

Implementación de un Biodigestor Cilíndrico para el Aprovechamiento Energético y Uso de
Sustratos Disponibles

Ferney Arturo López Jurado

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Nicolás Santos Santos

Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2024

Tabla de Contenido

		Pág.
Introducción		10
1.	Marco teórico	11
1.1.1.	Hidrólisis.....	12
1.1.2.	Acidogénesis	13
1.1.3.	Acetogénesis	13
1.1.4.	Metanogénesis.....	14
2.	Marco legal	15
2.1.	Energías renovables	15
2.1.1.	Norma ISO 20675:2018.....	15
2.1.2.	Directrices de IPCC	16
2.1.3.	En Colombia: Ley 2099 de 2021	16
2.2.	Políticas para la gestión de desechos	16
2.2.1.	Convenio de Basilea	17
2.2.2.	Informe para la gestión de desechos	17
2.2.3.	En Colombia: Política para la gestión integral de residuos	17
3.	Justificación y planteamiento del problema.....	18
4.	Objetivos.....	20
4.1.	Objetivo General	20
4.2.	Objetivos Específicos.....	20
4.	Metodología	21
5.	Resultados Etapa Observación.....	22

5.1. Parámetro del proceso de biodigestión	22
5.1.1. Temperatura	22
5.1.2. pH.....	23
5.1.3. Ácidos grasos volátiles	24
5.1.4. Componentes Tóxicos.....	24
5.2. Parámetros de diseño y operacionales	25
5.2.1. Tasa de Carga Orgánica (TCO) o Solidos Volátiles (SV) del sistema	25
5.2.2. Tiempo de retención hidráulica (TRH).....	25
5.2.3. Producción de Biogás	26
6. Diseño de un biodigestor	28
6.1 Cuidados para construir un biodigestor	28
6.2 Ubicación para construcción.....	29
6.3. Tipo de planta	30
6.4. Dimensionamiento	33
6.4.1. Estimación de carga diaria.	34
6.4.2. Concentración del afluente (C_o) y Solidos totales (ST).	35
6.4.3. Carga orgánica volumétrica (COV), rendimiento de producción de biogás y tiempo de retención de líquidos.	35
6.4.4. Cantidad de materia prima y del volumen de líquido (VL).	36
6.4.5. Volumen para el reactor.	38
6.4.6. Longitud del reactor y Material.	38
6.4.7. Dimensiones de la Zanja.....	39
6.4.8. Cálculo del volumen del gasómetro.....	41

6.4.9. Diseño del Gasómetro.....	42
6.5. Instalación complementaria	42
6.5.1. Diseño del invernadero	42
6.5.2. Tuberías de alimentación, Depósitos y Descarga del biodigestor	43
6.5.3. Conducción de biogás y tuberías de captación	45
7. Etapa de Adaptación	48
7.1. Análisis del entorno y ubicación de construcción.....	48
7.2. Construcción de un biodigestor cilíndrico	49
7.3. Análisis de elementos para el biodigestor cilíndrico.	49
7.3.1. Reactor	49
7.3.1.1. Estimación de la carga diaria.	49
7.3.1.2. Sólidos totales ST y Sólidos Volátiles SV.....	50
7.3.1.3. Rendimiento de producción de biogás, Carga orgánica volumétrica y Tiempo de retención de líquidos.....	50
7.3.1.4. Volumen líquido del biodigestor.	51
7.3.1.5. Volumen del reactor.....	51
7.3.2. Dimensionamiento del reactor y la zanja.....	51
7.3.3. Instalaciones Complementarias.	53
7.3.3.1. Pozo de entrada.....	53
7.3.3.2. Pozo de salida.	55
7.3.3.3. Válvula de alivio.....	56
7.3.3.4. Tubería y pérdidas de presión.	57
8. Implementación y funcionamiento del Biodigestor.....	58

9.	Conclusiones	62
10.	Recomendaciones	64
	Referencias Bibliográficas	65

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Componentes generales del biogás resultante</i>	14
Tabla 2 <i>Biodigestores: ventajas y desventajas.</i>	32
Tabla 3 <i>Componentes de un Biodigestor cilíndrico.</i>	32
Tabla 4 <i>Relación longitud/Diámetro según el accesorio.</i>	46
Tabla 5 <i>Valores sugeridos para el diámetro de la tubería, según el caudal de biogás requerido y la longitud del sistema de tuberías, con una caída de presión máxima de 5 mbar.</i>	47
Tabla 6 <i>Componentes de un Biodigestor Tipo cilíndrico</i>	51

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Estados del proceso de degradación anaeróbica</i>	12
Figura 2 <i>Metodología de trabajo</i>	21
Figura 3 <i>Tasa de producción de gas específica y rendimiento de biogás acumulado para una cantidad determinada de materia prima tratada</i>	27
Figura 4 <i>Clasificación de los biodigestores según su forma.</i>	30
Figura 5 <i>Producción de biogás en función del tipo de residuo o sustrato</i>	34
Figura 6 <i>Geometría transversal de la Zanja</i>	39
Figura 7 <i>Plano de un biodigestor con techo</i>	43
Figura 8 <i>Niveles de entrada y salida de un biodigestor cilíndrico</i>	44
Figura 9 <i>Cerdos de la Finca</i>	50
Figura 10 <i>Sistema de reducción de caudal de entrada al reactor</i>	53
Figura 11 <i>Altura para la tubería de entrada y salida del reactor.</i>	54
Figura 12 <i>Pozo de salida</i>	55
(a) Tubería de salida del Reactor. (b) conducción del lixiviado retirado de la casa y cualquier quebrada.....	56
Figura 13 <i>Válvula de alivio</i>	56
(a) válvula de alivio implementada. (b) Esquema de la válvula de alivia.	56
Figura 14 <i>Tubería de PVC para comunicar el biogás con la estufa.</i>	57
Figura 15 <i>Válvula de alivio al final de la tubería</i>	58
Figura 16 <i>Estufas del Biodigestor</i>	60
(a) Estufa de un solo puesto. (b) Estufa de varios puestos.....	60

Resumen

Título: Implementación de un Biodigestor Cilíndrico para el Aprovechamiento Energético y Uso de Sustratos Disponibles

***Autor:** Ferney Arturo López Jurado

Palabras Clave: Biogás, biodigestor doméstico, energías limpias.

Descripción:

La creciente preocupación por la gestión de desechos y la generación de energías limpias ha impulsado el desarrollo de tecnologías que permiten el aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de biogás, contribuyendo a la mitigación del impacto ambiental y la diversificación de las fuentes energéticas. En este contexto, el biodigestor se presenta como una alternativa viable y sostenible, particularmente en zonas rurales y urbanas donde los residuos orgánicos constituyen una fracción significativa de los desechos generados.

El presente trabajo de grado se centra en la instalación y puesta en marcha de un biodigestor cilíndrico, comúnmente empleado en Latinoamérica, con el objetivo de producir gas doméstico a partir de la digestión anaeróbica. Este proceso biológico, que descompone la materia orgánica en ausencia de oxígeno, permite la generación de biogás, compuesto principalmente por metano, y lixiviados, productos aprovechables en múltiples aplicaciones.

Para garantizar la correcta implementación de esta tecnología, es necesario comprender las etapas del proceso de digestión anaeróbica, que incluye hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, así como los requisitos técnicos y normativos aplicables. Además, el estudio responde a la necesidad de explorar soluciones energéticas alternativas frente a desafíos como la disminución de las reservas de gas natural y las interrupciones en el suministro energético, lo que refuerza la relevancia de este proyecto para el contexto actual colombiano. Además, se plantea una metodología sencilla y replicable para quien interese realizar una implementación de este tipo.

La metodología sigue tres pasos: primero, la observación, donde se revisan en la literatura los aspectos técnicos necesarios para implementar un biodigestor cilíndrico mediante análisis del entorno y producción de biomasa; segundo, la adaptación, en la que se diseña el biodigestor según los recursos y necesidades locales; y tercero, la implementación y puesta en marcha del biodigestor.

* Trabajo de Grado

Abstract

Title: Implementation of a Cylindrical Biodigester for Energy Utilization and Use of

Available Substrates

Author(s): Ferney Arturo López Jurado

Key Words: Biogas, domestic biodigester, clean energy

Description: The growing concern for waste management and the generation of clean energy has driven the development of technologies that allow the use of organic waste for the production of biogas, contributing to the mitigation of environmental impact and the diversification of energy sources. In this context, the biodigester is presented as a viable and sustainable alternative, particularly in rural and urban areas where organic waste constitutes a significant fraction of the waste generated.

This thesis focuses on the installation and start-up of a cylindrical biodigester, commonly used in Latin America, with the aim of producing domestic gas from anaerobic digestion. This biological process, which decomposes organic matter in the absence of oxygen, allows the generation of biogas, composed mainly of methane, and leachates, products that can be used in multiple applications.

To ensure the correct implementation of this technology, it is necessary to understand the stages of the anaerobic digestion process, which includes hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis and methanogenesis, as well as the applicable technical and regulatory requirements. In addition, the study responds to the need to explore alternative energy solutions in the face of challenges such as the decrease in natural gas reserves and interruptions in energy supply, which reinforces the relevance of this project for the current Colombian context. In addition, a simple and replicable methodology is proposed for anyone interested in carrying out an implementation of this type.

The methodology follows three steps: first, observation, where the technical aspects necessary to implement a cylindrical biodigester are reviewed in the literature through analysis of the environment and biomass production; second, adaptation, in which the biodigester is designed according to local resources and needs; and third, the implementation and start-up of the biodigester.

*Degree thesis

Introducción

El aumento de desechos en Colombia, según el DNP, llevará a una emergencia sanitaria y mayores emisiones de gases de efecto invernadero para 2030. Para enfrentar este problema, el Ministerio de Ambiente publicó en 2016 una política de gestión de residuos sólidos que promueve la economía circular.

Según Superservicios, entre el 60% y 70% de los residuos sólidos pueden aprovecharse mediante compostaje, lo cual también genera energías limpias. Esta práctica podría mitigar la contaminación y suplir la falta de gas doméstico, especialmente en contextos como el cierre del gasoducto Mariquita-Cali y la crisis de reservas de gas en el país.

El texto propone la implementación de un biodigestor cilíndrico para generar gas doméstico, especificando sus componentes, costos y diseño. Para ello se sigue una metodología de tres pasos: la primera, de observación en donde se revisa en la literatura los aspectos técnicos requeridos para la implementación satisfactoria de un biodigestor cilíndrico para ser aprovechado energéticamente y uso de sustratos disponibles mediante análisis del entorno y producción de biomasa; en segundo lugar, una etapa de adaptación en donde a partir de lo encontrado en la literatura, se diseña el biodigestor de manera singular según los recursos disponibles y necesidades del lugar donde se implementa el biodigestor; y en tercer lugar, la instalación del biodigestor. La metodología se plantea con el fin de dar respuesta a cada uno de los objetivos propuestos en el actual trabajo de investigación.

1. Marco teórico

Para el correcto desarrollo de las actividades propias del actual trabajo de grado, que consiste en la instalación y puesta en marcha de un biodigestor cilíndrico, es indispensable el conocimiento y contextualización de los conceptos clave, por ello se presenta a continuación, la descripción teórica del proceso de digestión anaeróbica y sus etapas.

