [1].

Biomasa. La biomasa se refiere al uso de materiales orgánicos para la producción de energía. Debido a su amplia definición, la biomasa incluye una gran variedad de materiales orgánicos de origen y composición heterogéneos. La biomasa procede de los residuos agrícolas y animales, de las aguas residuales y del alcantarillado. Se utiliza en procesos termoquímicos y bioquímicos para producir combustibles sólidos, líquidos y gaseosos adecuados para su uso en diversos sectores energéticos. Las alternativas al uso de biomasa para la preparación de alimentos varían entre leña, carbón y GLP doméstico [1].

Biogás. Es la consecuencia de la fermentación anaeróbica de desechos orgánicos, es un combustible natural no fosilizado que depende de la cantidad de metano para determinar su poder

calorífico [2]. En este sentido, el poder calorífico del biogás es muy útil en este ámbito ya que, puede sustituir a los combustibles convencionales con la misma función y presenta ventajas para el consumidor [3].

Aplicaciones del biogás como fuente de energía. La generación de calor y electricidad mediante combustión son los principales usos del biogás. Los aparatos domésticos térmicos se utilizan para generar calor, mientras que los motores térmicos se utilizan para generar electricidad. Los motores comúnmente utilizados como fuentes de gas son los de combustión interna, ya que son más eficientes que las turbinas de gas y las turbinas pequeñas [4].

Componentes del biogás. Es una combinación gasificada compuesta principalmente por CH_4 , CO_2 y mínimas cantidades de diferentes gases como: ácido sulfhídrico, hidrógeno y amoníaco. Puede utilizarse como recurso energético en la generación de calor y electricidad que aportan iluminación y calefacción, como gas doméstico, como combustible para coches, maquinaria agrícola y bombas hidráulicas y para hacer funcionar motores en lugar de gasolinay diésel [2].

Problemas del biogás. El principal inconveniente del biogás es la presencia de sulfuro de hidrógeno (H_2S) en su composición, que es muy corrosivo y puede dañar los equipos que utilizan este combustible. La Tabla 1 muestra los valores más altos permitidos de sulfuro de hidrógeno para los principales elementos donde se utiliza el biogás [4].

Tabla 1. Valores máximos admisibles de determinados elementos para el sulfuro de hidrógeno [4].

Técnica	Valores máximos admisibles H_2S (ppm)
Calefacción (calderas) y Motores Stirling	<1000
Estufas de cocina	<10
Motores combustión interna	<500
Turbinas	<10000
Micro-turbinas	<70000

Pilas de combustible

PEM	<1
PAFC	<20
MCFC	<10
SOFC	<1

1.2. Alternativas al uso de biogás

Por muchos años las personas han usado diferentes tipos de fuentes energéticas para calentar agua, o cocer alimentos, muchas veces por falta de presupuesto o por no tener una disponibilidad estable de ciertos servicios básicos como la electricidad, sin embargo, estas a pesar de ser económicamente ventajosas pueden a su vez tener ciertos problemas al momento de usarlos.

1.2.1. Leña

Su fuente de energía son los recursos forestales, a excepción de los productos de desecho del bosque denominados material vegetal, que también se procesan como energía. La energía obtenida de la leña se conoce como dendroenergía [1].

Problemas con el uso de leña como combustible. Las desventajas del uso de la leña como combustible son las altas cantidades de álcalis, de humedad y heterogeneidad del material, que puede provocar la emisión de monóxido de carbono y otras sustancias no combustibles a la atmósfera. Otros elementos producidos por la combustión de la madera son los aldehídos, los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), compuestos volátiles como las dioxinas, que están clasificados como mutagénicos y tienen un tamaño de partícula inferior a 10 micras y, por tanto, están fácilmente disponibles en el aire. La OMS informa que cocinar con leña se ha relacionado con la tuberculosis o ciertos tipos de cáncer, incluidos los cánceres de nasofaringe, laringe y vías respiratorias [5]. Debido a la emisión de monóxido de carbono que producen las estufas de leña que son entre 10 y 180 gramos por kilo de leña, afectan al torrente sanguíneo reduciendo niveles de oxígeno, efectos en el corazón e incluso pueden provocar un coma, daños cerebrales e incluso la muerte [5].

Aprovechamiento de leña y su impacto en zonas forestales del país. Ecuador cuenta con abundantes áreas naturales, sin embargo, la pérdida en la cobertura de los bosques es significativa. Las autoridades ambientales estiman que, cada año la variabilidad de la capa forestal en el Ecuador continental entre 2008 y 2014 fue del - 0.37 %. Esto responde a una tala media anual de 47497 ha. Según la FAO, Ecuador es el quinto país de Sudamérica con mayor índice de deforestación. Sin embargo, la información sobre los bosques sigue siendo dispersa, obsoleta, escasa e incoherente [6].

1.2.2. Gas natural

Es una amalgama de carburantes gasificados, considerándose un fuerte emisor de gases producto de la retención de calor solar en el proceso de uso y transporte. Incluye el gas libre y el gas aliado.

El gas aliado es una mezcla gasificada producida a partir de carburantes del petróleo crudo y también se denomina gas húmedo porque contiene pequeñas cantidades de hidrocarburos líquidos ligeros. El gas libre se distingue del anterior debido a que su componente principales el metano [1].

Gas licuado de petróleo como combustible. El GLP se produce en el refinado del petróleo crudo y es uno de los muchos subproductos. Se trata de un conjunto de compuestos orgánicos ligeros formados principalmente por C_3H_8 y C_4H_{10} , que son compuestos orgánicos que normalmente se encuentran en las proporciones de 70 % - 30 % o 60 % - 40 % según el producto que se pretenda obtener. Este derivado del petróleo, que tiene un alto poder calorífico y una densidad superior a la del aire, se utiliza en la cocina, la calefacción doméstica, como combustible para motores y refrigerante, y como combustible para hornos, secadoras y calderas en diversas industrias. También se utiliza para generar electricidad en motores térmicos [7].

Importaciones y subsidio de GLP. En el caso del GLP, la producción sólo alcanza el 20 % de la demanda, por lo que hay que compensar la diferencia con la reintroducción. Está vinculado al costo del petróleo en el mercado internacional. En 2020, Ecuador pierde unos \$ 136330000 anuales por la importación de GLP. En 2021, la diferencia entre las ventas nacionales y las importaciones de GLP será de \$ 207780000, lo que supone un aumento del 155 % respecto a

2020 siendo esta la principal razón del aumento en el precio de barril de petróleo. Desde enero de 2021 hasta junio de 2021, el precio del barril para la venta interna de GLP en Ecuador será de \$ 13.60 y el precio para la importación será de \$ 46.10, una diferencia de \$ 32.50 por barril. Las mayores fluctuaciones de precios se produjeron en 2021. Aunque todos los derivados del petróleo dejan su huella en el país, el GLP es el que más repercute negativamente con un diferencial de 41.2 %, seguido del gasóleo con 37.7 % y la gasolina de alto octanaje con 21.1 %. Para compensar el alto coste de las importaciones, el país tuvo que subvencionar el GLP a los consumidores ecuatorianos a \$ 44.4 por barril en septiembre de 2021, lo que supuso una pérdida de \$ 47155 millones [8].

Desventajas del uso de GLP como combustible. Los costes para producir e importar GLP son muy elevados en comparación con el precio de venta al consumidor, ya que el coste de producción es de \$ 12 y el de importación de \$ 15, mientras que el precio de venta es de \$1.60, lo que supone una subvención. Al tipo de cambio actual de \$ 6505 [8]. En cuanto a la supresión de la subvención del GLP, si el gobierno decide eliminar la subvención del gas nacional, alrededor del 0.76 % de la población obtendrá el gas gratis y el problema afectará a la pobreza de los grupos más vulnerables. Hay que tener en cuenta que las ollas que utilizan GLP suponen un gran riesgo para la vida humana debido a la mala manipulación de las bombonas [9].

1.3. Biodigestión

Proceso de degradación de desechos orgánicos por diferentes familias de bacterias, dependiendo de la presencia de oxígeno en esta etapa. Este proceso distingue entre biodigestión aeróbica y anaeróbica [10].

1.3.1. Biodigestión aeróbica

Proceso de reciclaje de residuos orgánicos donde se utiliza como sustrato de crecimiento para las bacterias aeróbicas. De esta manera los residuos se reducen al mínimo. Los resultados son:

- Encontrar el CO₂, H₂O y el abono con las condiciones adecuadas de pH.
- La reducción simultánea de los sólidos volátiles.
- Suspensión (VSS) debido a la aireación a largo plazo.

Principalmente en el manejo de aguas residuales debido a la presencia de aire en el ambiente.

1.3.2. Biodigestión anaeróbica

Se trata de un proceso con ausencia de oxígeno, cuyo producto es la descomposición de sustratos del CO₂ y CH₄. Durante el proceso de degradación, parte del carbono se oxida y se convierte en CO₂ y parte de él se reduce a CH₄. Es un proceso orgánico conocido como catabolismo, donde se distingue la disminución de diferentes elementos en su forma más simple y la descomposición de moléculas complejas [10].

La separación del metano de estiércol animal y otros elementos como excedentes del tratamiento de desperdicios animales, mediante la digestión anaeróbica tiene muchos beneficios: reducción de la liberación de gases producto de la retención de calor solar, reducción en la explotación de combustibles fósiles y reducción de materia orgánica en los vertederos. Además, la obtención de gas natural representa un ahorro económico para los agricultores [11].

Etapas de la digestión. Existen cuatro subprocesos: hidrólisis, producción de ácido, acetogénesis y metanogénesis, cada uno de estos subprocesos tiene una colonia bacteriana diferente según la función catabólica del carbono, así [10]:

- **Bacterias acidogénicas:** Es responsable de la putrefacción de los ácidos grasos, así como, de la producción de hidrógeno y ácidos volátiles. Es una bacteria de crecimiento rápido con un tiempo de duplicación de 30 minutos.
- **Bacterias acetogénicas:** Degrada compuestos simples y de carbono. Cuando se hidroliza el policarbonato, se produce ácido acético, donde crece lentamente con un tiempo de duplicación entre 1.5 a 4 días.
- **Bacterias metanogénicas:** Descomponen el ácido acético y los compuestos de carbono simples para producir metano. Estas bacterias se desarrollan lentamente. El tiempo de duplicación es de 4 a 6 días.
- **Bacterias hidrogenotróficas:** El dióxido de carbono se reduce a metano mediante hidrógeno.

Hidrólisis. En este proceso, las partículas de cadena larga y moléculas compuestas se

descomponen e hidrolizan mediante enzimas que se encuentran fuera de las células producidas por bacterias fermentadoras. La fase de hidrólisis es un proceso condicionante en general, dependiendo de la temperatura de hidrólisis, del tiempo de residencia en el medio hídrico, de la estructura del sustrato, del pH y de la concentración de metano, principalmente en residuos sólidos [11]. La hidrólisis es, pues, la conversión de los polímeros en los correspondientes monómeros, lo que permite a las bacterias captar la materia orgánica del alimento [11].

Acidogénesis. En esta fase, los productos intermedios del proceso de hidrólisis se convierten en compuestos de peso molecular intermedio, como ácido acético, H_2 y CO_2 , alcoholes grasos, CH_3NH_2 , NH_3 y H_2S [12]. Las bacterias se multiplican rápidamente. En la primera etapa, la DQO del sustrato no se reduce significativamente, ya que las cadenas biológicas más complejas se convierten en otras más cortas sin consumir ni reducir los compuestos orgánicos existentes [11].

Acetogénesis. El alcohol, ácidos grasos y sustancias químicas aromáticas se descomponen en ácido acético. El $CH-COOH$, el H_2 y el CO_2 se liberan como sustratos para las bacterias patógenas. Esta reacción se produce de forma espontánea o requiere energía [13]. Una mínima concentración de resultados finales de los productos activa las reacciones y actividades de dichas bacterias, de modo que la descomposición puede tener lugar mientras se mantiene el equilibrio energético [11].