1.1 Proceso de digestión anaeróbica

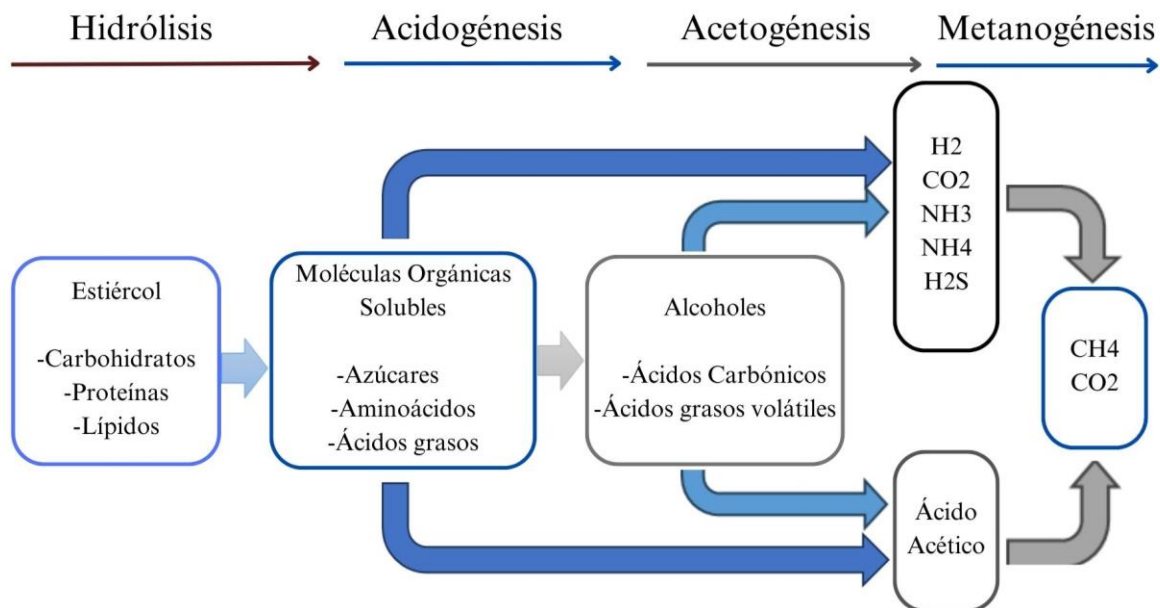
La digestión anaeróbica (DA) o biometanización es un proceso de tipo biológico llevado a cabo por microorganismos que descomponen material biodegradable en ausencia de oxígeno. La DA se aplica de manera eficiente para el tratamiento de diferentes materias orgánicas como estiércol animal, desechos agrícolas y lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales (Abanades y otros, 2021). Este proceso de biodegradación se compone de cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. En la primera etapa los carbohidratos, proteínas y lípidos se degradan en moléculas orgánicas solubles como azúcar, aminoácidos y ácidos grasos. Posteriormente, en la etapa de acidogénesis, estos últimos compuestos se convierten en alcoholes, ácidos carbónicos y AGV (ácidos grasos volátiles). Las bacterias de la acetogénesis convierten las sustancias mencionadas en varios compuestos más simples y en la etapa final de metanogénesis, estos compuestos se degradan en CH_4CO_2 y un pequeño porcentaje de H_2S (Abanades y otros, 2021). Presenta un esquema de reacción en la Ecuación (1) a continuación:



Además, finalmente se obtiene otro producto del proceso de degradación: El lixiviado (Jørgensen, 2009). La figura 1 muestra las etapas y los elementos involucrados en cada etapa del proceso de DA.

Figura 1

Estados del proceso de degradación anaeróbica



Nota. El gráfico presenta las etapas del proceso de degradación anaeróbica y presenta cada uno de los elementos presentes en cada etapa con sus respectivas transformaciones. Adaptado de *Development and implementation of small-scale biogas balloon biodigester in Bali, Indonesia* (p. 6), por Marco Ghiandelli, 2017, KTH School of Industrial Engineering and Management.

A continuación, se explica cada etapa, incluyendo los organismos involucrados, los productos y las principales características de los procesos.

1.1.1. Hidrólisis

En la primera etapa del proceso de digestión anaeróbica, llamada hidrólisis, los polímeros (moléculas complejas) de la materia prima se descomponen en mono y oligómeros (moléculas pequeñas). En concreto, durante esta etapa, los carbohidratos, proteínas y lípidos se degradan en glucosa, glicerol, purinas y piridinas (Ghiandelli, 2017). La etapa de hidrólisis la llevan a cabo varios microorganismos conocidos como microorganismos anaerobios facultativos. Las moléculas

complejas que componen la materia prima son degradadas por varias exoenzimas producidas por estos microorganismos específicos. Por ejemplo, los enlaces químicos de los lípidos son degradados por la enzima lipasa para producir ácidos grasos y glicerol piridinas. Las características de la materia prima afectan el tiempo requerido para completar la etapa de hidrólisis. Por ejemplo, la degradación de la celulosa y la hemicelulosa lleva más tiempo en comparación con la degradación de proteínas y lípidos (Schnurer & Jarvis, 2009).

1.1.2. Acidogénesis

Tras la hidrólisis, la acidogénesis es el segundo proceso de degradación, en el cual se descomponen azúcares, ácidos grasos y aminoácidos. En esta etapa, los productos de la hidrólisis se transforman en diversos compuestos, como ácidos orgánicos (por ejemplo, ácido acético, butírico y propiónico), alcoholes, amoníaco, dióxido de carbono e hidrógeno.

Las bacterias que intervienen en el proceso de fermentación se llaman bacterias acidógenas, y los productos resultantes dependen tanto del tipo de bacteria como de las condiciones de digestión, como la temperatura y el pH (Kim y otros, 2003).

1.1.3. Acetogénesis

Los compuestos que no pueden ser degradados durante la fase de acidogénesis son descompuestos por la bacteria Acetogénesis. Estos compuestos incluyen ácido propiónico, ácido butírico y alcoholes, los cuales se convierten en hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético. El hidrógeno desempeña un papel intermedio crucial en este proceso, ya que la reacción solo se producirá si la presión parcial de hidrógeno es lo suficientemente baja para permitir la conversión termodinámicamente favorable de todos los ácidos. Este descenso en la presión parcial es realizado por bacterias específicas, por lo que la concentración de hidrógeno dentro de un biodigestor es un indicador clave de su funcionalidad (Mace y otros, 2003).

1.1.4. *Metanogénesis*

La cuarta y última etapa de la degradación anaeróbica es la fase de metanogénesis, en la cual se produce principalmente metano. Es la etapa más lenta del proceso bioquímico. Durante esta fase, las bacterias metanogénicas descomponen el ácido acético en metano y dióxido de carbono, y convierten el hidrógeno y dióxido de carbono en metano y agua. Estas bacterias requieren un entorno estrictamente anaeróbico, por lo que la presencia de oxígeno impediría la producción de metano. Aproximadamente el 70% del metano generado proviene de los acetatos, mientras que el 30% restante se produce a partir de la degradación del dióxido de carbono y el hidrógeno (Schnurer & Jarvis, 2009). Los componentes generales del biogás final se presentan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**Tabla 1.

Tabla 1

Componentes generales del biogás resultante

Componente	Símbolo	Concentración (vol/%)
Metano	CH_4	55-70
Dióxido de Carbono	CO_2	35-40
Agua	H_2O	2-7
Sulfuro de Hidrógeno	H_2S	2
Nitrógeno	N_2	<2
Oxígeno	O_2	<2
Hidrogeno	H_2	<1
Amoniaco	NH_3	<0.05

Nota. La tabla presenta la composición típica del biogás producido a partir de los bio-residuos. Adaptado de *Development and implementation of small-scale biogas balloon biodigester in Bali, Indonesia* (p. 8), por Marco Ghiandelli, 2017, KTH School of Industrial Engineering and Management.

2. Marco legal

A nivel global, no existe una normativa única que regule la implementación de los biodigestores, pues varía según el país y la región. Pero existen directrices y estándares internacionales que se pueden considerar; y pueden clasificarse en tres categorías según sus objetivos así: (1) energías renovables, (2) regulación agrícola integral y (3) políticas relacionadas con la gestión de los desechos (Vasco-Correa y otros, 2018). A continuación, se detallarán dos de estas tres categorías, respondiendo al interés del actual trabajo de grado:

2.1. Energías renovables

Las regulaciones de energías renovables en distintos Países establecen porcentajes específicos de emisión de energía cuyas fuentes sean renovables, incluyendo biogás y biometano. Para lograr esos porcentajes, los gobiernos establecen incentivos y requisitos de producción que han estimulado el desarrollo y uso de la tecnología de digestión anaeróbica (Vasco-Correa y otros, 2018). Los acuerdos mundiales y organizaciones sin ánimo de lucro han promovido la creación de normativas y directrices tal como se detallan a continuación:

2.1.1. Norma ISO 20675:2018

En esta norma se encuentran definidos los términos y categorías relacionadas con la producción de biogás mediante la digestión anaeróbica, la gasificación de biomasa y la generación de energía gaseosa a partir de fuentes de biomasa. Incluye el tratamiento y la mejora del biogás, así como su uso, teniendo en cuenta la seguridad, el medio ambiente, el rendimiento y la funcionalidad en todas las etapas de su implementación. Las plantas de biogás tienen varias

aplicaciones, como las fábricas de alimentos y bebidas, instalaciones de tratamiento de aguas residuales, plantas de gestión de desechos, vertederos, instalaciones a pequeña escala en empresas agrícolas y sistemas domésticos a pequeña escala (ISO, 2018).

2.1.2. Directrices de IPCC

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) es el organismo de las Naciones Unidas que examina el cambio climático desde su perspectiva científica. Organizado en 3 grupos de trabajo y una fuerza de trabajo, con distintos objetos de estudio cada uno. Especialmente, la fuerza de trabajo se encarga del estudio de inventarios nacionales de gases de efecto invernadero y se encarga de construir una metodología para el cálculo y la presentación de informes sobre las emisiones y absorciones nacionales de gases de efecto invernadero (IPCC, 2024). La última directriz corresponde al perfeccionamiento hecho en 2019 de las directrices del IPCC para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero de 2006 (Calvo Buendia y otros, 2019).

2.1.3. En Colombia: Ley 2099 de 2021

La ley 2099 de 2021, modifica y moderniza la ley 1715 de 2014 sobre la promoción de energías renovables, su almacenamiento, eficiencia energética y medición inteligente. La nueva ley no solo moderniza la anterior, sino que dicta otras disposiciones sobre la transición energética, la dinamización del mercado energético de fuentes no convencionales de energía, entre otros (Gobierno, 2021).

2.2. Políticas para la gestión de desechos

A nivel mundial existen normativas para desviar materiales orgánicos de los vertederos hacia sistemas de compostaje u otros tratamientos de bio-residuos mediante digestión anaeróbica AD (Vasco-Correa y otros, 2018).

2.2.1. Convenio de Basilea

Es un acuerdo mundial ambiental aprobado por la Unión Europea en el que se precisan algunos compromisos respecto a los desechos peligrosos que pueden afectar la salud de las personas y el ambiente, específicamente en su movimiento transfronterizo (PNUMA, 2014).

Los compromisos se basan en la reducción y eliminación de los desechos lo más cerca posible a su lugar de origen y generación; así mismo, procurar que sean mínimos los desechos transportados; y principalmente reducir la creación de desechos (PNUMA, 2014).

2.2.2. Informe para la gestión de desechos

La ONU por su parte, presenta la perspectiva mundial de la gestión de residuos 2024 en conjunto con la Asociación Internacional de Residuos Sólidos (ISWA). Esta publicación ofrece una revisión actualizada de la generación mundial de desechos y del coste de los desechos y su gestión desde 2018 (UNEP, 2024). El informe sugiere estrategias para reducir y optimizar todos los desechos, siguiendo la jerarquía de residuos para convertirlos en recursos valiosos, basados en residuos cero o economía circular (UNEP, 2024).

2.2.3. En Colombia: Política para la gestión integral de residuos

La política para la gestión integral de residuos en Colombia se implementó en una de sus versiones en el año 1997 (Minambiente, 1997). Luego, atendiendo a las realidades ambientales y de consumo en su momento, se aprueba en el 2016 una nueva versión de dicha política cuyo objetivo era direccionar el país hacia una economía circular. Se fomenta allí el reciclaje, el desperdicio cero, aumento de ciclo de vida de los materiales y productos, y el retorno a la economía una vez termina su tiempo productivo. Se realizaron convenios para estudiar tres corrientes de residuos sólidos y llevar a cabo inversiones destinadas al aprovechamiento y tratamiento de

residuos (Minambiente, Gobierno Nacional aprueba nueva política para la gestión integral de los residuos sólidos, 2024).

En el año 2022 se publicó la “Guía nacional para la adecuada separación de residuos sólidos”, en la que se especifican los tipos de residuos, el código de colores, las recomendaciones y ejemplos por cada tipo (DNP, Economía circular Minambiente, 2022).

3. Justificación y planteamiento del problema

El modelo económico y social en el país ha producido un aumento en los desechos generados por los ciudadanos. Según el Departamento Nacional de Planeación, DNP, en el año 2030 Colombia tendrá una emergencia sanitaria en varias ciudades y una alta emisión de gases de efecto invernadero, implicando afectaciones en la calidad del aire, entre otros (DNP, 2020).

Para afrontar esta emergencia el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible hace pública la Política de Gestión de Residuos Sólidos en 2016 (Minambiente, 2024), cuyo enfoque es promover la economía circular en donde el producto o material al terminar su ciclo de vida se convierta en insumo para crear otro producto o material, y de esa manera reducir considerablemente la generación de residuos. Según la Superintendencia de Servicios Públicos y Domiciliarios – Superservicios, entre el 60 y 70% de los residuos sólidos nacionales puede ser aprovechados mediante compostaje (AYC, 2020).

Es así como el compostaje se convierte en una práctica de generación de energías limpias, que no solo mitiga la contaminación, sino que puede suplir una carencia en los hogares colombianos, citadinos o de zonas rurales, de quienes se estima el 40% de la basura que generan es materia orgánica (AYC, 2020).

Este tipo de energías puede ser la respuesta ante contingencias como la del suroccidente del país, cuando una anomalía térmica registrada en el volcán Cerro Bravo en Tolima hizo que se cerrara la operación del gasoducto Mariquita-Cali dejando a 2 millones de personas sin gas natural (Rodríguez; Hernández, 2023). Adicionando, la actual crisis que enfrenta el país respecto a la disminución del factor de las reservas de gas, decisiones políticas de no exploración y la posible importación desde Venezuela que implicaría una elevación en el costo del gas para la nación (Roa, 2024).

Para dar respuesta a lo antes mencionado, y teniendo en cuenta que la generación de energías limpias se logra en la medida que se invierten recursos para su investigación, conocimiento e implementación; se propone en el actual trabajo la implementación de un biodigestor cilíndrico, común en Latinoamérica, para generación de gas doméstico (Garfí y otros, 2016), establecer los componentes técnicos de su implementación, así como sus costos y diseño; aportando la información y el conocimiento a quien interese y/o a toda la comunidad en general, científica o particular.

4. Objetivos

En base a lo expuesto en los apartados anteriores, se establecen los siguientes objetivos, tanto general como específicos, con el propósito de contribuir positivamente a la solución del problema identificado.

4.1. Objetivo General

Implementar un biodigestor cilíndrico para el aprovechamiento energético y uso de sustratos disponibles.

4.2. Objetivos Específicos

Identificar los componentes técnicos requeridos para la implementación satisfactoria de un Biodigestor cilíndrico para el aprovechamiento energético y uso de sustratos disponibles mediante análisis del entorno y producción de biomasa.

Diseñar un Biodigestor cilíndrico con materiales de fácil acceso con ayuda de prototipos de expertos localizados en la literatura científica.

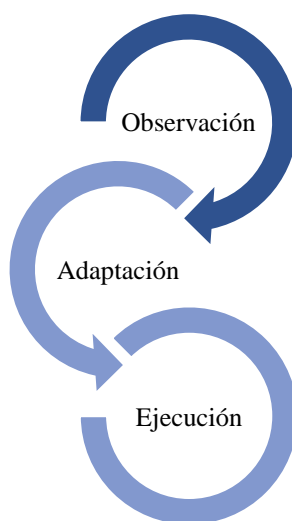
Instalar el biodigestor previamente diseñado en la Finca Altamira, vereda el filo, en Matanza, Santander y poner en funcionamiento durante 60 días.

4. Metodología

Con el fin de dar cumplimiento a los objetivos propuestos, se propone una metodología que responda en coherencia a cada objetivo, de manera que consta de 3 etapas, como se muestra en la figura 2: la primera, es una etapa de observación en la que se hace revisión de literatura y análisis de los resultados encontrados para identificar y extraer los componentes técnicos requeridos para la implementación del Biodigestor cilíndrico; la segunda etapa, consiste en adaptar la información encontrada, y hacer los ajustes necesarios propios del lugar y los materiales disponibles; y en tercer lugar, la última etapa será la ejecución o implementación de lo propuesto en la etapa de diseño.

Figura 2

Metodología de trabajo



Nota. El gráfico presenta la metodología de trabajo que se compone de tres partes: la observación, la adaptación y la ejecución del biodigestor cilíndrico.

En los siguientes apartados se presentarán las etapas metodológicas y sus respectivos resultados.

5. Resultados Etapa Observación

En la primera etapa, se realiza una revisión sistemática y de literatura gris, cuyo objetivo es observar cuáles son los componentes técnicos requeridos para la implementación de un biodigestor en el mundo.

5.1. Parámetro del proceso de biodigestión

Varios parámetros influyen en el proceso de degradación anaeróbica y la producción de metano. Como se mencionó anteriormente, diferentes microorganismos están involucrados en el proceso de digestión anaeróbica y requieren ciertas condiciones para funcionar. En esta sección se presentan los principales parámetros del DA y su importancia.

5.1.1. Temperatura

La temperatura es uno de los factores clave en el proceso de biodegradación, especialmente en la metanogénesis. Este proceso puede desarrollarse en distintos rangos de temperatura: entre 25-42 °C, se denomina rango mesofílico; entre 43-55 °C, rango termofílico; y por debajo de 20 °C, rango psicrófilo. Este último rango no es recomendado para la digestión anaeróbica debido a la lentitud de las reacciones. Los sistemas mesofílicos son considerados más estables, rápidos y requieren menos energía en comparación con los sistemas termofílicos. No obstante, las temperaturas más elevadas en los sistemas termofílicos permiten reacciones más rápidas y una producción de gas más eficiente. Además, operar a temperaturas más altas ofrece beneficios adicionales como una mejor higienización del lixiviado, una mayor degradación de sustratos sólidos, mejor digestibilidad, mayor disponibilidad del sustrato y una mayor posibilidad de separar las fracciones líquidas y sólidas (Ghiandelli, 2017).

La eficiencia del proceso de digestión anaeróbica (DA) depende en gran medida de la temperatura. Un cambio abrupto en la temperatura puede afectar negativamente el rendimiento de

los microorganismos, lo que puede resultar en pérdidas de gas y una interrupción del proceso. Por ello, es crucial mantener una temperatura constante para asegurar una mayor eficiencia y confiabilidad en el proceso (Schnurer & Jarvis, 2009).

La temperatura también está estrechamente relacionada con el tiempo de retención hidráulica (TRH). En efecto, la producción de metano se realiza en menos tiempo a temperaturas elevadas que a temperaturas más bajas. A temperaturas por debajo de 35 °C, la producción de metano disminuye significativamente debido a la lenta degradación de la materia orgánica. Además, la temperatura influye en la toxicidad del amoníaco, ya que esta aumenta a medida que la temperatura sube, aunque puede reducirse disminuyendo la temperatura del proceso. Sin embargo, al bajar la temperatura, la tasa de crecimiento de los microorganismos termofílicos se reduce considerablemente, lo que podría poner en riesgo la población microbiana debido a que su tasa de crecimiento sería inferior al TRH real. Se ha demostrado que, bajo condiciones de alta carga o con un TRH bajo, un biodigestor que opera a temperaturas termofílicas tiene un mayor rendimiento de gas y tasas de conversión más altas en comparación con uno que opera a temperaturas mesofílicas (Angelidaki & Sanders, 2004).

5.1.2. pH

Dicho parámetro mide la alcalinidad o la acidez de una solución. En el contexto de la digestión anaeróbica (DA), se refiere a la mezcla del sustrato, y se expresa en partes por millón (ppm). El crecimiento de los microorganismos metanogénicos está influenciado por el pH, que también afecta la disociación de compuestos clave en el proceso de DA, como el amoníaco, el sulfuro y los ácidos orgánicos. La fase de metanogénesis ocurre dentro de un rango de pH relativamente estrecho, que oscila entre aproximadamente 5,5 y 8,5, siendo el rango óptimo entre 7,0 y 8,0. A medida que la temperatura aumenta, la solubilidad del dióxido de carbono en agua

disminuye. La degradación de proteínas en amoníaco o la presencia de amoníaco en la corriente de alimentación puede elevar el pH, mientras que la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV) tiende a disminuirlo (Koustoula, 2017).

5.1.3. Ácidos grasos volátiles

La concentración de compuestos intermedios llamados ácidos grasos volátiles (AGV) influye en la estabilidad del proceso de DA. De hecho, la acumulación de acetato, propionato, butirato y lactato producida durante la fase de acidogénesis conduce a una acumulación de AGV y en consecuencia, a una drástica disminución del pH. Sin embargo, la capacidad amortiguadora del biodigestor gracias a la presencia de CO₂ le da a la variación del pH un margen considerable antes de que la acumulación de AGV afecte sustancialmente el nivel de pH. Esto significa que la acumulación de AGV puede dar lugar a varios problemas, como detener el proceso de degradación incluso antes de que se produzca un cambio en el pH. En conclusión, la alcalinidad de la biomasa afecta la concentración aceptable de AGV y es posible que cierta concentración sea aceptable para un sistema e inhibidora para otro. Por esta razón, la concentración de AGV no se puede utilizar como parámetro de seguimiento para el proceso de degradación anaeróbica (Schnurer & Jarvis, 2009)

5.1.4. Componentes Tóxicos

Otro parámetro que afecta la actividad de los microorganismos anaeróbicos es la presencia de compuestos tóxicos en el biodigestor. Pueden generarse automáticamente durante el proceso de degradación o insertarse con la materia prima. De hecho, durante la DA, en condiciones específicas de pH y composición de sustratos se puede liberar algún compuesto tóxico que conduzca a la inhibición del crecimiento de bacterias y la formación de metano (Ghiandelli, 2017). Un ejemplo es la alta concentración de carbohidratos y lípidos que conducen a una alta concentración de

amoníaco y sulfuros. Por otro lado, la materia prima puede estar contaminada por compuestos químicos externos que afectan la funcionalidad de las bacterias. Sin embargo, generalmente la concentración de este último no es lo suficientemente alta como para afectar considerablemente al sistema (Tefera, 2009)

5.2. Parámetros de diseño y operacionales

5.2.1. Tasa de Carga Orgánica (TCO) o Sólidos Volátiles (SV) del sistema

La carga orgánica es un parámetro operativo fundamental, que indica la cantidad de materia seca orgánica que se puede agregar al biodigestor, por volumen y por unidad de tiempo. Se calcula dividiendo el producto de la masa de sustrato alimentado por unidad de tiempo y la concentración de materia orgánica por el volumen del biodigestor. Varios factores como el diseño del biodigestor, la tecnología y la temperatura influyen en el parámetro mencionado. La TCO es particularmente importante en un sistema continuo porque una sobrecarga del biodigestor puede conducir a un aumento drástico de los ácidos grasos volátiles y en consecuencia, una acidificación del sistema (Schnurer & Jarvis, 2009). Además de eso, varios estudios muestran que la TCO óptimo es entre 4 y 8 kg SV/m³ de reactor al día para un reactor agitado. Por otro lado, no más de 2 kg SV/m³ de reactor al día es la TCO recomendado para los reactores de tanque no agitado (Ghiandelli, 2017).