Metanogénesis. Esta es la parte final de la formación de metano, que se reduce a tres precursores, los productos resultantes de la digestión anaeróbica: CO_2 , compuestos metilados y acetato. Los metanógenos son bacterias anaerobias y son muy sensibles al oxígeno. Cuando el dióxido de carbono se utiliza como precursor de los productos intermedios de metano conocidos como hidrófilos o intermedios hidrofílicos, el H_2 es el principal donante de electrones. El último grupo de bacterias que convierten los ácidos orgánicos en CH_4 y CO_2 son los microorganismos anaerobios metanogénicos [12]. Los más importantes son los convertidores de ácido propiónico y acético, los llamados metanógenos, que escinden el ácido acético. Un grupo adicional de microorganismos metanogénicos e hidrofílicos absorben el hidrógeno producido en la primera parte de la reacción convirtiéndolo en biogás. Estas bacterias son el pilar de una reacción ambiental equilibrada, ya que la creciente de hidrógeno altera la digestión biológica de la materia orgánica. Para producir suficiente biogás, las poblaciones de bacterias acidogénicas y metanogénicas deben

estar en equilibrio [11]. En los digestores de bajo costo, esto se regula mediante la proporción correcta de estiércol o bioalcohol en el afluente.

1.4. Propiedades de la mezcla

Los microorganismos involucrados en cualquier etapa tienen varias características, entre ellas la tasa de expansión, la susceptibilidad a sustancias específicas y el calor. La tasa de crecimiento de los metanógenos es una quinta parte de la del acetógeno, y se dice que es susceptible a los cambios de temperatura. En el medio anaerobio los principales sustratos disponibles son el CO₂ y ácido acético, sin embargo, el metanol y metilaminas se transforman también en CH₄ [14].

El 70 % del gas natural generado en biodigestores anaeróbicos es producto de la descarboxilación del acetato. El metano sobrante se deriva de materia como ácido carbónico, metanoico y alcohol metílico [15]. Cuando se trata de las fases de la asimilación anaerobia, la producción de biogás depende, principalmente de la composición del sustrato, propiedades como: solubilidad, granulometría, biodegradabilidad, concentración y composición química, son consideradas como imprescindibles.

La generación de biometano se condiciona a las proporciones de grasa, globulina, hidratos de carbono y otros nutrientes presentes en la biomasa, teniendo la biomasa mayor contenido de lípidos y menor contenido de compuestos de hemicelulosa cuanto mayor sea la producción de biogás [14].

1.4.1. Enlace carbono-nitrógeno

Materias como estiércol, pastizales o residuos de frutas o vegetales, están formados por materia orgánica, con elementos con un mayor porcentaje de carbono como la celulosa que tarda más tiempo en descomponerse y que reacciona con la produciendo biogás durante un periodo de tiempo más largo. El carbono y el nitrógeno constituyen la principal fuente de alimento para los microorganismos metanogénicos. El carbono actúa como proveedor de energía, en tanto que el nitrógeno favorece a la creación de células auxiliares.

1.5. Biodigestor

Se trata de tanques cerrados donde se almacenan residuos en una mezcla de agua y se descomponen

omitiendo la presencia de oxígeno para producir biogás. Determinado por la forma del sistema los factores ambientales, el entorno y su uso [3].

Se pueden utilizar depósitos cilíndricos, rectangulares, esféricos y semiesféricos para designar cualquier forma, etiquetados según las preferencias del usuario y las plantas prefabricadas [3].

No obstante, de manera física y técnica, los depósitos rectangulares no son recomendables. Esto se debe a que requieren más material de construcción y crean zonas de diferente composición y temperatura en el digestor que dificultan el reflujo del sistema superior [3].

1.5.1. Tipos de biodigestores

Biodigestores de globo. En la parte superior se encuentra un digestor de bolsa, allí se conserva el gas, la entrada y salida comparten la misma región superior de la bolsa, como se observa en la Figura 1. Un bajo costo, fácil transportación y limpieza, temperaturas altas de digestión y poca sofisticación de construcción son algunas de las ventajas que este sistema ofrece, cuando se requiere el uso del biogás se aplica una mínima presión sobre la bolsa de almacenamiento, permitiendo el flujo de este [3].



Figura 1. Biodigestor de globo [3].

Biodigestor de domo fijo. Se caracteriza por poseer un contenedor estático para el almacenamiento del biogás como se puede observar en la Figura 2, éste se ubica en la parte

superior, en la producción del gas la mezcla se dirige al depósito de compensación, al aumentar la presión del biogás, el volumen del mismo aumenta [3].

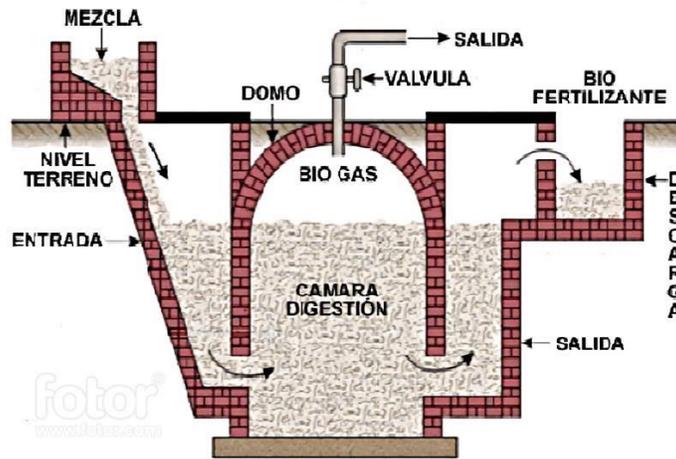


Figura 2. Biodigestor de domo fijo [3].

Biodigestor de tambor flotante. A diferencia del biodigestor de domo fijo este se encuentra formado por un recipiente móvil en el tramo superior, representado en la Figura 3, flotando sobre la mezcla de fermentación de acuerdo a la cantidad de biogás que este acumulado en el digestor, en este caso la presión del gas es constante [3].

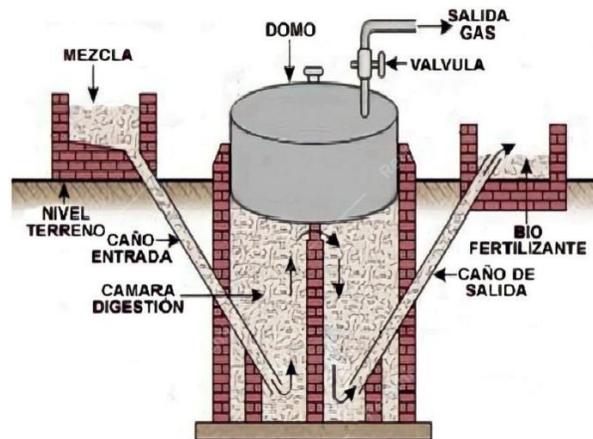


Figura 3. Biodigestor de tambor flotante [3].

1.6. Aportes del biodigestor

Un biodigestor se ha convertido en una herramienta polivalente facultando a los productores en

múltiples aspectos desde enfoques específicos. A continuación, se amplían diversos temas donde el biodigestor beneficia a la producción agrícola y ganadera [16].

1.6.1. Biodigestor y producción de combustible

Los biodigestores están reconocidos para la producción de biogás, cuya generación permite al usuario cocinar alimentos, así como otros fines entre ellos alimentar máquinas mecánicas, molinos, bombas de agua y producir electricidad para consumo propio. El acceso a la energía generada por los productores contribuye a la soberanía energética [16].

1.6.2. Biodigestor y producción de fertilizante

Se trata del uso del biol, un fertilizante líquido producido en el biodigestor, el aprovechamiento de este fertilizante representa el reciclaje de nutrientes haciendo del suelo un terreno independiente de los productos agroquímicos, esto permite al productor fertilizar sus campos, reduciendo costes y agregando a su producto un valor extra a través de un manejo orgánico y sostenible [16].

1.6.3. Biodigestor y sistema de tratamiento

La digestión anaerobia se encarga de equilibrar los desechos orgánicos mediante un tratamiento de residuos correcto, de esta manera el sistema ofrece un servicio ecológico, garantizando productos visibles como: el biogás y el biol, frente a otros procedimientos que suelen aportar únicamente el componente de fertilización [16].

1.7. Usos del biogás

Es una alternativa muy viable al gas natural. En este sentido, el biogás puede utilizarse para el transporte de algunos vehículos, como los autobuses urbanos y los vehículos de ruedas. Por otro lado, también puede utilizarse para la calefacción de espacios, proporcionando calefacción y agua caliente en forma de combustión de gas natural si es necesario [17].

1.7.1. Generación de energía

A diferencia de la energía eólica, que sólo puede utilizarse durante el día, o de la energía solar, que sólo puede utilizarse durante el día, el biogás puede producirse de forma fiable en los campos durante

un largo periodo de tiempo. La electricidad generada a partir del biogás se produce con la transformación de energía química a energía mecánica, misma que puede utilizarse tanto en un hogar como a nivel del mercado, ya que puede producirse a gran escala o utilizarse para aplicaciones específicas [18].

1.7.2. Transformación de biogás en biometano

El biogás se convierte en biometano eliminando el CO₂, H₂O, H₂S y contaminantes de los residuos. Este proceso permite transportar el gas natural renovable a través de gasoductos [18].

1.7.3. Combustible para cocinas de gas domésticas

Al igual que el gas natural es capaz de alimentar el motor de un auto, el biogás también puede emplearse para la iluminación o las cocinas de gas en el hogar. Esto no sólo reduce el impacto medioambiental del uso de madera como combustible, reduciendo la explotación de elementos derivados del petróleo [18].

Los motores de combustión interna son generadores portátiles que utilizan el calor como fuente energética. La mayoría de las viviendas unifamiliares que utilizan estos motores pueden configurarse para utilizar biogás, como gas natural o propano [19].

1.7.4. Refrigeración

El biogás puede utilizarse en enfriadores de absorción que funcionan con propano o petróleo, por lo que el quemador puede alimentarse con biogás. Los enfriadores de 12 pies tienen un consumo de biogás de 120 a 150 l/h [19].

1.7.5. Calefacción

En la producción agrícola, el biogás se utiliza en las explotaciones avícolas y porcinas, en los calentadores de agua y secadores de grano permitiendo la conversión del biogás en electricidad para las pilas de combustible [19].

1.7.6. Conversión de biogás en electricidad para celdas de combustible

Quemar el gas permite calentar células especiales permitiendo el trabajo de las celdas de

combustible. Este proceso requiere un gas muy limpio y unas celdas muy caras, pero es una herramienta con gran potencial para aumentar el calor en su hogar [19].

1.7.7. Gestión de residuos en el sector agrícola

Otro método de tratamiento de la biomasa vegetal es la digestión anaeróbica con estiércol. Este proceso produce biogás que reduce la emanación de nitrógeno, gases provocados por la retención de calor solar y estiércol, promoviendo el reciclaje de nutrientes en los procesos agrícolas [13].

1.7.8. Suministro de calefacción y aparatos eléctricos

El biogás puede utilizarse para alimentar el motor de combustión de una central de cogeneración. Sin embargo, la instalación de una planta de cogeneración puede requerir una inversión adicional [19].

1.8. Factores que inciden en el bosquejo de un biodigestor

La producción de biogás se determina en virtud de factores ambientales y geográficos de la zona donde se construirá, con el fin de precisar si su construcción es viable o no conviene realizarla.

1.8.1. Factores físicos.

También conocidos como factores abióticos son la temperatura, humedad, agua y composición del suelo. La temperatura supone un impacto en el desarrollo bioquímico de los organismos vivos, el agua es esencial para los vegetales y animales terrestres misma que se condiciona a la cantidad de lluvia, el viento proporciona humedad o sequedad a la zona geográfica.

Agua. Píntag cuenta con el reservorio del volcán Antisana como primera fuente de abastecimiento y la segunda proviene de los depósitos de la EPMAPS, sirviendo la primera como suministro para la ciudad de Quito.

Temperatura. Es uno de los agentes que contribuyen a la obtención de biogás. Las bacterias anaerobias pueden ser activas en tres ambientes, en la Tabla 2 se especifica los tipos de fermentación anaeróbica de acuerdo a la temperatura y al tiempo de fermentación [17].

Tabla 2. Rango de tiempo y temperatura para la digestión anaeróbica [20].

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

Se ha comprobado que la producción de biogás se produce más rápidamente en un entorno termófilo. La experiencia de producir biogás en un entorno termófilo de 25 °C a 45 °C, es importante porque no requiere un complejo sistema de calentamiento, que modifica el coste de la producción de biogás [15].

Tiempo de retención. Esto depende del número de días que una determinada cantidad de residuos permanezca en el digestor y de la temperatura ambiente en el lugar, de modo que las temperaturas más altas conducen a tiempos de retención más cortos y las temperaturas más bajas a tiempos de retención más largos [15].