5.2.2. Tiempo de retención hidráulica (TRH)

El intervalo de tiempo medio en el que la materia prima se mantiene en el reactor se define como el tiempo de retención hidráulica (TRH). Este parámetro se calcula dividiendo el volumen del reactor por el caudal de entrada de la materia prima. Suponiendo un volumen constante del biodigestor, el valor de TRH disminuye cuando aumenta la carga orgánica. El TRH necesaria para completar el proceso de degradación varía según la función de la tecnología utilizada, la temperatura del proceso y las características de la materia prima. Sin embargo, debe ser lo

suficientemente largo para garantizar una degradación completa del sustrato por parte de los microorganismos involucrados en el proceso. Una fermentación estable en tiempos de retención prolongados (más de 30/40 días) conduce a una mayor producción de metano y una menor formación de sólidos volátiles (Ghiandelli, 2017). En los biodigestores que funcionan en el rango termofílico se requieren tiempos de retención más bajos, de unos pocos días (Schnurer & Jarvis, 2009).

5.2.3. Producción de Biogás

La producción de biogás se puede estimar a través de la curva de rendimiento de biogás, un parámetro que depende de la calidad de la materia prima (y por lo tanto el TCO o SV) y la TRH (expresada en días) para una determinada temperatura. Suponiendo la misma materia prima, se pueden estimar varios rendimientos de biogás. El rendimiento de biogás se expresa en m³/día y representa la capacidad de una cierta cantidad de materia prima para producir una cantidad específica de biogás, expresada en metros cúbicos por día.

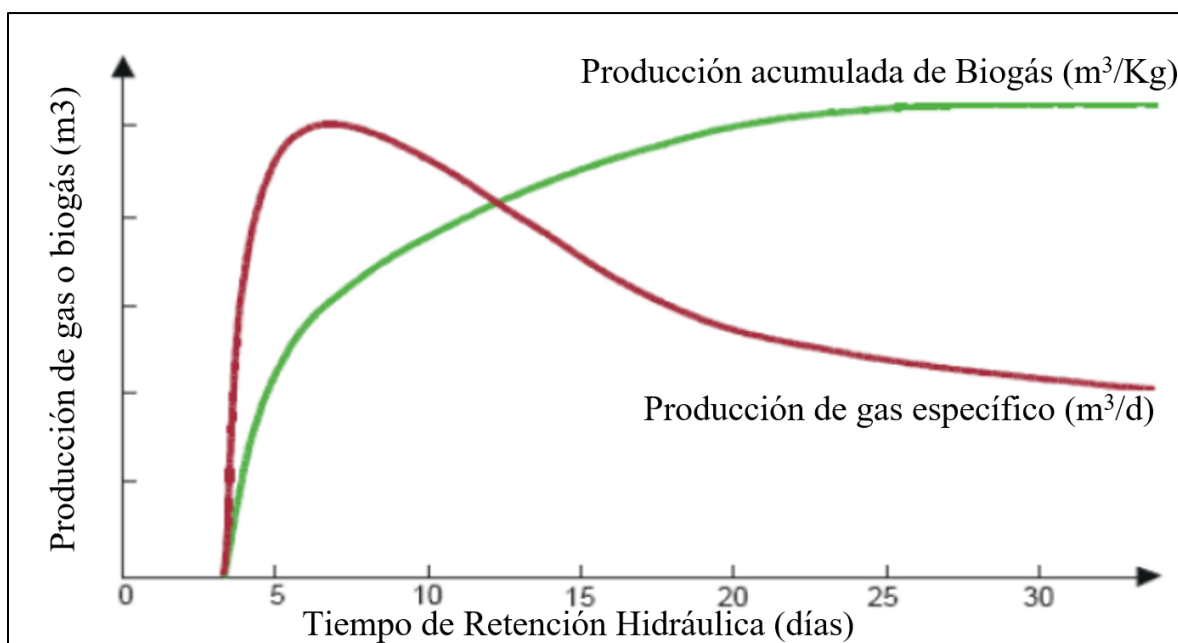
En la actualidad se han realizado diversos estudios como los Experimentos a Escala de Laboratorio para la Producción de Biogás mediante Análisis de Cromatografía de Gas e Hidrólisis y acidogénesis de material orgánico particulado en digestión anaeróbica mesófila y termófila a través de pruebas y experimentos de laboratorio para lograr el máximo en la curva de rendimiento del biogás y casi todos los estudios muestran resultados similares (Ghiandelli, 2017).

Por otro lado, la tasa de producción de biogás expresa la producción de biogás por una determinada cantidad de residuos orgánicos en función del tiempo. Como se muestra en la figura 3, la tasa de producción de biogás alcanza su punto máximo durante la fase de metanogénesis que depende de la temperatura, el período de incubación (el tiempo requerido por las bacterias para alcanzar la fase de metanogénesis) y la calidad de la fuente orgánica. Posteriormente, la producción

de biogás disminuye hasta que se acaba la fuente orgánica disponible para ser digerida por las bacterias. La curva acumulativa representa la suma del biogás producido por una cierta cantidad de materia prima a lo largo del tiempo. Como muestra la figura 3, aumenta a lo largo de una tendencia logarítmica donde el pico de la tasa de producción de biogás corresponde a la pendiente más pronunciada de la curva (Ghiandelli, 2017).

Figura 3

Tasa de producción de gas específica y rendimiento de biogás acumulado para una cantidad determinada de materia prima tratada



Nota. El gráfico presenta la tasa de producción de gas específica y rendimiento de biogás acumulado para una cantidad determinada de materia prima. Adaptado de Development and implementation of small-scale biogas balloon biodigester in Bali, Indonesia (p. 6), por Marco Ghiandelli, 2017, KTH School of Industrial Engineering and Management.

A partir de estos gráficos, es posible estimar el rendimiento de biogás de una planta específica en función de la temperatura y estimar la TRH óptima que se puede aplicar.

6. Diseño de un biodigestor

Para construir un Biodigestor es necesario disponer de suficiente materia orgánica para su correcto funcionamiento, pero no es el único elemento pues se deben tener en cuenta aspectos como los cuidados pertinentes, la ubicación para construirlo, el tipo de biodigestor, el dimensionamiento y la instalación complementaria requerida. A continuación, se describen uno a uno dichos elementos.

6.1 Cuidados para construir un biodigestor

Debido a la simplicidad de construir un biodigestor, en ocasiones se pueden ignorar algunos aspectos importantes dando como resultado en un equipo poco funcional. Por lo tanto, es esencial comprender todo el diseño, incluso si algunas partes no se aplican a proyectos específicos como los caseros o aquellos destinados a zonas remotas. Además, es igualmente crucial utilizar materiales adecuados, en lugar de recurrir a materiales viejos o en desuso, que podrían no ser efectivos. Por esta razón, es necesario contar con conocimientos técnicos y criterio para evaluar la viabilidad de construir la planta biodigestora (Guardado C., 2007).

La desmotivación es un factor no técnico, pero relacionado y de gran relevancia, pues se ha logrado documentar que cuando el biodigestor funciona mal, entre el 30-50% de las personas deciden abandonar el proyecto (Guardado C., 2007). La causa habitual de un mal funcionamiento es la selección de la planta, es decir, obviar aspectos técnicos como el sobredimensionamiento (un biodigestor con volumen mayor que el volumen de la materia orgánica disponible) o subdimensionamiento (entrada de materia prima mayor al que el biodigestor puede procesar). Para evitar esto es pertinente establecer un objetivo de uso del biodigestor, establecer la cantidad de materia prima disponible, hacer un control de las condiciones climáticas adversas, pues como se menciona en el marco teórico, es poco viable a temperatura inferior a 20 °C.

Las condiciones mínimas para obtener un biodigestor funcional se concentran en un inicio en la voluntad y deseo de implementarlo, a partir de la conciencia de su uso y el conocimiento de sus ventajas; adicionalmente, es importante la disponibilidad financiera para adquirir los materiales. Además, de la materia orgánica, se debe tener acceso a fuentes de agua y espacios amplios para las instalaciones respectivas; y finalmente, conocer cuándo un diseño resulta funcional para sus características y posibilidades (Guardado C., 2007).

6.2 Ubicación para construcción

La ubicación de un biodigestor es muy importante, puesto que una planta mal ubicada, será una instalación inútil (Guardado C., 2007). Es así como, una ubicación acertada permitirá alcanzar el mayor aprovechamiento de los recursos, optimizando el proceso de biodigestión. A continuación, encontrará una guía rápida para establecer los parámetros del terreno a elegir.

En primer lugar, se debe procurar que el lugar esté a menor distancia de la fuente de materia orgánica; luego, se debe buscar la manera que la planta sea cargada por efectos de la gravedad, es decir, un terreno con alguna inclinación presente; en tercer lugar, como se mencionó en el apartado anterior, el terreno debe estar cerca de una fuente de agua, para realizar la mezcla y mantener la limpieza de la planta. El cuarto elemento a tener en cuenta es la distancia que debe existir entre el biodigestor y el lugar donde se utilizará el biogás, pues debe cumplirse que $L_{\max} \leq 0,95P_{\max}$; donde L_{\max} es la distancia máxima en metros y P_{\max} es la presión máxima en milímetros de columna de agua); y en quinto lugar, se debe evitar el contacto con el manto freático, para prevenir las filtraciones hacia el interior o la contaminación del manto. Como norma, el fondo del biodigestor debe encontrarse a un metro o más del manto freático”

No sobra decir, que para un buen funcionamiento del biodigestor es necesario retirar de la zona desechos incensarios, como restos de plantas, escombros, raíces, hiervas, etc.