Cambio climático. El porcentaje de carbono extraído de la atmósfera y convertido en un nuevo componente orgánico durante un periodo de tiempo mide la biomasa producida. Está estrechamente relacionada con el tipo de ecosistema y su dinámica. Por lo tanto, el entendimiento que se tiene sobre la distribución de la biomasa en los bosques posibilita determinar el carbono obtenido de las reservas, sumideros y su variabilidad en el tiempo, así como diferentes aspectos de la biomasa forestal [21]. Hay pruebas científicas acerca de los cambios en las variables climáticas están contribuyendo a la disminución de la producción de biomasa. Por ejemplo, a escala mundial, los cambios en la producción de biomasa de los biomas terrestres se ven afectados notoriamente por la influencia del clima. Sin embargo, también hay pruebas donde los cambios en la producción de biomasa están impulsados por factores como las actividades humanas que afectan de manera significativa a las zonas forestales [21].

1.8.2. Factores biológicos

También conocidos como agentes biológicos, agrupan plantas, animales y microorganismos, es decir, todos los seres vivos en un mismo ambiente. Los microorganismos fortalecen el suelo y las plantas brindan protección compitiendo por agua y nutrientes.

Desechos orgánicos. La producción agrícola genera un notable porcentaje de desechos orgánicos así: los desechos campo representan un 60 %, mientras que, los desechos excedentes se estiman entre 20 % y 40 %.

Desechos agrícolas. En la agroindustria los relaves son esparcidos en la tierra, sin embargo, para salvaguardar el terreno del deterioro es indispensable almacenar una cantidad de biomasa para la obtención de energía.

Desechos animales. Las zonas ganaderas generan un creciente volumen de desperdicios frescos a modo de estiércol animal, con frecuencia estos residuos son esparcidos en los campos de cultivo con el propósito de obtener una doble ventaja en valor nutritivo. No obstante, la excesiva cantidad de desechos animales puede provocar la contaminación de cuencas hidrográficas.

1.9. Normativa ambiental

Los trabajos medioambientales se rigen sobre una base legal, con respeto a la naturaleza y cumpliendo todas las reglas estipuladas en la legislatura del Ecuador.

1.9.1. Constitución de la República del Ecuador

Art.3. Deberes primordiales del estado, numeral 7.- “Proteger el patrimonio natural y cultural del país”

Art.74. “Las personas, comunidades, pueblos y nacionalidades tendrán derecho a beneficiarse del ambiente y de las riquezas naturales que les permitan el buen vivir”.

1.9.2. Estrategias de remediación para territorios contaminados.

Para prevenir la contaminación en distintos recursos naturales es necesario conocer las estrategias de descontaminación de los mismos.

Prevención de contaminación del suelo. Se origina a partir de las prácticas, manejos correctos y las ingenierías enfocadas a cada proceso de producción. Evitando así propagar los problemas de la contaminación de agua y aire al suelo.

Disposición de derechos pecuarios. Los desechos ganaderos que proviene de granjas, especializadas en ganadería porcina, avícola, bovina y aquellos establecimientos que consideren las autoridades ambientales que deban ser tratados de manera óptima, con el objetivo de evadir la contaminación por microorganismos al suelo.

Polución o contaminación del agua. Las condiciones del agua se ven afectadas por la presencia de contaminantes por encima o por debajo de las concentraciones especificadas en la normativa vigente. A la hora de determinar los residuos en las explotaciones porcinas, éstas deben ser consideradas como base para identificar y evaluar el impacto en los recursos hídricos [22].

CAPÍTULO II

DESARROLLO METODOLÓGICO DEL PROCESO DE BIODIGESTIÓN

El capítulo detalla los criterios de funcionamiento de un biodigestor, modelo ideal, software especializado y análisis de posibles soluciones frente a inconvenientes que se presenten durante la simulación.

La generación de biogás parte de un proceso de acciones combinadas de microorganismos expertos en la degradación de materiales orgánicos. La descomposición de los desechos orgánicos se da de manera natural o con el empleo de reactores específicos y bajo entornos de anoxia, es decir, en ausencia de oxígeno.

2.1. Parámetros que influyen en el funcionamiento del biodigestor

Dentro del proceso de diseño de un biodigestor se presentan varios factores a considerar como: la zona geográfica, la rentabilidad de ejecución, disponibilidad de materia orgánica, entre otras.

Un biodigestor es un aparato diseñado para perfeccionar la producción de biogás usando como materia prima desperdicios orgánicos, estiércol, entre otros, haciendo más fácil la obtención de energía limpia a bajo precio siendo una fuente renovable [23].

Se explican criterios involucrados con la productividad de un biodigestor como componentes químicos, físicos y biológicos que participa en el proceso.

2.1.1. Factores geográficos

La zona para el estudio será la parroquia Píntag que se encuentra al suroriente del Distrito Metropolitano de Quito. Este sector se caracteriza principalmente por su clima frío, la temperatura promedio se estima en 15 °C presentando mínimos de 9 °C y máximos de 20 °C. Se encuentra a una altura de 2400 msnm. Su precipitación fluvial tiene una fluctuación que se encuentra en el rango de 500 a 2000 mm que se reparten en dos temporadas de lluvia.

2.2. Factores de funcionamiento de un biodigestor

Los factores a considerar se expresan de la siguiente manera: la temperatura dentro de la cápsula,

la fase gaseosa y la fase líquida de la biomasa al interior del biodigestor, volumen del gas y consumo de gas diario.

2.2.1. Temperatura

La temperatura ambiental en la zona de estudio oscila entre 9 °C – 20 °C dependiendo de la temporada y la hora del día este factor varía así, como se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3. Temperatura promedio en la parroquia Píntag de acuerdo a la temporada.

Hora del día	Invierno	Verano
Mañana	10 °C	15 °C
Tarde	16 °C	19 °C
Noche	9 °C	12 °C

2.2.2. Tiempo de retención

El tiempo de retención de los desechos en fermentación asegura una producción efectiva de biogás y va de acuerdo a la región al tratarse de regiones cálidas con inviernos cortos en un periodo de 40 a 60 días, el biodigestor opera en un régimen transitorio ya que la temperatura al interior de la cápsula variará de acuerdo al clima y la cantidad de radiación solar que recibe.

2.2.3. Producción de estiércol fresco

Para determinar la cantidad de material orgánico obtenida diariamente es preciso conocer el tipo de ganado y la cantidad de estiércol que este produce. Teniendo así que el ganado porcino ofrece una disponibilidad de 2.25 kg/día, mientras que el ganado equino y bovino ofrecen la misma disponibilidad y volumen de biogás así: disponibilidad de 10 kg/día.

2.3. Cálculos para determinar la cantidad de biogás

El volumen de la cápsula está determinado por la cantidad de biogás que se genera diariamente por carga de materia orgánica, además de conocer la cantidad de gas necesaria para el equipo de

calentamiento del agua sanitaria, como puede ser un termotanque a gas y comprobar cuál conviene más para la construcción del biodigestor.

2.3.1. Consumo de gas en cada equipo de calentamiento

Para determinar el consumo de gas que utiliza un equipo de calentamiento es necesario conocer la potencia del equipo y el poder calorífico del gas, haciendo una relación entre estos dos datos se obtiene la Ecuación 1:

$$Q = \frac{P}{PCS} \quad (1)$$

Donde:

Q: Cantidad de gas consumido, [m^3/h]

P: Potencia del equipo de calentamiento, [kW]

PCS: Poder calorífico del gas, [$kW \cdot h/m^3$]

2.4. Volumen de líquido y gas por cada carga de materia orgánica

Se estima el valor de los volúmenes de líquido de acuerdo al porcentaje de materia biológica que se obtiene diariamente y con la relación con la mezcla de agua. La relación estiércol-agua se establece como 1:4 todos los días el biodigestor deberá ser cargado con esta una parte de materia orgánica por 4 de agua para que el flujo sea continuo al interior del biodigestor, si la relación fuese más baja el material orgánico puede llegar a quedarse en el interior del biodigestor por lo cual se deberá reemplazar la bolsa de biodigestión.

Para el volumen líquido se requiere la Ecuación 2:

$$V_L = \text{Carga diaria} \cdot \text{Tiempo de retención} \quad (2)$$

En la Ecuación 3, el volumen de gas de la mezcla representa un 25 % de la cantidad volumétrica total por ello, para obtener este valor se divide la cantidad de volumen líquido entre 3.

$$V_G = \frac{V_L}{3} \quad (3)$$

2.4.1. Producción de biogás

Se puede estimar el valor aproximado de biogás que se dispone a partir de la materia orgánica que se recolecta a diario, mediante el cálculo de sólidos tanto totales como volátiles.

2.4.2. Sólidos totales

Los sólidos totales, van de acuerdo a un cierto porcentaje de la materia orgánica que va en un rango desde el 13 % a un 20 % para un cálculo más óptimo se lo hace en un 17 % que será el peso del estiércol seco, con relación al volumen líquido de la mezcla, como se detalla en la Ecuación 4.

$$ST = \frac{Carga\ diaria \cdot 0.17}{V_L} \quad (4)$$

Donde:

ST: Sólidos totales, [kg/m^3]

V_L : Volumen líquido de la mezcla, [m^3]

2.4.3. Sólidos volátiles

Este valor es aproximadamente al 77 % de los sólidos totales que se obtiene al día, como se muestra en la Ecuación 5.

$$SV = ST \cdot 0.77 \quad (5)$$

Donde:

SV: Sólidos volátiles, [kg/m^3]

El factor de producción para el caso de los cerdos está entre el 0.25 y el 0.5, siendo el más óptimo el de 0.39 y en el caso de vacas y caballos el factor se encuentra entre el 0.25 y 0.3 donde el más factible es el valor de 0.27, con todos estos valores se puede obtener la producción estimada de gas diario por tipo de ganado con la Ecuación 6:

$$PB = Factor\ de\ producción \cdot SV \quad (6)$$

2.4.4. Nivel de sólidos totales y sólidos volátiles

En la función del nivel de la mezcla de agua y biomasa se obtiene el material de sólidos totales disponibles en el sistema anaerobio, a partir de ellos se describe como húmeda o seca. Se clasifican en tres grupos distintos según el índice de ST presente en el compuesto así: proceso húmedo $\leq 100\%$ ST, proceso semiseco entre 10% a 20% ST y proceso seco $\geq 20\%$ de ST [24].

Sobre la producción de biogás, la circulación de los microorganismos metanogénicos se muestra cada vez más afectada debido a un aumento en el material de sólidos del sustrato, por esta razón la degradabilidad se reduce a causa de la dificultad de acceso a la fuente de biogás para las bacterias para alimentarse [24].

Densidad: Es la masa por unidad de volumen de una sustancia dada y generalmente se determina en kg/cm^3 , kg/m^3 . Mientras que en la Ecuación 7 la densidad aparente evalúa los componentes sólidos, líquidos y gaseosos de un material, la densidad de partículas solo aborda los sólidos [25].

$$\rho = 0,0367 \cdot ST^3 - 2.38 \cdot ST^2 + 14.6 \cdot ST + 1000 \quad (7)$$

Calor específico y conductividad térmica de la mezcla: De acuerdo a los estudios de Achkari-Begdouri y Goodrich se puede obtener el calor específico y conductividad térmica de acuerdo al índice de sólidos totales producidos en la mezcla, como se detalla en la Ecuación 8 y 9.

$$Cp = 4187.5 - 28.9 \cdot ST \quad (8)$$

$$k = 0.6173 - 0.0069 \cdot ST \quad (9)$$

Donde:

ρ : Densidad, [kg/m^3]

Cp : Calor específico del material, [$\text{J/kg} \cdot \text{K}$]

k : Conductividad térmica, [$\text{W/m} \cdot \text{K}$]

ST: Sólidos totales en la mezcla [%]

2.5. Softwares especializados

El uso de un software especializado para diseñar y simular un biodigestor es una decisión muy importante. Previamente se definirá para qué y quién usará estas aplicaciones, facilitando la gestión de unidades de procesos interdependientes, comprobando el comportamiento de estas unidades de acuerdo a las condiciones ambientales y geográficas. Cada software incluye modelos matemáticos que detallan la ejecución de cada proceso.

2.5.1. Software ANSYS Fluent CFD

Para el caso de la simulación térmica del biodigestor el software ANSYS Fluent CFD es una buena opción dado que, este ofrece la posibilidad de simular fluidos, en diferentes condiciones además de poder obtener diferentes datos como: temperatura, presión, turbulencia, etc. Debido a que se quiere conocer los datos térmicos del biogás y de la mezcla líquida al interior del tanque de biodigestión.

2.5.2. Software SolidWorks

Por su parte este software facilita la creación del modelo debido a su variedad de herramientas para diseño tanto en 2D como en 3D, en él se puede dibujar el bosquejo del tanque donde se va a producir el biogás, se puede realizar el dibujo del terreno donde se va a colocar el biodigestor, y el sistema de tubería para el transporte del biogás.

CAPÍTULO III

DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CON CAPACIDAD PARA CALENTAR 100 l/día DE AGUA SANITARIA

El capítulo III describe los criterios de diseño de un biodigestor analizando la utilidad y facilidad de construcción de acuerdo a la ubicación geográfica de la zona, se detalla además las dimensiones del equipo, de las tuberías y de la fosa, los elementos necesarios para la construcción del modelo de biodigestión considerando la generación de volumen líquido y gas correspondiente a cada carga de materia prima.

3.1. Diseño

Los sistemas de biodigestión se diseñan en función de la demanda, disponibilidad de materia orgánica y la temperatura ambiental. Se trata de un biodigestor tipo globo, conveniente por su bajo precio y comodidad de construcción, por lo que se puede diseñar en base al volumen de la mezcla obtenida previamente. Las muestras se toman a partir de una cantidad reducida de ganado puesto que el estudio está dirigido a un hogar promedio de cuatro personas por ende no se necesita una cantidad significativa de animales, teniendo así: 2 vacas, 2 caballos y 3 cerdos.

3.1.1. Componentes

El sistema de flujo semicontinuo consta de un agitador y otra unidad anaeróbica que actúa en la zona de fermentación y convierte los químicos orgánicos en gas. Además, el tanque anaeróbico tiene un acoplamiento que permite que los puertos de descarga giren de acuerdo con las necesidades y requerimientos que surjan en presencia de gas.

Las conexiones se realizan mediante dos válvulas de material galvanizado que permiten la salida del gas y drenaje del exceso de líquido. Los materiales de los componentes son acero inoxidable y acero galvanizado, lo que ayuda a prolongar la vida útil del equipo y prevenir la oxidación de la materia orgánica.

Biodigestor. Está compuesto por una doble capa tubular de plástico atada en los extremos por dos tuberías, una entrada y una salida de la mezcla orgánica, una salida de biogás. Este se

encontrará al interior de una zanja, además, está cubierta por una carpa solar.

Entrada y salida de materia orgánica. Se utiliza tubos PVC de 6", en la entrada es posible crear una caja de mezcla a la entrada del biodigestor y una fosa para el fertilizante en la salida.

Salida de biogás. Esta se encuentra a 3 m de distancia del ingreso de materia orgánica, en la parte superior del biodigestor, sellada herméticamente para la conexión de la tubería de $\frac{1}{2}$ ".

Válvula de seguridad. Representado en la Figura 4, la válvula está conectada antes de la primera válvula de bola, su función es permitir la salida de biogás excedente, evitando que el tanque de biodigestión se sobrecargue. Esta se puede fabricar con una botella agujerada en la mitad superior, conectada a una tee que está adaptada a una manguera que alcanzará $\frac{3}{4}$ de la botella, el recipiente debe estar lleno de agua superando el nivel de la entrada de la manguera de esta manera se evita que el oxígeno entre al biodigestor.



Figura 4. Válvula para salida de biogás excedente fabricado con una botella de plástico [26].

Válvula para drenaje de agua. Está fabricada a partir de una tee con un tapón. Al producirse biogás un porcentaje de agua se evaporará, por ello se requiere la válvula para desfogar el exceso de agua, está se encuentra después de la primera válvula de bola. Previene que la tubería se llene de agua y que el biogás no pase.

Conducción de gas. Para el transporte de biogás se empleará una manguera de riego de 1/2” encargada de conducir el gas desde la salida del biodigestor hacia el equipo de calentamiento de agua.

Invernadero. Se trata de una capa de plástico, encargado de la acumulación de calor producido por radiación solar, cubriendo al biodigestor mantiene una temperatura estable al interior de la zona de trabajo.

3.1.2. Equipo para la construcción de un biodigestor

Un biodigestor tipo globo es ideal por su bajo costo de construcción y su fácil montaje, ya que no necesita materiales costosos y su adquisición es simple, en la Tabla 4 se detallan los materiales necesarios para el montaje del sistema.

Tabla 4. Equipo para la construcción del biodigestor.

Cantidad	Detalle
2	Válvula roscable de bola, acero inoxidable 1/2”
2	Neplo ø 1/2”
1	Acople macho para manguera, ø 1/2” x 38mm
4	Codo PVC 1/2”
2	Tee 1/2”
2 metros	Tubería PVC de riego 6”
25 metros	Tubería PCV 1/2”
1 metro	Manguera de cobre para gas conexión 1/2”
21.2 metros	Polietileno tubular de 300 micrones

2 metros	Carpa solar
60 metros	Liga de neumático

3.1.3. Dimensiones del tanque de digestión

Para la instauración de la reserva de digestión existen rollos de polietileno tubular y dependiendo de la cantidad de gas que se va a producir se puede elegir el ancho del rollo y la longitud que este va a tener. En este caso se va a considerar un ancho del rollo de 1.75 m que al momento de formar la manga su diámetro será de 1.12 m [26].

Volumen de líquido y gas por cada carga de materia orgánica. Debido a que el tiempo de retención es de 30 días, se estima que se tiene 3 cerdos, 2 vacas y 2 caballos. El ganado porcino proporciona 2.25 kg/día de materia orgánica, el ganado equino y bovino proporciona una cantidad de materia orgánica de 10 kg/día. Así con la Ecuación 2 se tiene:

$$V_L = [20 [kg/día] + 20 [kg/día] + 6.75 [kg/día]] \cdot 30 [días]$$

$$V_L = 1403 [kg] = 1403 [l]$$

Debido a que en la mezcla se realizó una relación de 1:4 entre materia orgánica y agua el valor de 1402.5 l se multiplica por 4 y se obtiene:

$$V_L = 5610 [l]$$

Con la Ecuación 3 el volumen líquido que se obtiene de la mezcla es de 5610 l el cual ingresa en el biodigestor para cumplir con el proceso de producción de biogás.

$$V_G = \frac{5610 [l]}{3}$$

$$V_G = 1870 [l]$$

$$V_T = 5610 [l] + 1870 [l]$$

$$V_T = 7480 [l]$$

$$V_T = 7.480 [m^3]$$

Tras realizar la conversión a metros cúbico se tiene que, el volumen total que se obtiene por carga diaria con el ganado antes mencionado será de $7.480 m^3$.

Para el cálculo de la longitud del tanque es necesario conocer su sección eficaz con la Ecuación 10, a partir del producto de $\pi \cdot r^2$ y se tiene un radio de 0.56 m se obtiene que:

$$Sección\ eficaz = \pi \cdot [0.56\ m]^2 \quad (10)$$

$$Sección\ eficaz = 0.97 [m^2]$$

Y con el valor de volumen total en la mezcla que es de $7.480 m^3$ la longitud de la manga de digestión está determinada por la Ecuación 11:

$$L = \frac{V_T}{Sección\ eficaz} \quad (11)$$

Donde:

V_T : Volumen total de la mezcla

L: Longitud del biodigestor

$$7.480 [m^3]$$

$$L = \frac{7.480 [m^3]}{0.97 [m^2]}$$

$$L = 7.7 [m] \cong 8[m]$$

Por ende, en la Figura 5 se detalla la longitud del biodigestor a construir será de 8 m por un diámetro de 1.12 m para un volumen total de $7.480 m^3$ por carga diaria.

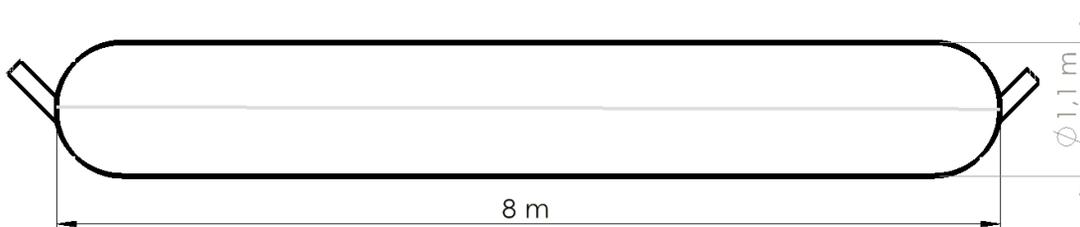


Figura 5. Dimensiones del biodigestor.

3.1.4. Dimensionamiento de las tuberías

Las tuberías para el biodigestor serán PVC de 6" para la entrada y la salida de la mezcla de material orgánico estas tendrán una longitud de 1 m por lado, se deben introducir al interior de la manga una longitud considerable en este caso 0.62 m.

Para la tubería superior de salida de gas se puede usar una de riego la cual es flexible y permite manipularla hasta llegar a su destino en este caso al equipo de calentamiento de agua.

3.1.5. Dimensión de la fosa

Para la dimensión de la fosa donde se va a colocar el biodigestor se basa en el ancho del rollo de polietileno que se va a usar debido a que este es de 1.75 m se puede obtener las medidas, ilustrado en la Figura 6.

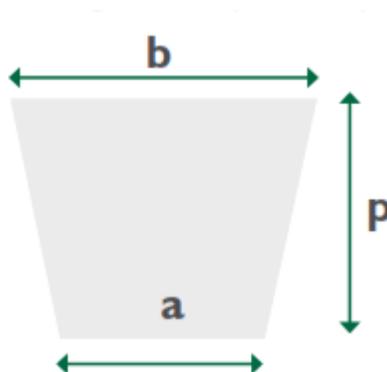


Figura 6. Forma de la fosa para el biodigestor [26].

Para la dimensión “a” que sería la base menor se tiene una longitud de 0.6 m, en el caso de “b” que es la base superior se tiene un valor de 0.8 m, y para la dimensión “p” que será la profundidad se obtiene una longitud de 1 m [26].

La longitud de la fosa dependerá de la longitud de la manga de digestión que en este caso es de 8 m para que el digestor encaje y para poder construir los canales de entrada y salida del material orgánico.

3.2. Ubicación geográfica del biodigestor

El área de análisis se encontrará a 2 km al Noreste del parque central de Píntag en el barrio de “San Isidro”, en esta zona se encuentran varios lotes donde las personas tienen sus animales los cuales proveerán del material orgánico para el biodigestor, como se observa en la Figura 7.



Figura 7. Ubicación del barrio San Isidro de Píntag.

El terreno de estudio tiene un área de 1000 m^2 con una casa de 108 m^2 y el resto del terreno sirve para tener alimento para los animales y mantenerlos cerca de la casa además de tener el espacio suficiente para colocar los equipos de calentamiento de agua y para la construcción del biodigestor, la mayoría de los lotes poseen esta característica o incluso superan el área de 1000 m^2 en zonas no centrales de la parroquia, condición ilustrada en la Figura 8.



Figura 8. Lote para la construcción del biodigestor.

3.2.1. Ubicación del biodigestor con respecto al hogar familiar

El biodigestor se ubicará a 25 m de la casa para evitar que los olores lleguen al hogar ya que, sería incómodo para los habitantes tener que soportar los olores que emanan los desechos orgánicos que se encuentran en la manga de digestión, como se ilustra en la Figura 9.

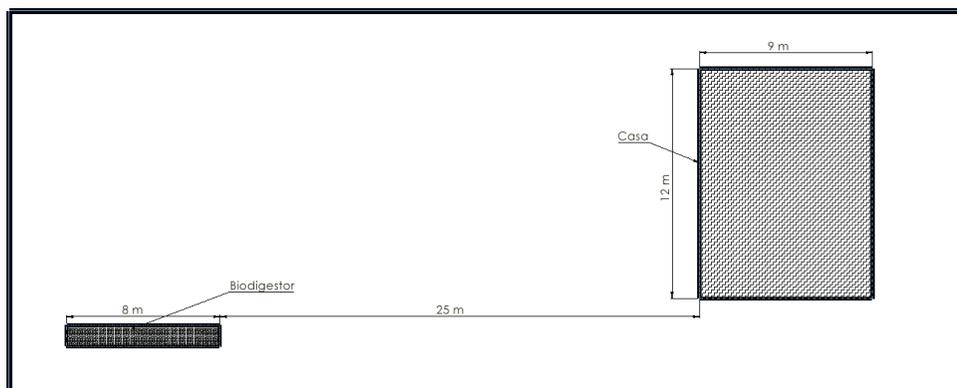


Figura 9. Ubicación del biodigestor respecto a la casa y dimensiones del terreno y la casa.