6.3. Tipo de planta

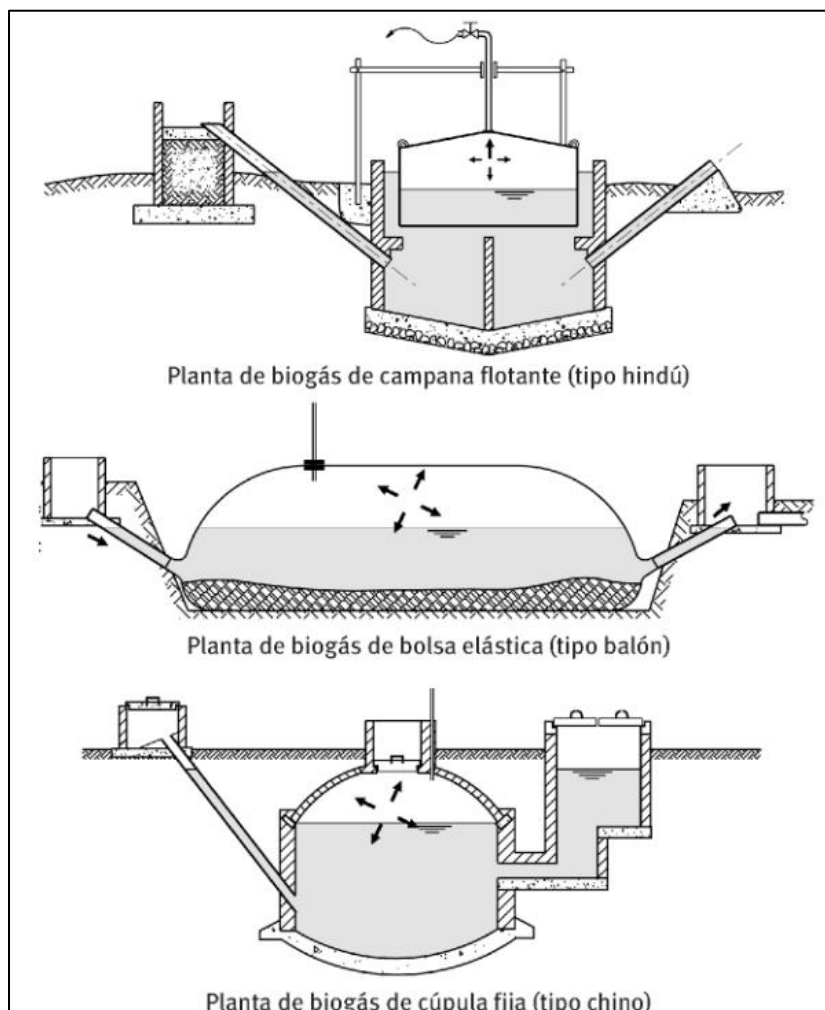
El diseño y dimensionamiento de un biodigestor depende del tipo y composición del material orgánico que se debe emplear para la biodigestión, de la demanda de biogás y de fertilizante, de los materiales requeridos para la construcción, de las tecnologías apropiadas, de la facilidad de mantenimiento y de los recursos económicos del hogar que implementará el biodigestor (Guardado C., 2007):

Por su parte, los biodigestores sin importar su tecnología se clasifican en dos tipos según su régimen: uno de flujo continuo, usado para obtener altos volúmenes de gas presenta un suministro de biogás uniforme; y otro de flujo discontinuo, usado para pequeñas producciones de gas, presenta un suministro intermitente.

En la figura 4 se muestran los tipos de biodigestores clasificados así: biodigestor de campana flotante, biodigestor de bolsa elástica y biodigestor de cúpula fija, en la que el gas se almacena en la parte superior debido al desplazamiento gaseoso.

Figura 4

Clasificación de los biodigestores según su forma.



Nota. El gráfico muestra la clasificación de las plantas de biogás simples más empleadas. Tomado de Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas. (p. 14), por José Guardado 2007. Cubasolar.

El biodigestor más económico respecto a los materiales requeridos para su implementación, así como su posterior mantenimiento es el de bolsa elástica, denominado también del tipo cilindro, Taiwanés (García & Marcelo, 2017) o tubular, por su parecido a tal forma geométrica. Sin embargo, su vida útil no supera los 10 años, mientras que el biodigestor de campana flotante y el biodigestor de cúpula fija superan los 20 años de vida útil (Guardado C., 2007). En la tabla 2 se describe las ventajas y desventajas de los biodigestores según la clasificación antes mencionada.

Tabla 2

Biodigestores: ventajas y desventajas.

Tipo de biodigestor	Ventajas	Desventajas
De cúpula fija	Diseño simple; fácil de mantener (sin necesidad de mover piezas); resistente a la oxidación; durabilidad superior a 20 años; costo de construcción moderado.	El gas puede provocar fracturas; es posible que haya fugas si la cúpula no está bien cimentada.
Bolsa Elástica (Cilíndrico)	sencillo, de construcción rápida y fácil; se transporta sin dificultad y su costo de construcción es muy bajo. Requiere un nivel freático bajo, lo que lo hace ideal para construcciones superficiales.	Presión de gas variable; baja resistencia y facilidad para perforarse; no es estructurable; vida útil de menos de 5 años; difícil de limpiar.
Campana Flotante	Presión de gas constante; permite visualizar fácilmente la cantidad de gas producido gracias a la altura de la campana.	Tiene problemas de corrosión; implica gastos adicionales por el tambor de acero; construcción complicada debido a las partes móviles.

Nota. La tabla presenta las ventajas y desventajas de implementar cada tipo de biodigestor o planta de biogás. Adaptado de Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas, por José Guardado 2007 y House, 2011.

Para el caso de los biodigestores cilíndricos, los componentes se especifican en la tabla 3 y se define si el uso de cada uno es de carácter obligatorio o no.

Tabla 3.

Componentes de un Biodigestor cilíndrico.

Componente	Descripción	¿Obligatorio?
Reactor	Es la bolsa plástica en dónde se almacena la materia orgánica necesaria para el proceso de fermentación. Lo más habitual es que esté construido de Polietileno (PE) o Policloruro de	Si

Componente	Descripción	¿Obligatorio?
	Vinilo (PVC), sin embargo, este último es más costoso, aunque más resistente.	
Tubería	Su material es de PVC, este es el ducto por el que se transporta en Biogás hasta su destino, habitualmente una cocina.	Si
Invernadero	También se denomina capa sola y como su nombre lo indica, es el encargado de protegerlo de la lluvia, mague y demás materiales que puedan, en alguna medida, causar daño en el reactor. Como se menciona en el marco teórico, el calor es indispensable para la obtención de biogás, por tal motivo este es indispensable en territorios donde la temperatura ambiente normal sea inferior a 20 °C.	No
Válvula	Se coloca en varias secciones del biodigestor, sin embargo, la más importante es la denominada Válvula de alivio, dado previene que el biodigestor explote por un aumento considerable de presión que no pueda soportar el reactor.	Si
Manómetros	Elemento que permite controlar la producción de biogás.	No
Gasómetro	O reservorio, como su nombre lo indica, es el lugar donde se almacena el biogás, este es importante que se encuentre lo más próximo al reactor, pues las pérdidas de presión en zonas muy alejadas pueden alterar el normal funcionamiento del usuario final.	Si

Nota. La tabla presenta los componentes necesarios para implementar un biodigestor cilíndrico. Adaptado de García (2017) & (Forget, 2011).

6.4. Dimensionamiento

Una vez seleccionado el lugar y despejado el terreno, se procede a determinar las dimensiones de la excavación según el tipo de biodigestor y el tanque de compresión o almacenamiento. La construcción debe realizarse a más de un metro por encima del nivel freático. Siempre que sea posible, es recomendable contar con la asesoría de un geólogo para evaluar la resistencia e impermeabilización necesarias del terreno, ya que es fundamental que el hueco se

mantenga estable y no se acumule ninguna sustancia. Por seguridad, se aconseja depositar la tierra extraída a más de un metro de distancia de la zona de excavación.

Además, es necesario cavar una zanja adicional para instalar el tubo de carga, que es por donde se introducen los desechos al biodigestor, y otra para los lixiviados. Estas zanjas deben diseñarse de manera que eviten la entrada de materiales no relacionados con el sistema.

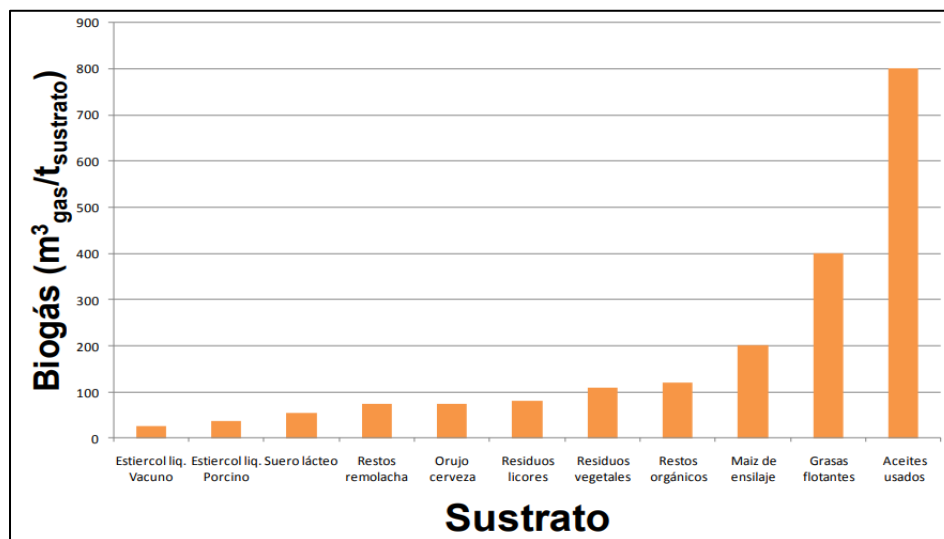
El tamaño del biodigestor y las dimensiones de las excavaciones, así como las instalaciones complementarias, estarán determinadas por la disponibilidad de materia orgánica y otros factores, como se detalla a continuación.

6.4.1. Estimación de carga diaria.

Se refiere a la cantidad de sustrato que se va a utilizar en la zona. Entre los desechos vacunos y porcinos, el estiércol de cerdo es mayor productor de biogás, como se observa en la figura 5.

Figura 5

Producción de biogás en función del tipo de residuo o sustrato



Nota. El gráfico muestra la cantidad de biogás producido por cada unidad de medida de sustrato. Tomado de Diseño, construcción y puesta a punto de un biodigestor tubular, Carazo-Nicaragua. Por (Gómez M., 2012).

6.4.2. Concentración del afluente (C_o) y Sólidos totales (ST).

La C_o es definida como la cantidad de sólidos volátiles SV que contienen componentes orgánicos, por volumen líquido total de este (Arrieta, 2016). Para hallar dicha concentración, se emplea la ecuación (2) o la ecuación (3).

$$c_o = \frac{SV(g)}{Volumen\ de\ la\ mezcla(l)} = \frac{\left(\frac{\%ST}{100}\right) * \left(\frac{\%SV\ de\ ST}{100}\right) * 1000g}{l_{agua} + l_{estiercol}} \quad (2)$$

$$c_o = \frac{\%ST - (\%SV\ de\ ST)}{10 * \left(\frac{\%ST}{\%ST_{deseado}} - 1 + \frac{1kg}{\rho_{estiercol}(kg/l)}\right)} \quad (3)$$

En caso de utilizar estiércol porcino, el % de sólidos totales ST se encuentra entre un 19% y 32%, aproximadamente. Por otra parte, los sólidos volátiles SV del total de los ST , oscilan entre 67 % y 83%. Por lo que, se considera un 25 % de ST y un 18.75 % de SV , es decir, que un 75 % de los sólidos totales ST son sólidos volátiles SV . Finalmente, se considera que la densidad del estiércol de porcino es 1 kg/l (CelAgrid, 2005).