3.2.2. Ubicación con respecto al termotanque

Por temas de seguridad el termotanque deberá encontrarse al exterior del hogar aproximadamente a 1 m de distancia ya que emite gases debido a la combustión del biogás, además, de encontrarse alejado de productos inflamables que al entrar en contacto con la llama encendida podría producirse un incendio.

CAPÍTULO IV

SIMULACIÓN Y RESULTADOS DE UN BIODIGESTOR

El capítulo IV tiene como objetivo determinar analíticamente la cantidad de biogás necesaria para la operación de un termotanque por medio del uso de las ecuaciones propuestas en el capítulo II. Además de simular el desempeño del biodigestor durante dos etapas del año, donde la temperatura ambiente y la energía solar son los principales elementos que contribuyen en el funcionamiento del mismo.

La simulación se desarrolló en dos etapas, la primera permitió obtener la temperatura externa alcanzada por el biodigestor durante un período de 50 minutos. En la segunda etapa se muestra cómo influye la temperatura al interior del sistema de biodigestión.

4.1. Cálculos para determinar la cantidad de biogás necesario

Consumo de gas en un termotanque. La potencia que utiliza un termotanque para el calentamiento de agua es de 18.6 kW y con el poder calorífico del biogás que es de 7 kW · h/ m³ con la ecuación 1 se puede calcular el consumo de gas por minuto que necesita este equipo para calentar agua.

$$Q = \frac{18.6 [kW]}{7 [kW \cdot h / m^3]}$$

$$Q = 2.6571 [m^3/h]$$

Se realiza la conversión a minutos y se obtiene:

$$Q = 0.044 [m^3/min]$$

Factor de producción. Para obtener la cantidad de biogás se debe realizar el producto entre la producción de biogás y el volumen líquido de la mezcla.

$$PB \cdot V_L = 0.7197 \left[\frac{m^3}{\text{biogás}} / \frac{m^3}{V_L} / \text{día} \right] \cdot 5.610 \left[\frac{m^3}{V_L} \right] = 4.0375 \left[\frac{m^3}{\text{biogás}} \right]$$

Para el biodigestor de 5.610 [m³] se produce un aproximado de 4.0375[m³] de biogás diario.

Sólidos totales de la materia orgánica de ganado bovino y equino. A continuación, se presenta la cuantía de sólidos totales en la materia orgánica de ganado bovino y equino.

$$ST = \frac{40 [kg] \cdot 0.17}{4.8 [m^3]}$$

$$ST = 1.416 [kg/m^3]$$

$$SV = 1.416 [kg/m^3] \cdot 0.77$$

$$SV = 1.091 [kg/m^3]$$

$$PB = 0.27 \cdot 1.091 [kg/m^3]$$

$$PB = 0.294 [kg/m^3]$$

Sólidos totales de la materia orgánica de ganado porcino. El volumen líquido de los desechos orgánicos del ganado porcino es diferente al del ganado bovino y equino, por ello se calcula aparte, obteniendo así:

$$ST = \frac{6.75 [kg] \cdot 0.17}{0.81 [m^3]}$$

$$ST = 1.416 [kg/m^3]$$

$$SV = 1.416 [kg/m^3] \cdot 0.77$$

$$SV = 1.091 [kg/m^3]$$

$$PB = 0.39 \cdot 1.091 [kg/m^3]$$

$$PB = 0.425 [kg/m^3]$$

Producción de biogás total entre ganado equino, porcino y bovino. La sumatoria de los sólidos totales de los tres tipos de ganado determina la producción total de biogás.

$$PB_{TOTAL} = 0.294 [kg/m^3] + 0.425 [kg/m^3]$$

$$PB_{TOTAL} = 0.719 \left[\frac{m^3}{m^3} / día \right]$$

Tiempo para calentamiento de agua en un termotanque. Se determina por medio de la potencia del equipo de calentamiento de agua, con la Ecuación 12.

$$P = \frac{V}{t} \cdot \rho \cdot Cp \cdot (Tf - Ti) \quad (12)$$

Donde:

P: potencia del equipo de calentamiento, [kW]

V: volumen del agua, [m^3]

t: tiempo de calentamiento, [s]

ρ : Densidad, [kg/ m^3]

Cp: Calor específico, [kJ/kg \cdot $^{\circ}$ C]

Tf: Temperatura final, [$^{\circ}$ C]

Ti: Temperatura inicial, [$^{\circ}$ C]

Despejando el tiempo de calentamiento con la Ecuación 12, con variables de trabajo para agua a 9° C obtenidos del software EES, queriendo alcanzar una temperatura de 37° C con 100 l de agua, así:

$$t = \frac{V \cdot \rho \cdot Cp \cdot (Tf - Ti)}{P}$$
$$t = \frac{0.1 [m^3] \cdot 1032 [kg/ m^3] \cdot 3.991 [kJ/kg \cdot ^{\circ}C] \cdot 28 [^{\circ}C]}{18.6 [kJ/s]}$$
$$t = 620.02 [s] = 10.33 [min]$$

Con el tiempo de calentamiento de agua y la cantidad que consume el biogás, se puede estimar el volumen necesario de gas para el calentamiento de 100 l de agua.

$$V_{biogas} = 0.04428 [m^3/min] \cdot 10.33 [min]$$

$$V_{biogas} = 0.4575 [m^3]$$

El volumen mínimo de biogás para calentar 100 l de agua sanitaria en el sector de Píntag es de $0.4575 m^3$ y la cantidad que de biogás diario generado es de $4.0375 m^3$ por tanto, el biodigestor cumple con esta condición.

4.2. Análisis de resultados de simulación transferencia de calor

4.2.1. Simulación del biodigestor con relación al ambiente y luz solar en ANSYS Fluent

Se estudia las condiciones de transferencia de calor en un mismo sistema de biodigestión, sometido a diversos parámetros de temperatura dependiendo de la época del año, a lo largo del verano de 2022 e invierno de 2021.

Se realizó un enclosure al tanque con el propósito de que este se interrelacione con el aire ambiente y radiación solar, el mallado del sistema se muestra en la Figura 10, esta configuración es esencial para evitar que la temperatura incremente de manera descomunal y el plástico se quemara.

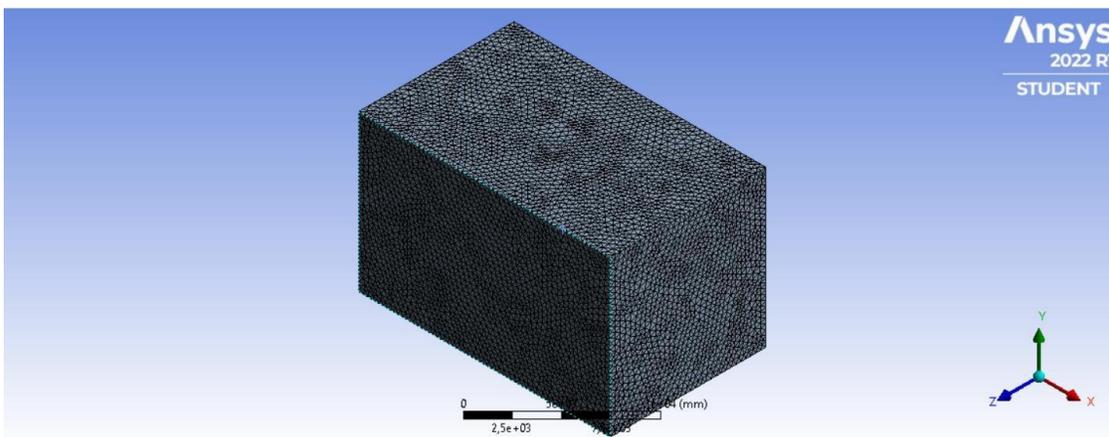


Figura 10. Mallado del diseño del biodigestor.

La configuración general del diseño será trascendente en el tiempo, es así que a medida que transcurran los minutos la temperatura aumentará y el calor al interior del biodigestor permitirá la generación de biogás.

4.2.2. Simulación interna del biodigestor

Una vez obtenidos los datos de temperatura ambiente y solar con respecto a la bolsa de biodigestión, se procede a realizar el análisis del comportamiento de la temperatura al interior del tanque donde se observa el cambio de fase de la mezcla.

En la Figura 11 se muestra el mallado del diseño en 2D del interior del biodigestor donde se

encuentra la mezcla líquida, el metano y las paredes son de polietileno de alta densidad.



Figura 11. Mallado del tanque del sistema en 2D.

4.2.3. Propiedades térmicas de la mezcla orgánica

Es importante conocer estas propiedades para su respectiva configuración en el software Fluent CFD, por ello se utiliza en el caso de la conductividad térmica, densidad y calor específico la Ecuación 7, Ecuación 8 y Ecuación 9 respectivamente.

Densidad de la mezcla líquida. Es la relación entre la cantidad de la materia orgánica y el volumen que esta ocupa.

$$\rho = 0.0367 \cdot (0.17)^3 - 2.38 \cdot (0.17)^2 + 14.6 \cdot (0.17) + 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\rho = 1002.41 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Calor específico. A continuación, se expresa la cantidad de calor requerida para incrementar la temperatura de la sustancia hasta cierto grado de temperatura.

$$Cp = 4187.5 - 28.9 \cdot (0.17) \text{ [J/kg} \cdot \text{K]}$$

$$Cp = 4182.58 \text{ [J/kg} \cdot \text{K]}$$

Conductividad térmica. La mezcla es capaz de transmitir calor, permitiendo el paso de la energía cinética presente en sus moléculas a otras sustancias, obteniendo así:

$$kp = 0.6173 - 0.0069 \cdot (0.17) [W/m \cdot K]$$

$$kp = 0.6161 [W/m \cdot K]$$

Viscosidad dinámica. Esta no se puede calcular con ecuaciones en este caso se utiliza una viscosidad cinemática de un material parecido, obteniendo el valor del Anexo 1.

$$\mu = 0.042 Pa \cdot s$$

Peso molecular. La materia orgánica representa un 20 % de la mezcla total, puesto que la cuantía de materia orgánica es diferente para cada animal se divide este porcentaje para cada uno quedando para el ganado vacuno y equino un 8.55 % por tipo de ganado y para el porcino un 2.88 % porque provee menor cantidad.

En el Anexo 3 se encuentran los componentes por cada 100 kg, para las vacas y caballos se realiza una regla de tres simple para cada 20 kg de estiércol y en el caso de los cerdos para cada 6.75 kg obteniendo así los valores mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Composición de diferentes estiércoles.

Tipo de animal	N [kg]	P2O5 [kg]	K2O [kg]	Total [kg]
Caballo	1,34	0,46	1,44	3,24
Vaca	0,68	0,26	0,7	1,64
Cerdo	0,30	0,14	0,41	0,84

Dado que el peso molecular del N es 14.01 g/ mol, para el P2O5 es de 141.94 g/mol, y en el caso de K2O es 94.19 g/ mol se puede obtener el peso molecular de la mezcla con un promedio de la masa molar y con el porcentaje de masa molar detallados en la Tabla 6.

Tabla 6. Porcentaje por cada elemento de composición de la materia orgánica.

Tipo de animal	% N	% P₂O₅	% K₂O	PM
Caballo	3,53	1,21	3,8	3,31
Vaca	3,55	1,36	3,65	3,31
Cerdo	1,04	0,46	1,38	10,87

$$PM = \frac{1}{\sum \frac{\%M}{PM}}$$

Donde:

PM: Peso molecular promedio de la mezcla, [g/ mol]

%M: Porcentaje de masa molecular por compuesto en la mezcla, [%]

PM: Peso molecular total de la mezcla, [g/ mol]

Con la sumatoria de todos los promedios obtenidos, se tiene una cantidad de 17,51 g/ mol y al sumar el 80% del peso molecular del agua que es de 14,416 g/mol se tiene un peso molecular total para la mezcla de 31.92 g/ mol.