6.4.3. Carga orgánica volumétrica (COV), rendimiento de producción de biogás y tiempo de retención de líquidos.

Después de la temperatura, la concentración del afluente y el tiempo de retención, son los parámetros más relevantes en la optimización para la producción de biogás (Alvarez & Lidén, 2008).

El tiempo de retención hidráulica TRH, está definido por la relación existente entre el volumen diario del afluente y el volumen líquido del biodigestor (García & Marcelo, 2017). Es decir, el parámetro varía si varía el líquido contenido en el reactor o el volumen del afluente. Dicha variación se presenta con el tiempo, debido a la generación de depósitos en el fondo del biodigestor. También es posible que varíe la concentración a caudal constante, al agregar más cantidad de agua o menos estiércol en la entrada.

El TRH se relaciona con la producción de gas. La COV, es decir, la carga orgánica volumétrica es un factor clave, ya que indica la cantidad que se aporta de materia orgánica por unidad de volumen del digestor diariamente. La relación que guardan la TRH, la C_o y la COV, se representa en la ecuación (4) (Arrieta, 2016).

$$TRH(dias) = \frac{c_o}{COV} = \frac{\frac{kgSV}{m^3 afluente}}{\frac{kgSv}{m^3 biodigestor.dia}} \quad (4)$$

Según experimentos realizados, en la biodigestión del estiércol porcino, en temperaturas del aire entre 25 y 30 °C, se reporta un COV de aproximadamente 2kg ST/m³ digestor-día, o 1.5 kg SV/m³ digestor-día (Arrieta, 2016). Se obtiene de 0.4 m³ biogás/kg SV o 0.3 m³ biogás/ kg ST de biogás y un TRH de 35 días, con una presión aproximadamente igual a la atmosférica.

6.4.4. Cantidad de materia prima y del volumen de líquido (VL).

Considerando el rendimiento de biogás para biodigestores cilíndricos en zonas rurales, se dimensiona este tipo de biodigestor en términos de la demanda diaria energética, y de la capacidad de carga orgánica al alcance en el lugar.

La cantidad de estiércol puede definirse de dos maneras: en primer lugar, se puede utilizar todo el estiércol generado, probablemente con el objetivo principal del compostaje, o para

reemplazar entre un 50% y 60% las fuentes tradicionales de combustible, como la leña, la bosta, etc. En segundo lugar, se puede usar la cantidad de estiércol necesaria para cubrir una demanda energética específica, como la cocina, calefacción o iluminación. Considerando esta última opción, se pueden calcular las dimensiones del biodigestor para cumplir con la demanda energética diaria, ya que se dispone de una cantidad específica de animales que proporcionan el estiércol necesario. Este cálculo toma en cuenta la etapa de crecimiento de los animales y el tiempo que permanecen en el establo, de manera que la recolección de la materia orgánica no represente una tarea ardua.

El biogás generado en estos biodigestores domésticos se utiliza principalmente para iluminar los espacios del hogar y para cocinar los alimentos. Pues, requiere tratamientos mínimos, limitándose a la reducción de vapor de agua y de ácido sulfhídrico, como en este caso.

Basándose en el rendimiento (m^3 biogás/kg SV) y la composición del estiércol (kg SV/kg de estiércol fresco), la cantidad de biogás requerida determina el volumen de estiércol a disponer. Esta cantidad, a su vez, define el volumen líquido del biodigestor a través de la COV (ver ecuación 5) o mediante el producto del volumen diario de mezcla o afluente Q_a (según la dilución recomendada) y el TRH (ver ecuación 6).

$$V_L = \frac{KgSV/día}{COV(KgSV/m^3biodigestor.día)} \quad (5)$$

$$V_L = Q_a * TRH \quad (6)$$

El volumen de gas producido por kilogramo de estiércol es determinado por los sólidos volátiles (% SV) incluidos en el proceso del biodigestor, como se define en la ecuación (7).

$$V_{req. TOTAL} = \frac{m^3 biogas}{dia} = E \left(\frac{Kg. Estiercol fresco}{dia} \right) * \quad (7)$$

$$\%MS * \%MV(deMS) * Rendimiento_{Biogas} \left(\frac{m^3 biogas}{kgSV} \right)$$

Donde:

kg SV/día = kg ST/día x % SV (sobre la MS).

kg MS/día = kg sustrato fresco/día x % MS (sobre sustrato fresco).

6.4.5. Volumen para el reactor.

El volumen del reactor está dado por la suma del volumen líquido y el volumen de gas contenidos (Arrieta, 2016). Se considera, que el volumen de gas contenido dentro del reactor es la tercera parte del volumen líquido, expresado en la ecuación (8). De manera que, se puede expresar el volumen del reactor en términos del volumen líquido, como muestra la Ecuación 9.

$$V_G = \frac{V_L}{3} \quad (8)$$

$$V_T = V_G + V_L \cong 1.33V_L \quad (9)$$

6.4.6. Longitud del reactor y Material.

Para la longitud del reactor, se hace cálculo teniendo en cuenta su relación teórica con el diámetro, dada por un valor óptimo, entre cinco y diez, ver ecuación 10. En cuanto al material, se recomienda geomembrana de PVC o doble capa de Polietileno PE (García & Marcelo, 2017).

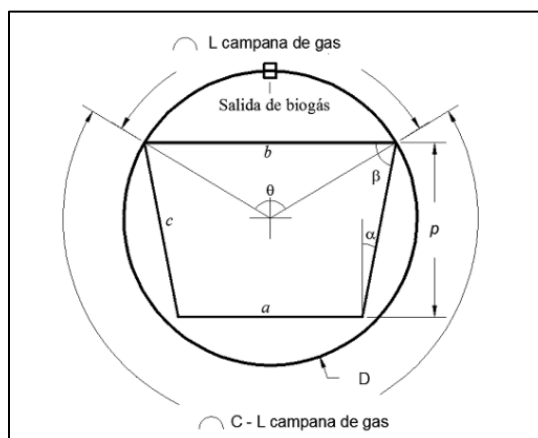
$$\frac{L}{d} = (5 - 10); Valor\ optimo = 7 \quad (10)$$

6.4.7. Dimensiones de la Zanja

Se recomienda hacer una zanja con forma de trapecio, cuyas paredes estén inclinadas, similar a una “V”. Según la investigación realizada por (Arrieta), primero se debe calcular el área transversal de la campana de gas, esta depende directamente del diámetro del biodigestor (2016), ver figura 6.

Figura 6

Geometría transversal de la Zanja



Nota. El gráfico muestra las medidas que debe tener una zanja respecto al reactor que se ubicará en ella. Tomado de Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado. Por (Arrieta, 2016). P (177).

La relación entre parámetros se denomina $f_{campana\ gas}$ y establece el ángulo central θ para n valores de la medida C , como lo expresa la ecuación (11).

$$L_{campana} = \pi D \left(\frac{\theta^0}{360} \right)^D = \frac{b}{\text{sen}(\theta(\text{rad})/2)} \rightarrow \theta^0 = \text{sen} \left(\frac{\theta(\text{rad})}{2} \right) * \frac{360 * f_{campana\ gas}}{\pi} \quad (11)$$

Los parámetros (a y c) estarán dados según el ángulo (α) de inclinación de las paredes, y después de obtener el lado b . Por su parte, el volumen líquido se ajusta al reactor, por lo que se

puede calcular el perímetro que abarca utilizando la ecuación (12). Además, a partir de la figura 6, se puede determinar dicho perímetro con la ecuación (13) y deducir la ecuación (14) para calcular el área transversal de la zanja. Posteriormente, al combinar las ecuaciones (13) y (14), se obtiene la ecuación (15) para determinar el lado c. Estas ecuaciones demuestran que, una vez que se establece el diámetro del biodigestor ($D_{\text{Biodigestor}}$ disponible en el mercado) y se elige el factor $f_{\text{campana gas}}$, el resto de las dimensiones y el área transversal de la zanja dependen únicamente del lado b y del ángulo α .

$$a + 2C = C - L_{\text{campana gas}} = \pi D - \theta(\text{rad}) * \left(\frac{D}{2}\right) \quad (12)$$

$$a = b - 2C * \text{sen}\alpha \quad (13)$$

$$A_{\text{zanja}} = p \left(\frac{a+b}{2}\right) = c \left(\frac{a+b}{2}\right) \cos\alpha = \left(\frac{a+b}{2}\right) \left(\frac{b-a}{2\text{sen}\alpha}\right) \cos\alpha = \frac{b^2 - a^2}{4T\text{an}\alpha} \quad (14)$$

$$c = \frac{D \left(\pi - \frac{\theta}{2}\right) - b}{2(1 - \text{sen}\alpha)} \quad (15)$$

También, es útil definir algunos factores adimensionales $f_a = \frac{a}{r}$ y $f_b = \frac{b}{r}$, donde r representa el radio del biodigestor (Mart & Cipriano, 2012). A partir de estos factores adimensionales, se puede establecer una relación entre las áreas transversales de la zanja y del biodigestor, que se expresa en la ecuación (16).

$$\frac{A_{\text{zanja}}}{A_{\text{biodigestor}}} = \frac{f_b^2 - f_a^2}{4\pi T\text{an}\alpha} \quad (16)$$

Así, se obtiene la ecuación (17) para f_a , en términos de las siguientes variables: f_b , $f_{campana\ gas}$ y α .

$$f_a = \frac{f_b - (2\pi - f_b * f_{campana\ gas})\text{sen}\alpha}{1 - \text{sen}\alpha} \quad (17)$$

Al analizar la revisión, se encuentra que el $f_{campana\ gas} = 1.2$ es el más adecuado para calcular los otros parámetros de diseño de la zanja y a partir de su forma es posible deducir la ecuación (18), donde al reemplazar por $b = \frac{f_b}{r}$ y se simplifica r con D , se obtiene la ecuación (19). Esta ecuación indica que el mayor ángulo α sólo depende de f_b y θ , es decir, sólo de $f_{campana\ gas}$.

$$\text{sen}\alpha = \frac{b}{D \left(\pi - \frac{\theta}{2} \right)} \quad (18)$$

$$\alpha < \arcsen \left(\frac{f_b}{2\pi - \theta} \right) \quad (19)$$

Así como se determina el ángulo máximo de las paredes de la zanja ($\alpha=24^\circ$, cuando $f_{campana\ gas} = 1.2$); también se obtiene α , que es el ángulo óptimo para el área transversal de la zanja. (Arrieta), sugiere usar $\alpha=7$, para lograr un volumen líquido VL que represente un valor cerca del 70% del volumen total ($VT = \pi D^2/4L_{biodigestor}$).

6.4.8. Cálculo del volumen del gasómetro

El gasómetro es el lugar donde se va a almacenar el gas para su uso. El biogás debe transportarse a los puntos de consumo con una presión adecuada, por lo que el gasómetro debe instalarse cerca de su destino.

Se denominará V_{gas} al volumen requerido del gasómetro, que se determina en función del máximo volumen obtenido de dos posibles maneras: primero, cubrir la máxima tasa de consumo (C_{max}) durante el tiempo (t_{Cmax}) especificado en la ecuación 20; segundo, almacenar el gas producido (G_h) durante un periodo de no consumo más prolongado (t_{noC}) como se indica en la ecuación 21.

$$V_{gsa1}(m^3) = C_{m\acute{a}x} \left(\frac{m^3}{h} \right) * t_{C_{m\acute{a}x}}(h) \quad (20)$$

$$V_{gsa2}(m^3) = G_h \left(\frac{m^3}{h} \right) * t_{noC}(h) \quad (21)$$

6.4.9. Diseño del Gasómetro

Es crucial considerar las condiciones de presión necesarias para evitar el deterioro del reactor, posibles fugas e incluso explosiones, ya que esto podría afectar negativamente la producción de biogás. Además, es importante asegurarse de que el estable no esté demasiado alejado de la vivienda beneficiaria. En la investigación de Werner et al. (1989), los autores proponen que la presión interna permisible para geomembranas de PE y PVC de 1 mm de espesor es de 42 Mbar (42 cm de columna de agua o 4200 Pa). Sin embargo, esta presión representa menos de una cuarta parte de la presión que pueden soportar este tipo de geomembranas. Por lo tanto, se utilizará una geomembrana de PVC de 0.6 mm de espesor, que funciona sin problemas con presiones entre 60 y 80 cm de columna de agua (6000 a 8000 Pa) para construir el gasómetro.

6.5. Instalación complementaria

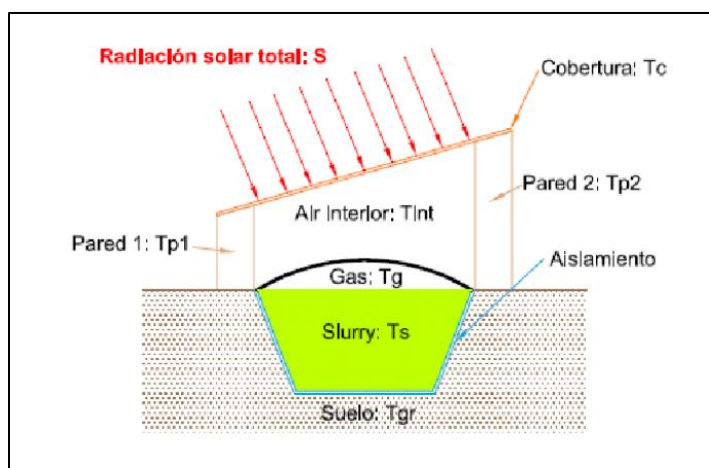
6.5.1. Diseño del invernadero

Los invernaderos construidos generalmente utilizan una película de polietileno como cobertura por su fácil instalación y su costo accesible. Cuando se emplea polietileno para aumentar

la temperatura de funcionamiento del biodigestor (ver Figura 7), es importante tener en cuenta que su vida útil, al estar directamente expuesto al sol, es de aproximadamente dos años por lo que deberá reemplazarse después de este periodo. (Perrigault), analiza el comportamiento térmico de un biodigestor cilíndrico de plástico que incluye invernadero como se muestra en la Figura 7, a partir de ello propone para la transferencia de calor unidimensional (1-D) un modelo matemático (2010). En cuanto a la inclinación del techo del invernadero, es importante considerar que el ángulo óptimo varía según la época del año y la latitud geográfica del sitio (Taha, 2003). Para un invernadero de una sola pendiente, la inclinación que permite captar la máxima radiación solar anual es aquella que se aproxima más a la latitud del lugar (Perrigault, 2010).

Figura 7.

Plano de un biodigestor con techo



Nota. El gráfico presenta el plano de un biodigestor con invernadero. Tomado de Diseño de un biodigestor tubular para zonas rurales de la región Piura. Por García (2017).

6.5.2. Tuberías de alimentación, Depósitos y Descarga del biodigestor

La entrada no debe exceder las 4 pulgadas de diámetro con tubería de PVC. Además, se recomienda construir un tanque de surtido, ya sea de cemento y ladrillo, que incluya una rejilla en

la entrada para evitar que cualquier material sólido no diluido pase a través de ella. Se sugieren que mida 0.8 m de largo, 0.6 m de ancho y 0.4 m de profundidad (aunque puede ser más grande), asegurando así que la carga diaria pueda ingresarse sin inconvenientes (García & Marcelo, 2017).

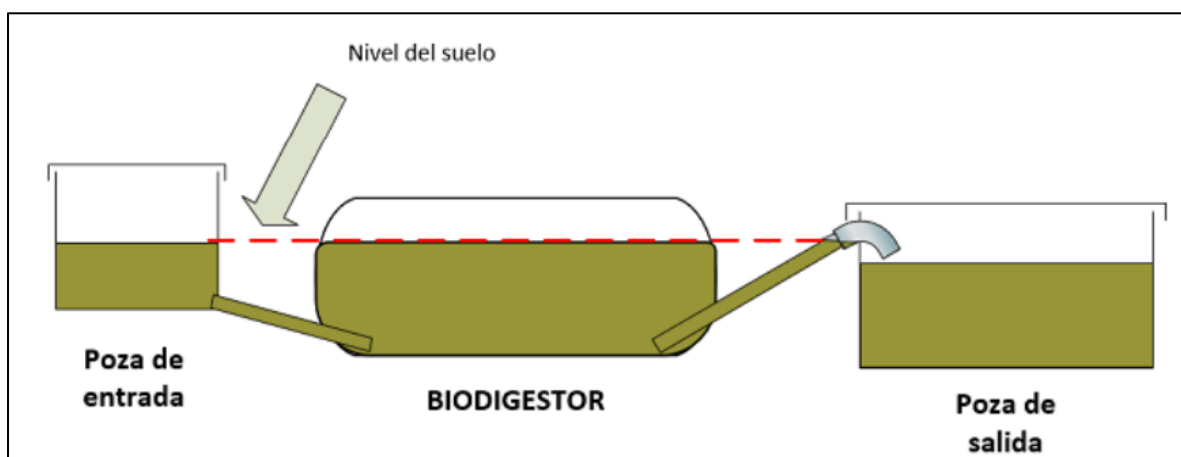
La tubería de salida o descarga, al igual que la entrada no debe exceder las 4 pulgadas de diámetro. Sin embargo, si se desea almacenar el lixiviado por un tiempo (lo cual es común para uso en cultivos), el depósito debe tener un volumen mayor que el de entrada (ver ecuación (22)).

$$Vol_{PozadeSalida}(m^3) = Q_{\dot{a}} \left(\frac{m^3}{h} \right) * Tiempo_{almacenado} \quad (22)$$

En la salida, se puede tener un espacio de 1500 L para reservar el biogás de una semana. Por su parte, en la salida, el depósito debe estar cubierto con una plancha metálica o plástica para protegerlo de la contaminación por cuerpos ajenos al proceso. Los niveles ideales de los respectivos depósitos de entrada y salida, así como el del biodigestor se muestran en la figura 8, a continuación.

Figura 8.

Niveles de entrada y salida de un biodigestor cilíndrico



Nota. El gráfico presenta los niveles de entrada y salida de un biodigestor cilíndrico. Tomado de Diseño de un biodigestor tubular para zonas rurales de la región Piura. Por García (2017).

6.5.3. Conducción de biogás y tuberías de captación

Las medidas de la tubería y los materiales a utilizar son importantes pues aseguran que la presión que se pierda durante el proceso sea mínima, puesto que es un sistema de baja presión (<100 mbar o 10 KPa). Además, debe ser de bajo costo, seguro y que garantice el transporte del gas hasta su uso final.

Luego de identificar el gas a conducir, se traza el recorrido de la tubería para calcular los accesorios y longitudes. Y finalmente, se selecciona el material.

Generalmente, se utilizan tuberías de PVC o acero galvanizado, o mangueras de PET, pues el biogás está compuesto por sulfuro de hidrógeno y vapor de agua, y podría corroer rápidamente los materiales en caso de utilizarse metales ferrosos.

Durante años, se han utilizado tuberías de PVC en instalaciones de aguas residuales y agua potable. Sin embargo, el HDPE, polietileno de alta densidad, que inicialmente se usaba para la conducción de gas, ha comenzado a ser utilizado en instalaciones de agua, por ejemplo, de la industria y la minería. Las tuberías de HDPE ofrecen ventajas como mayor durabilidad, resistencia a la degradación por UV y la posibilidad de ser instaladas al aire libre. Se adaptan con facilidad a terrenos con altibajos, y no presenta fugas en la unión de cada tubería, gracias a su fabricación mediante termofusión, electro fusión o accesorios de compresión. Sin embargo, estos métodos de conexión son más costosos, ya que requieren equipos especiales, lo que no es ideal para plantas de biogás domésticas. Por ello, se opta por utilizar tuberías de PVC, estas tuberías deben estar protegidas de la radiación UV y de golpes, por lo que es recomendable mantenerlas a la sombra e incluso bajo tierra.

Se requiere conocer el caudal de biogás para deducir el diámetro de la tubería, también la distancia al punto de utilización del biogás y la presión del gasómetro. A medida que disminuye

el diámetro y aumenta la longitud de la tubería, se produce disminución en la presión por fricción, lo que eleva las pérdidas de carga en codos, trampas de agua y filtros de gas, entre otros accesorios.

Después de hallar el caudal máximo, se calcula la longitud equivalente (L_{equi}) de los tramos, así como el diámetro mínimo y la pérdida de carga. Esta L_{equi} se calcula con la ecuación (23).

$$L_{eq} = L_r + L_a \quad (23)$$

Donde:

- L_{eq} = Longitud equivalente total de tubería (m)
- L_r = Longitud real de tubería sin accesorios (m)
- L_a = Longitud equivalente de tubería correspondiente a los accesorios (m).

La se puede considerar como el 20 % de L_r ; sin embargo, para obtener un cálculo más preciso, se utiliza la relación entre la longitud y el diámetro característico de cada accesorio. Así, la longitud equivalente de tubería asociada a los accesorios se representa en la ecuación (24).

$$L_a = D_i * Rel\left(\frac{L}{D}\right) \quad (24)$$

Donde:

- D_i = Diámetro interno de la tubería (m)
- $Rel(L/D)$ = Relación longitud/diámetro de cada accesorio (ver Tabla 4)

Tabla 4.

Relación longitud/Diámetro según el accesorio.

Accesoria	Relación (L/D)
Codo a 45	14
Codo a 90	30
Te con flujo a 90	60

Te a través de flujo	20
-------------------------	----

Nota. La tabla muestra la relación Longitud – Diámetro respecto a las conexiones los ángulos de inclinación de los codos de la instalación complementaria. Tomado de Diseño de un biodigestor tubular para zonas rurales de la región Piura. Por García (2017).

Las dos ecuaciones anteriores son válidas para cuando el recorrido del biogás es conocido. Pero, si se conoce la distancia entre los puntos de consumo y el gasómetro, se pueden hallar los diámetros de la tubería utilizando la Tabla 5.

Tabla 5.

Valores sugeridos para el diámetro de la tubería, según el caudal de biogás requerido y la longitud del sistema de tuberías, con una caída de presión máxima de 5 mbar.