Entalpia de estado estándar. A continuación, se presenta el estado de referencia de la mezcla mismo que se empleará para determinar sus propiedades bajo diferentes condiciones.

$$\Delta h^0 = \Delta h_{vap} \cdot PM$$

$$\Delta h^0 = 511758,73 [J/kg] \cdot 16.04 [kg/kmol]$$

$$\Delta h^0 = 8209272 [J/kmol]$$

Temperatura interna del biodigestor. En la Tabla 7 se detalla las propiedades de la materia orgánica que se encuentra al interior del tanque de biodigestión.

Tabla 7. Propiedades de las fases de la materia.

Propiedades	Fases de la materia	
	Materia orgánica	Biogás
Densidad, [kg/ m³]	1002.41	0.4484
Calor específico, [J/ kg · K]	4182.58	2.258
Conductividad térmica, [W/ m · K]	0.6161	0.03572
Viscosidad, [kg/ m · s]	0.042	0.00001157
Peso molecular, [kg/ kmol]	31.92	16.04
Entalpía de estado estándar, [J/ kmol]	0	8209272

En la Tabla 8 se presenta las características del polietileno de alta densidad, material del cual está diseñado el tanque.

Tabla 8. Propiedades del polietileno de alta densidad.

Propiedades	Polietileno de alta densidad
Densidad, [kg/ m³]	950
Calor específico, [J/ kg · K]	1800
Conductividad térmica, [W/ m · K]	0.5

4.2.4. Resultados simulación durante el verano y el invierno

Se configura la carga solar para determinar la temperatura que alcanzó el biodigestor respecto al ambiente, como se observa en la Figura 12.

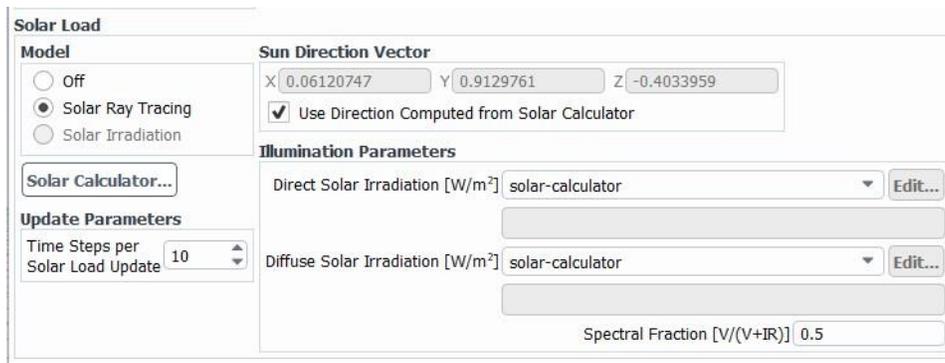


Figura 12. Configuración de carga solar.

Mañana de verano. Se tomó como referencia el día 21 de junio de 2022 debido a que su temperatura ambiental estimada la mañana de verano fue de 15 °C. Al finalizar la simulación se determinó que hubo radiación solar insuficiente para calentar el interior del biodigestor.

Medio día de verano. Al medio día se registra una temperatura de 19 °C. En la Figura 13 se detalla la configuración de la zona de estudio, como longitud, latitud, día del año y hora de trabajo.

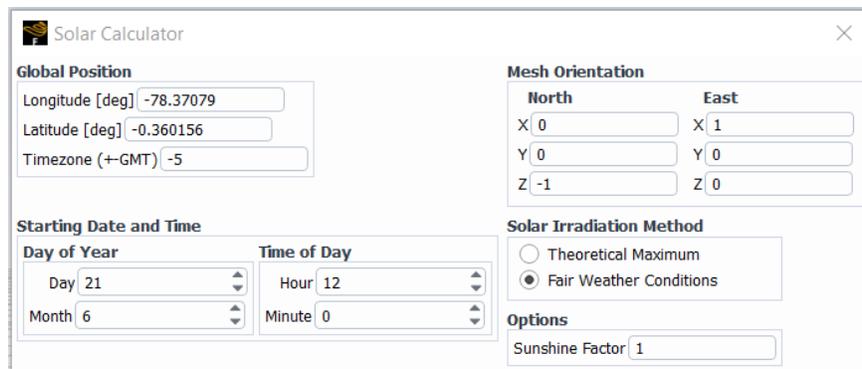


Figura 13. Configuración de la calculadora solar para la zona de estudio.

En la Figura 14, se detallan las condiciones de borde, la presión atmosférica, temperatura de trabajo y gravedad.

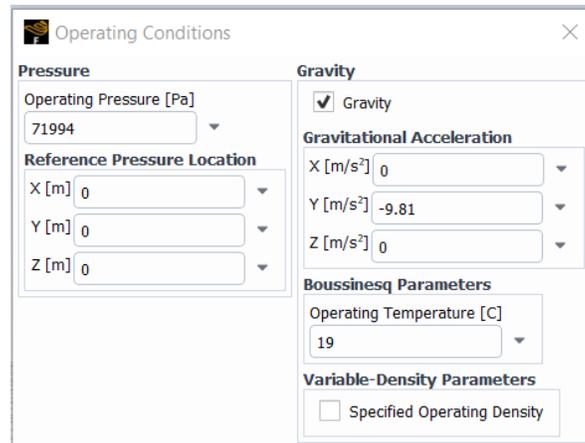


Figura 14. Condiciones de operación de borde.

La Figura 15, muestra la configuración de los parámetros de simulación, se determinó un tiempo de trabajo de 50 minutos.

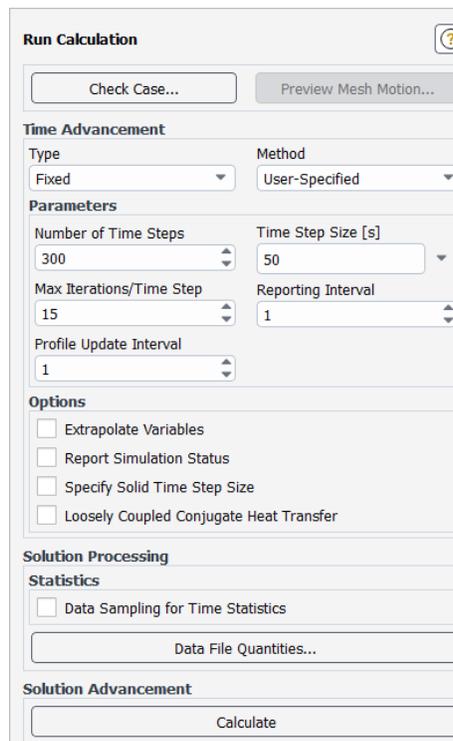


Figura 15. Criterios de simulación.

La Figura 16, muestra los resultados de la simulación pasado 50 minutos del medio día, la temperatura máxima que alcanza el exterior del tanque del biodigestor es de 37 °C

aproximadamente.

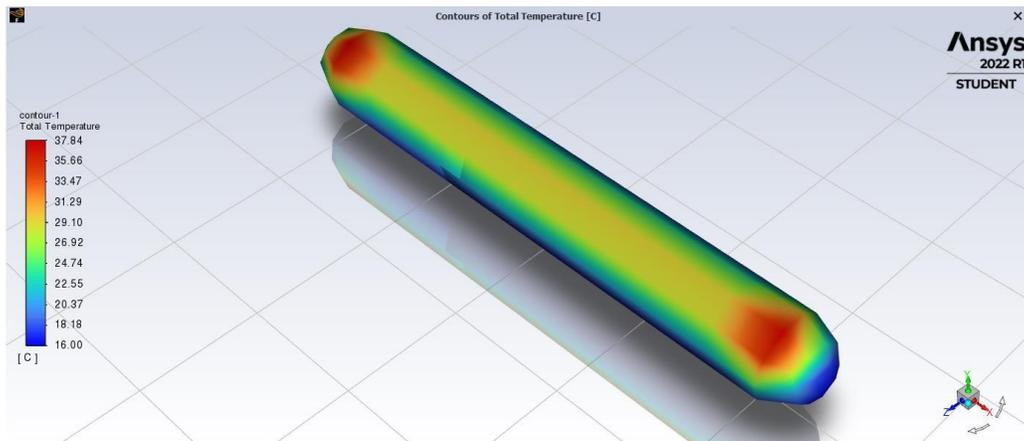


Figura 16. Temperatura externa del tanque a medio día en verano.

Noche de verano. La temperatura promedio es de 12 °C, es un valor bastante bajo por ello el biodigestor no alcanza el calor suficiente para generar biogás.

En la Figura 17 se muestra la temperatura interna alcanzada por el biodigestor en un tiempo estimado de 50 minutos, superando los 35 °C.

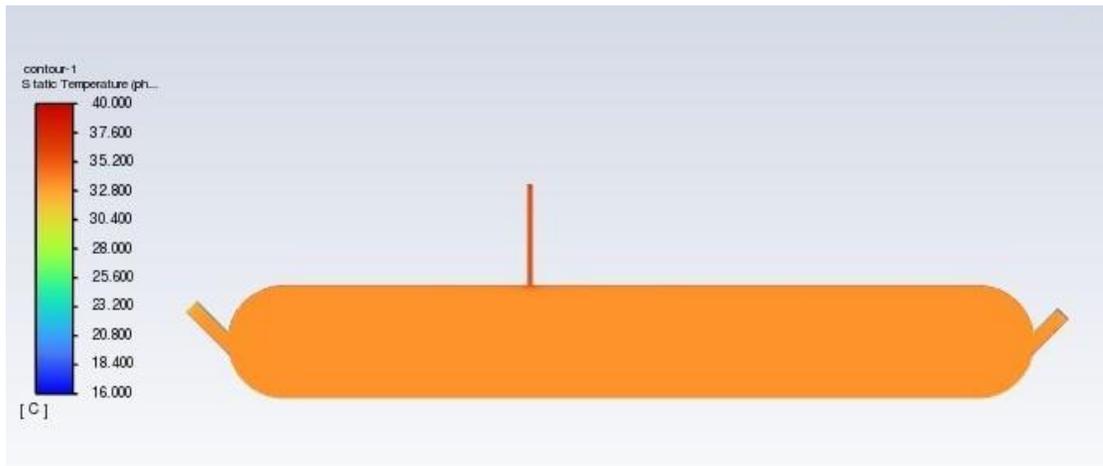


Figura 17. Temperatura del biodigestor después de 50 minutos en verano.

Debido a que alcanza una temperatura mayor a los 35 °C el volumen de biogás será mayor y se producirá en menos tiempo gracias a las condiciones climáticas establecidas previamente durante

la configuración inicial de la simulación, como se muestra en la Figura 18.

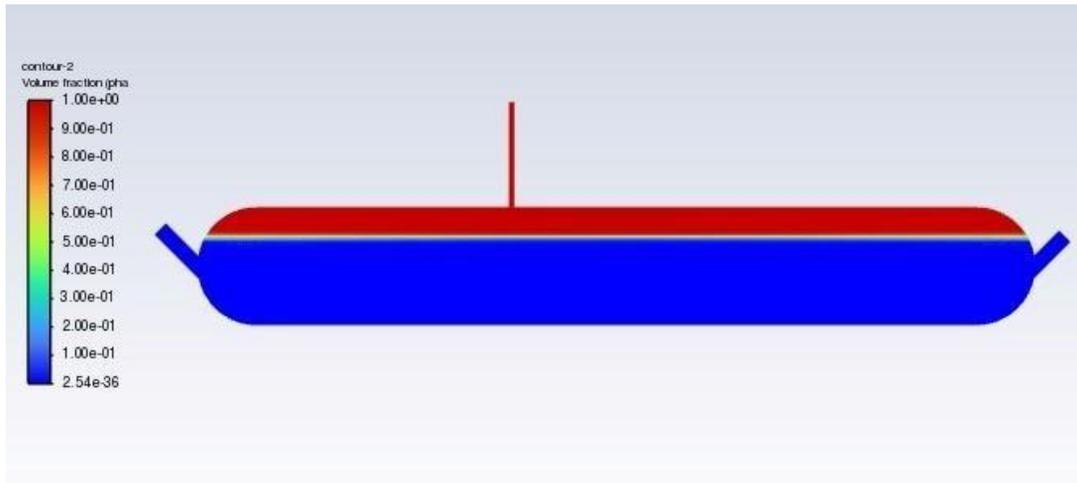


Figura 18. Producción de biogás al interior del sistema.

Mañana de invierno. Se tomó como referencia el día 15 de diciembre de 2021 debido a que la temperatura ambiental estimada en la mañana de aquel día fue de 10 °C. Por tratarse de invierno la radiación solar es débil por lo tanto el trabajo al interior del tanque será nula.

Medio día invierno. Al medio día se registra una temperatura de 16 °C. Se mantiene la configuración longitud, latitud, zona horaria del área de estudio, únicamente varía el día del año, como se detalla en la Figura 19.

Figura 19. Configuración del día y hora en época de invierno.

Las condiciones de borde se mantienen, sin embargo, la temperatura de operación se modifica

siendo de 16 °C. Respecto a la configuración de la simulación, al igual que en el verano se ejecutó en un tiempo de 50 minutos.

Transcurridos los 50 minutos después de mediodía, se aprecia una temperatura máxima de 35 °C detallada en la Figura 20, esto debido a la intensidad de la radiación solar característica del comúnmente conocido “sol de lluvia”.

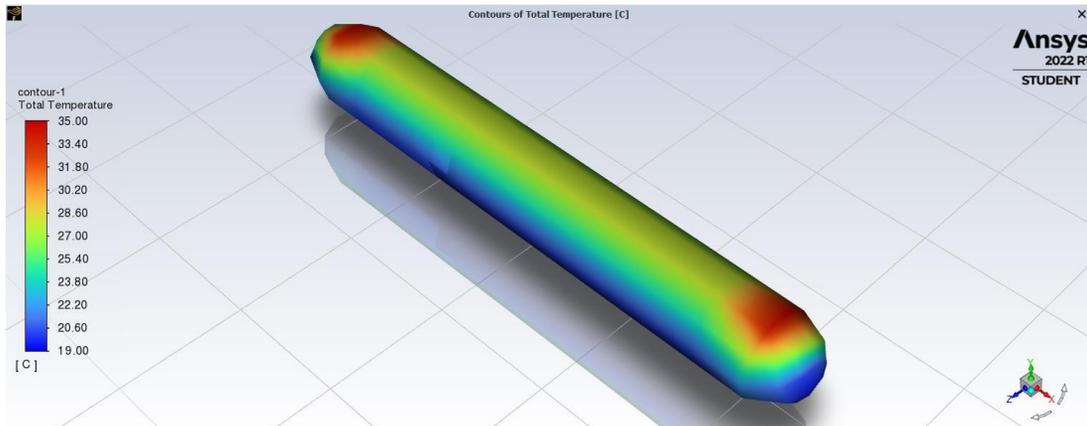


Figura 20. Temperatura externa del tanque a medio día de invierno.

Noche de invierno. Las noches de invierno se caracterizan por el frío intenso, durante la noche del 15 de diciembre de 2021 se registró una temperatura de 9 °C imposibilitando alcanzar las condiciones de trabajo mínimas al interior del sistema.

La Figura 21 presenta la temperatura al interior del sistema de biodigestión tras haber transcurrido 50 minutos, donde se observa que alcanzó una temperatura aproximada de 35 °C.



Figura 21. Temperatura del biodigestor después de 50 minutos en invierno.

En la Figura 22 se observa en color rojo el inicio de la producción de biogás con la temperatura obtenida, mientras que en color verde se representa el inicio del cambio de fase al final en color azul se muestra la materia orgánica en estado líquido.

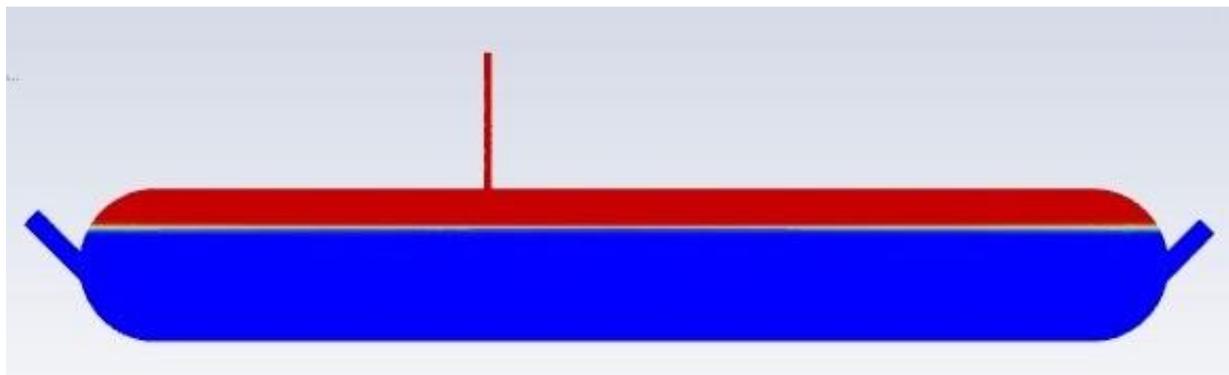


Figura 22. Producción de biogás al interior del tanque.

CAPÍTULO V

COSTO DE CONSTRUCCIÓN DEL BIODIGESTOR Y ANÁLISIS ECONÓMICO DEL SECTOR

Este capítulo determinará los costos estimados de los materiales y herramientas utilizados para construir el biodigestor y el sistema de transmisión de gas, así como los sistemas de calentamiento de agua.

5.1. Análisis económico del sector

En cuanto a la economía la parroquia Pintag se debe a la ganadería y, en menor escala, a la minería para obtener materias primas. Pintag cuna del cóndor, dispone de recursos naturales, su población vende su fuerza de trabajo a cantones como Rumiñahui y Quito D.M.

Además, la agricultura, silvicultura, la crianza de animales pequeños como cuyes, gallinas, conejos y cerdos para el autoconsumo y la gestión del sustento del hogar contribuye al desarrollo de la economía parroquial [28].

5.1.1. Agricultura y ganadería

El calentamiento global, el terreno y la elevación contribuyen a la producción de cereales, granos, hortalizas y pasto para el ganado vacuno, equino y bovino. El calentamiento global ha alterado los meses de producción por lo cual en ocasiones existe sequía prolongada lo cual ha obligado a la población a planear la siembra de los diferentes productos. El capital para la producción nace de fondos propios de cada familia teniendo un activo fijo de operación bastante bajo y limitado [29]. La población considera necesario tener una mayor superficie de terreno, además de conocer las técnicas de siembra de pasto de alto rendimiento adecuadas, con las condiciones del suelo de ese lugar, así como la técnica de siembra de ensilaje para la cosecha verano-otoño.

5.1.2. Turismo

Debido a la diversidad de paisajes, formaciones naturales, atractivos turísticos y áreas naturales, la parroquia tiene un gran alcance ecoturístico. El turismo se nutre de actividades productivas por parte de familias y microempresas [29]. Además, se muestra la cultura mediante el comercio de

artesanías, comida típica e interpretación de música.

5.1.3. Explotación minera

La extracción de minerales a base de materiales pétreos, gravas y arena es a través de la minería industrial, sin embargo, esto ha ocasionado problemas para la población y las inmediaciones cercanas a las canteras, además de contribuir a la contaminación medioambiental, congestión vehicular y degradación de riquezas naturales como el agua [29].

5.1.4. Servicios financieros

Las prestaciones financieras a los productores son reducidos y ofertadas por empresas privadas las cuales son brindadas con altas cuotas de interés, montos bajos y períodos de tiempo reducidos, que además tienen dificultad en brindar garantías suficientes para endeudarse por el riesgo de no poder pagar por pérdida de cosecha en época de verano [29].

Una persona que se dedique en específico a agricultura y ganadería tendrá ingresos de \$ 2127 aproximadamente sin contar gastos, puesto que estas son las actividades que más se realizan son las que más ingresos generan en un mes [28], se puede añadir la venta de árboles de eucalipto que ciertas personas realizan e incluso el sueldo básico dependiendo si la persona trabaja en algún lugar externo o incluso el turismo, sin embargo, no es un valor fijo, ya que, no todos los habitantes realizan estas actividades [29].

5.2. Análisis del costo de ensamblaje del biodigestor

Dado que esta propuesta tecnológica tiene un fin social, el presupuesto se enfoca en el costo de implementación e instauración de un biodigestor tubular destinado a familias rurales. En la 5 se detallan las herramientas y materiales requeridos para el ensamblaje de la estructura de biodigestión.

Tabla 9. Materiales y presupuesto estimado para la construcción del biodigestor.

Cantidad	Detalle	Valor unitario (\$)	Valor total (\$)
2	Válvula roscable de bola, acero inoxidable 1/2".	7.00	14.00
2	Neplo Ø1/2".	0.67	1.34
1	Acople macho para manguera, Ø1/2" x 38mm	1.30	1.30
4	Codo PVC 1/2".	0.75	3.00
2	Tee 1/2".	0.75	1.50
2 metros	Tubería PVC de riego 6"	10.04	20.08
25 metros	Tubería PCV 1/2".	6.75	6.75
1 metro	Manguera de cobre para gas conexión 1/2".	9.00	9.00
21.2 metros	Polietileno tubular 300 micrones,	119.68	119.68
2 metros	Carpa solar	30.00	30.00
60 metros	Liga de neumático	12.00	12.00
2 metros	Alambre galvanizado	6.84	13.68

Para adquirir todos los materiales de construcción se requiere un mínimo de \$ 546.92, sin contar mano de obra, ya que, la construcción la puede realizar el propietario con alguna guía.

Existen materiales de construcción que brindan al biodigestor mayor estabilidad sin coste específico, detallados en la Tabla 10.

Tabla 10. Materiales adicionales sin coste específico.

Material	Uso
Arena	Base de la zanja
Sacos	Paredes de la zanja
Palos o estacas	Invernadero

Estos materiales no suponen un gasto económico ya que se pueden obtener en los alrededores del área, la arena de río puede recolectarse en el riachuelo que desemboca en el Río Guayllabamba, el alimento para el ganado es empacado en sacos o costales al vaciarse estos pueden usar como pared de la zanja, los palos y estacas pueden recolectarse en las zonas aledañas, por tanto, no representan un costo adicional para construcción.

5.3. Costos del biodigestor y otras fuentes de energía

Los gasodomésticos son artefactos que funcionan con gas natural o GLP como: cocina, estufa, secadora, termotanques o calefones [30], algunos de estos artefactos funcionan también con luz eléctrica, a continuación, se detalla el precio estimado que se deberá costear al elegir cualquiera de estas fuentes de energía para alimentar los equipos.

La construcción e instalación del biodigestor conlleva una inversión de \$ 547, con una vida útil de 10 años aproximadamente, el gas metano generado por el sistema se emplea para cocinar unas 3 horas por jornada [31], además de suministrar gas para alimentar al termotanque encargado de calentar el agua para tomar una ducha. Durante este periodo de 10 años el propietario del sistema deberá solventar gastos como: reemplazo de válvulas y tuberías resultado del desgaste, reparación de pequeñas fugas en el plástico y otras inconvenientes que se presenten, sin embargo, esto no supone una inversión mayor a los \$ 50.

Tanto el GLP como el gas metano ofrecen suministro de energía para la estufa de la cocina, un calefón y las conexiones de agua potable que se encuentran conectadas a los grifos de agua de la cocina, baños y regadera, no obstante, la diferencia entre ambos se denota en los costos de abastecimiento de GLP, pues el precio por cada cilindro de gas oscila entre los \$ 3.50 y \$ 3.75, para cubrir la demanda de la familia se necesitan 2 cilindros mensuales dando como resultado un presupuesto de \$ 7.50, a un plazo estimado de 10 años una familia promedio habrá destinado \$900 en GLP.

Con las cocinas de inducción ahora es posible cocinar con luz eléctrica, además de tener una regadera eléctrica que se alimenta de un switch, solventando así las necesidades de agua hervida para cocción de alimentos y agua caliente para tomar una ducha, el monto total a pagar por este servicio además del valor de consumo incluye también monto de servicio de alumbrado público, sin embargo, el gobierno otorga un subsidio de tarifas a cocinas de inducción. El total a pagar mensualmente varía según el consumo, ahora bien, se estima una cifra de \$ 30, del mismo modo a un período estimado de 10 años, el titular de la cuenta habrá saldado un valor de \$ 1800.

CONCLUSIONES

1. El diseño y simulación del biodigestor con capacidad de 100 l/día para el calentamiento de agua sanitaria se llevó a cabo por medio de la investigación de factores ambientales, se determinó que la mayor producción de biogás ocurre durante la época de verano donde el sistema alcanza la temperatura ideal, además de estar ubicado en una zona geográfica adecuada rica en vegetación y microorganismos.
2. El diseño del biodigestor se basó especialmente en el porcentaje de desechos orgánicos que se puede obtener en un día 46.75 kg, las dimensiones de este fueron 8 m de largo y 1.12 m de diámetro, con el fin de aprovechar al máximo los desechos orgánicos para la producción de gas natural, generando finalmente una cantidad de biogás estimada de 4.03 m³ en un período de tiempo de 12 días durante el verano y 20 días en invierno, este valor es 10 veces mayor que el requerido para el calentamiento de 100 l de agua sanitaria en un termotanque con la misma capacidad.
3. En la simulación se obtuvo los resultados de funcionamiento en dos temporadas del año invierno y verano, el biodigestor alcanzó temperaturas que se aproximaban a los 35 °C y 37 °C respectivamente al exterior del tanque de biodigestión después de 50 minutos a partir del mediodía gracias al calor del sol, en el interior la temperatura va aumentando a medida que pasa el tiempo alcanzando los 35 °C para el proceso de fermentación mesofílica, así concluyendo que el biodigestor si puede llegar a funcionar en la parroquia de Píntag, sin embargo, para mantener esta temperatura es recomendable la construcción de un invernadero para utilizar el efecto invernadero a favor de esta causa.
4. El costo total de construcción de un biodigestor en zonas rurales tiene un aproximado de \$ 547, y una familia que se dedique a la ganadería y agricultura tiene la posibilidad de hacerlo, al realizar la venta de ganado y cosechas se puede obtener el capital para la construcción y con la utilización del biodigestor se puede recuperar dicha inversión al ahorrar en calentamiento de agua o en diferentes usos que se le puede dar al biogás.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar un estudio de calidad de fertilizantes producidos por empresas agroquímicas y el biol, fertilizante producto del sistema de biodigestión con el fin de encontrar el producto que brinde más y mejores beneficios al terreno.
2. Comprobar la utilidad del biogás como fuente de energía en diferentes equipos gasodomésticos calefactores, hornos, secadoras, asadores, y también en motores endotérmicos, con el fin de estudiar la posibilidad de integrar estos aparatos en la vida cotidiana al ser más seguro y amigable con el medio ambiente.
3. Al optar por un proyecto de campo se recomienda hacer un estudio de reología de este modo se obtendrán valores más precisos de viscosidad del fluido, además de emplear herramientas como hidrómetro, manómetro, termómetro y medidores de flujo de calor, es así que se podrá hacer un análisis comparativo entre los resultados obtenidos a través de simulación y ejecución del proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. F. Vasquez, “Análisis del efecto sobre el crecimiento económico, el incremento de la producción de energía renovable en Ecuador para el período 1970-2016,” p. 157, 2019, [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/786%0Ahttps://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/786/1/CD-1222.pdf>.
- [2] C. D. Flores Arrieta, “Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito,” *Tesis*, pp. 1–100, 2020, [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18503%0Ahttp://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>.
- [3] I. Corona Zuñiga, “Biodigestores,” *Labour*, vol. 17, no. 2, pp. 299–314, 2003, doi: 10.1111/1467-9914.00232.
- [4] B. J. De la Cruz Espinosa, Washintong Mesías; Palacios Sánchez, “Diseño y simulación de un sistema de precalentamiento de agua en el Camal Metropolitano de Quito utilizando biogás,” 2018.
- [5] F. M. Barragán, “Implicaciones ambientales del uso de leña como combustible doméstico en la zona rural de Usme,” *Fac. Ciencias Económicas, Inst. Estud. Ambient. “IDEA,”* p. 119 pp, 2011, [Online]. Available: [c:%5CUsers%5CUsuario%5CDocuments%5CBibliografia Etnobotanica%5CBarragan.2011.Implicaciones ambientales del uso de leña en zona rural.pdf](c:%5CUsers%5CUsuario%5CDocuments%5CBibliografia%5CEtnobotanica%5CBarragan.2011.Implicaciones%20ambientales%20del%20uso%20de%20le%C3%B1a%20en%20zona%20rural.pdf).
- [6] M. Caicedo, M. C. Vallejo, and F. Carrasco, “Poverty as a determinant of domestic firewood consumption and its effect on the forests of Ecuador,” *Bosque*, vol. 40, no. 2, pp. 205–216, 2019, doi: 10.4067/S0717-92002019000200205.
- [7] A. Tama, “Energía Cocina de Inducción VS Cocina de GAS (GLP),” pp. 8–14, 2013.
- [8] G. Licuado *et al.*, “GAS LICUADO DE PETRÓLEO EN ECUADOR,” 2020.
- [9] B. SALAS and G. KARLA, “ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DEL PROGRAMA

NACIONAL DE COCCIÓN EFICIENTE COMO MEDIDA PARA LA SUSTITUCIÓN DE IMPORTACIONES. CASO DE ESTUDIO: CIUDAD ESMERALDAS,” 2018.

- [10] F. Valladares-Carnero, “Modelamiento del proceso de digestión anaeróbica de estiércol vacuno y cáscara de cacao,” 2017.
- [11] A. D. Apolo Yagual, “Diseño, Construcción y puesta en marcha de un Biodigestor Anaerobio Prototipo de Bajo Costo,” p. 99, 2015.
- [12] M. Osejos, J. Jaramillo, M. Merino, A. Quimis, and J. Alcívar, “Producción de biogás con estiércol de cerdo a partir de un biodigestor en la Granja EMAVIMA Jipijapa-Ecuador,” vol. 4, pp. 709–733, 2018.
- [13] L. P. Martinez Medina, “Análisis del manejo de efluentes porcinos en Ecuador, su biodigestión y gestión ambiental sustentable,” *Univ. Cent. del Ecuador*, no. Figura 1, pp. 2–3, 2012.
- [14] W. Arrieta-palacios, “DEL ESTIÉRCOL DE GANADO Winston Arrieta-Palacios,” p. 231, 2016.
- [15] B. Wu, “Advances in the use of CFD to characterize, design and optimize bioenergy systems,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 93, pp. 195–208, 2013, doi: 10.1016/j.compag.2012.05.008.
- [16] Instituto Nacional de investigaciones agropecuarias [INIAP], Instituto de investigacion geologico y energetico [IIGE], International Centre for Numerical Methods Engineering [CIMNE], and Climate Technology Centre and Network [CTCN], “Hacia un sector de biodigestores sostenible en Ecuador: Insumos para un componente de biodigestores de PNABE,” p. 83, 2019, [Online]. Available: https://www.ctc-n.org/system/files/dossier/3b/EN_R4.1-20191210_Programa_nacional_de_biodigestores_en_Ecuador-CTCN.pdf.
- [17] J. Martinez Alayón, “El biodigestor, una alternativa ecológica y energética.”
- [18] E. A. Reyes Aguilera, “Producción de biogas a partir de Biomasa,” *Rev. Científica FAREM-Estelí*, no. 17, pp. 11–22, 2016, doi: 10.5377/farem.v0i17.2610.

- [19] C. Cornejo and A. C. Wilkie, “De Estiércol a Energía - Captura de Metano en Ecuador,” *Rev. Tecnológica - ESPOL*, vol. 23, no. 1, pp. 135–142, 2010, [Online]. Available: <http://www.rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/46>.
- [20] Chacon Vargas Laura Alejandra, Forero Fajardo Jorge Andres, Sanchez Gomez Juan Sebastian, Reyes Barrios Humberto, and Fajardo Pinilla Juan Manuel, “Implementación De Un Biodigestor De Bajo Costo Para La Porcicultura Sostenible En La Reserva Forestal El Verjón,” 2019.
- [21] Z. Aguirre, N; Eguiguren, Paúl; Maita, Juan; Coronel, Vanesa; Samaniego, Natalia; Ojeda, Tatiana; Aguirre, *Vulnerabilidad al cambio climático en la Región Sur del Ecuador: Potenciales impactos en los ecosistemas, producción de biomasa y producción hídrica*, vol. 53, no. 9. 2015.
- [22] Ministerio del Ambiente del Ecuador, “Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente, TULSMA,” *Regist. Of. Edición Espec. 2 31-mar.-2003*, no. 3399, pp. 1–578, 2003, [Online]. Available: www.lexis.com.ec.
- [23] O. Rivas Solano, M. Faith Vargas, and R. Guillén Watson, “Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad,” *Tecnol. en Marcha*, vol. 23, no. 1, pp. 39–46, 2010.
- [24] J. García Cascallana, “Evaluación energética de la cogeneración mediante biogás procedente de la digestión anaerobia de fangos de una estación depuradora...,” *Energía & Minas: Revista Profesional, Técnica y Cultural de los Ingenieros Técnicos de Minas*, 2019, Número 15. 2015.
- [25] D. C. Weindorf and R. Wittie, “Determining particle density in dairy manure compost,” *Texas J. Agric. Nat. Resour.*, vol. 16, no. particle density,compost,manure, pp. 60–63, 2003.
- [26] L. Rodriguez, R. Botero, and P. Harris, “Biodegistros Familiares - Manual de Instalación,” vol. 9, p. 74, 2003.
- [27] S. Internacional and S. Internacional, “Aislamiento Térmico,” pp. 1–5.
- [28] D. D. C. Ltda, “Actualización del plan de desarrollo y ordenamiento territorial Parroquia

- Pintag,” *Khatulistiwa Inform.*, vol. 3, no. 2, pp. 124–133, 2015.
- [29] O. Vizuete, “Análisis del proceso de expansión urbana y cambio de uso de suelo en la parroquia de Pintag, en el periodo 1963-2019, como aporte a la planificación territorial,” vol. 8, no. 5, p. 55, 2019.
- [30] OSINERGMIN, “El gas natural y sus diferencias con el GLP,” *Teps Gr. S.A.C. por Encarg. OSINERGMIN - GART, según CLS OSINERGMIN N° - 036 - 2011*, pp. 2–16, 2011, [Online]. Available: <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/hm000661.pdf>.
- [31] J. M. Herrero, “Biodigestores de bajo costo para producir giogás y fertilizante natural a partir de residuos orgánicos,” *Biodigestores bajo costo para Prod. giogás y Fertil. Nat. a partir residuos orgánicos*, p. 12, 2006.
- [32] B. Leyva, Y. Guillen, and H. L. Laurencio, “Caracterización reológica de un lodo que se genera en el lavado de árido,” *Ing. Mecánica*, vol. 19, no. 3, pp. 143–149, 2016.
- [33] Fundación Hogares Juveniles Campesinos, “Composicion de los estiercoles,” *Blibloteca del campo*, no. 1, p. 2284, 2004, [Online]. Available: <http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/6633/7/053.7.pdf>.

ANEXOS

Anexo 1. Viscosidad aparente para cada concentración de sólido en volumen [32].

Concentración de sólido en volumen, %	Viscosidad aparente media, $Pa \cdot s$	Rango de normalidad, $Pa \cdot s$
2	0,006	0,004 - 0,008
6	0,012	0,006 - 0,017
11	0,031	0,009 - 0,053
16	0,042	0,010 - 0,075

Anexo 2. Conductividad térmica del polietileno de alta densidad [27].

Material	λ Conductividad Térmica W(K·m) 23°C	Calor Específico J(Kg·K) 25°C	Densidad Kg/m ³
Corcho	0.04	1880	120
Diamante	2300	509	3513
Etanol	0.013	1520	789
Fibra de vidrio	0.04	795	220
Fieltro lana	0.06	1300	200
Grafito	129	710	2260
Hidrógeno	0.182	14300	0,0898
Hielo	2.2	2090	917
Hierro	80	473	7870
Inconel® 625	9.8	410	8440
Latón	120	394	8400
Litio	301.2	360	530
Madera	0.04-04	1381	840
Mármol	2.09	879	2800
Mercurio	8.34	140	13579
Mica	0.52	880	2900
Niquel	90	460	8900
Nitrógeno	0.026	1040	1.25
Oro	317	128	19300
Oxígeno	0.026	920	1429
PA6 Poliamida	0.24-0.28	1700	1150
Para-aramida Kevlar®	0.04	1400	1440
PC Policarbonato	0.19-0.22	1200	1200
PEHD Polietileno alta densidad	0.5	1800	980
PELD Polietileno baja densidad	0.33	2200	920

Anexo 3. Composición química del estiércol [33].

ESTIERCOL DE:	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	Kg. por cada 100 kg. de estiércol		
Caballo	6.7	2.3	7.2
Vacuno	3.4	1.3	3.5
Cerdo	4.5	2.0	6.0
Oveja	8.2	2.1	8.4
Gallina	15.0	10.0	4.0