	Tubería de acero Galvanizado			Tubería de PVC		
Longitud (m)	20	60	100	20	60	100
Caudal (m³/h)						
0.1	½"	½"	½"	½"	½"	½"
0.2	½"	½"	½"	½"	½"	½"
0.3	½"	½"	½"	½"	½"	½"
0.4	½"	½"	½"	½"	½"	½"
0.5	½"	½"	¾"	½"	½"	½"
1.0	¾"	¾"	¾"	½"	¾"	¾"
1.5	¾"	¾"	1"	½"	¾"	¾"
2.0	¾"	1"	1"	¾"	¾"	1"

Nota. La tabla muestra los valores recomendados para el diámetro de tubería de acuerdo con el caudal de biogás requerido y a la longitud del sistema de tuberías, para una caída de presión máxima de 5 mbar. Tomado de Diseño de un biodigestor tubular para zonas rurales de la región Piura. Por García (2017).

Para calcular con precisión la disminución de la presión en las tuberías, se utiliza la ecuación de Renourad Lineal (ver ecuación (25)), para casos con presiones bajas ($\Delta p \leq 100$ mbar).

$$\Delta p = 23200 * \rho_r * L_{eq} * Q^{1.82} * Q^{-4.82} \quad (25)$$

Donde los parámetros son: Δp = Caída de presión o pérdida de carga en las tuberías (mbar), ρ_r = Densidad relativa del gas (para el biogás: $\rho_r = 0.83$), L_{eq} = Longitud equivalente total de las tuberías de biogás (m), Q = Caudal de biogás (m^3/h), D = Diámetro interior de la tubería (mm),

Finalmente, al utilizar la ecuación de Renourad Lineal para calcular la pérdida de carga en una tubería de 100 m de longitud ($L_{eq} = 100$) y de diámetro $\frac{3}{4}$ " (19.05 mm) transportando 1 m^3 de biogás, se obtiene una pérdida de carga de 1.3 Mbar (1.3 cm de c.a.). Para un diámetro de $\frac{1}{2}$ ", la pérdida de carga es de 9.2 mbar (9.3 cm de c.a.) para una longitud de 100 metros, y de 5.5 mbar (5 cm de c.a.) para 60 metros. Estos valores, calculados con la ecuación de Renourad Lineal, confirman que los datos indicados en la Tabla 6 son correctos.

7. Etapa de Adaptación

En este capítulo se detallan los puntos mencionados anteriormente, con la particularidad de ser aplicados en el contexto definido del tipo de biodigestor a implementar, el lugar donde se instala, las dimensiones y componentes claves del ensamble y las instalaciones complementarias.

7.1. Análisis del entorno y ubicación de construcción.

El área de implementación está situada al norte de la provincia de Soto, a 35 Km de la ciudad de Bucaramanga y 494 Km de Bogotá, en el municipio de Matanza en la vereda El Filo, en la finca Altamira. Su estrato social varía entre uno y dos. Su temperatura media es de 20 °C. En el

sector es frecuente la crianza de ganado vacuno y porcino, así como otras actividades de agricultura.

7.2. Construcción de un biodigestor cilíndrico

La zona de implementación del Biodigestor es rural, ubicado en la vereda El Filo, en la finca Altamira, en el municipio de Matanza Santander. Allí el transporte de bombonas de gas resulta complejo debido al mal estado de las vías, dicha escasez y el bajo presupuesto disponible, inclinan la decisión de construir un biodigestor cilíndrico o de bolsa plástica por su costo económico bajo y altos beneficios ambientales y sociales.

El análisis se realizó en el siguiente orden, primero se hizo análisis del entorno y ubicación de construcción; luego, un análisis de elementos para el biodigestor cilíndrico, el dimensionamiento del reactor y la zanja, las instalaciones complementarias requeridas y finalmente, el funcionamiento del Biodigestor.

7.3. Análisis de elementos para el biodigestor cilíndrico.

A partir de la revisión de literatura, se extraen cuatro elementos importantes para la instalación del biodigestor cilíndrico o de bolsa plástica como se conoce también. Los cuatro elementos son el reactor, la tubería, la válvula y el reservorio o gasómetro.

7.3.1. Reactor

7.3.1.1. Estimación de la carga diaria. Como se mencionó en el capítulo anterior, el estiércol porcino es mejor que el estiércol vacuno, respecto a la producción de biogás por unidad de medida del estiércol. De manera, que la puesta en marcha de la implementación se hará con el excremento de 6 cerdos, ver figura 9, que producen aproximadamente 12 kg de excremento por día, valor similar al obtenido en un caso de la literatura (Molina y otros, 1999).

Figura 9

Cerdos de la Finca



7.3.1.2. Sólidos totales ST y Sólidos Volátiles SV. Para este caso, se propone una utilización de entrada del 25% de Sólidos Totales y un 18,75% de Sólidos Volátiles para el caso de excremento para el porcino (CelAgrid, 2005).

7.3.1.3. Rendimiento de producción de biogás, Carga orgánica volumétrica y Tiempo de retención de líquidos. El tiempo de retención hidráulica TRH encontrado en la literatura es de 35 días para condiciones similares a Matanza-Santander (Arrieta, 2016). La Carga Orgánica Volumétrica COV es de 2 ks ST/m³ (Arrieta, 2016). Con ello, aplicando la ecuación (4) se obtiene la concentración del afluente Co, como se detalla en la ecuación (26)

$$TRH(dias) = \frac{c_o}{COV} \Rightarrow c_o = (35 \text{ dias}) * \left(1,5 \text{ Kg} \frac{SV}{\text{dia} * m^3} \right) = 52.2 \frac{\text{Kg SV}}{m^3 \text{ digestor}} \quad (26)$$

Para determinar la cantidad de agua que se debe verter al estiércol, se implemente la ecuación (3), obteniendo que se debe agregar 21.5 litros por cada kg de estiércol, como se detalla en la ecuación (27),

$$c_o = \frac{SV}{\text{Volumen de la mezcla}} \rightarrow \text{Volumen de la mezcla} = \frac{1.125Kg SV}{52.2 \frac{Kg SV}{m^3}} = 21,5 \text{ litros} \quad (27)$$

7.3.1.4. Volumen líquido del biodigestor. Se calcula teniendo en cuenta la disponibilidad de residuos orgánicos, el agua y el requerimiento de biogás para la cocción de alimentos. Para saber el valor de Q_a , basta con calcular el volumen diario de agua de la ecuación (27) y el volumen de excremento diario. Se obtiene que el volumen de líquido del biodigestor es de 9.03 m^3 , como se detalla a continuación.

$$V_L = Q_a * TRH = 12 \text{ cerdos} * 21.5 \left(\frac{l}{dia} \right) * 35 \text{ dias} = 9.03 \text{ m}^3 \quad (28)$$

7.3.1.5. Volumen del reactor. El volumen del reactor se calcula según la ecuación (9), obteniendo un volumen aproximado de 12 m^3 , como se presenta en la ecuación 29.

$$V_{Total} = 1.33 * V_L = 12.5685 \text{ m}^3 \quad (29)$$

7.3.2. Dimensionamiento del reactor y la zanja

Para determinar la longitud y el radio del reactor se utiliza la ecuación (10). La relación entre L/d debe ser entre 5 y 10, por ende, se analiza distintas longitudes y sus respectivos volúmenes, escogiendo el más cercano y que esté por encima al volumen estimado anteriormente (12.5685 m^3), como se muestra en la siguiente Tabla 6.

Tabla 6

Componentes de un Biodigestor Tipo cilíndrico

Relación L/d	L (metros)	d (metros)	Volumen (m^3)
5	8	1,6	16,08

Relación L/d	L (metros)	d (metros)	Volumen (m³)
5	7	1,4	10,77
5	6	1,2	6,78
6	8	1,33	11,17
6	7	1,167	7,48
6	6	1	4,71
7	8	1,14	8,21
7	7	1	5,49
7	6	0,86	3,46
8	8	1	6,28
8	7	0,87	4,21
8	6	0,75	2,65
9	8	0,89	4,96
9	7	0,78	3,32
9	6	0,67	2,09
10	8	0,8	4,02
10	7	0,7	2,69
10	6	0,6	1,69

Según la tabla 7, el valor más cercano a 12 m³ corresponde a una relación L/d de 6. Es decir, para que el volumen no quede sobre o sub dimensionado, se debe guardar dicha relación. La finca cuenta con una zanja de 8 metros de largo, por lo que se propone aumentar el radio del

biodigestor. obteniendo una longitud final de 8 metros y un diámetro de 1.45 metros con un volumen del reactor de 13.21 m^3 . Sin embargo, el espesor del reactor puede hacer que el volumen reduzca un poco, obteniendo finalmente el valor formulado muy cercano a 12.5685 m^3 .

Por otra parte, el reservorio o gasómetro no harán partes de este proyecto, esto debido a que el sector cuenta con muchos animales, gallinas, ganado, cerdos, gatos, entre otros; que podrían dañarlo con facilidad, además que no hay instalaciones donde puedan estar seguro, por ello se adopta la opción de dejar la zona de gas como reservorio.

7.3.3. Instalaciones Complementarias.

7.3.3.1. Pozo de entrada. El pozo de entrada debe garantizar que la mezcla entre al biodigestor en régimen laminar, sin embargo, el lugar de los cerdos con respecto a la zanja tiene una diferencia de altura de 8 metros, por ende, se debe agregar un sistema que permita reducir considerablemente el caudal del fluido, ver figura 10.

Figura 10

Sistema de reducción de caudal de entrada al reactor



(a)



(b)



(c)



(d)

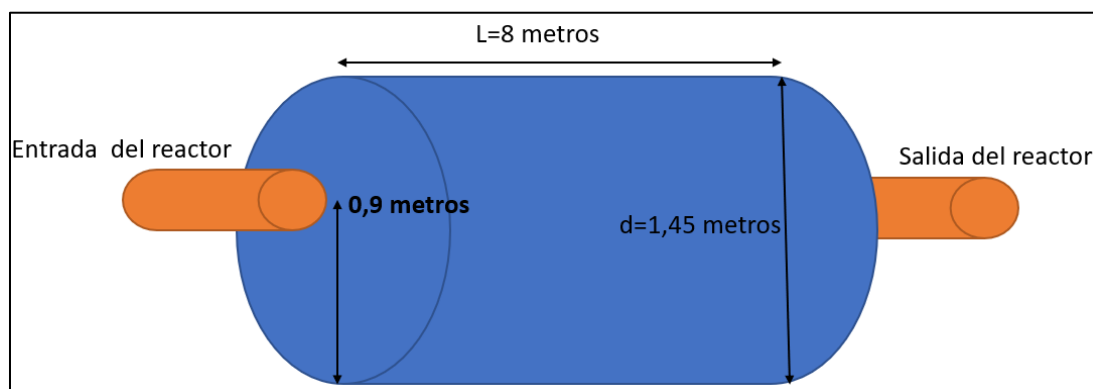
Nota: (a) Tubería de entrada al sistema de la reducción de caudal del afluente. (b) maceta de almacenamiento de 1m³ o tanque de almacenamiento. (c) tubería de conducción del afluente de la maceta a la cabina. (d) cabina con maya para evitar la entrada de material sólido.

Para lograr el régimen laminar en el pozo de entrada, el afluente entra a la tubería de alimentación, ver figura 10a, en régimen laminar, se conduce el líquido a una maceta o tanque de almacenamiento de 1 m³, ver figura 10b, logrando así reducir el flujo considerablemente, sin embargo, es importante que no entren sólidos al reactor, por ende, una vez sale el líquido de la maceta, como se observa en la figura 10c, y llega a la cabina de entrada, a la que se le agrega una malla, ver figura 10d. Esto también ayuda a reducir un poco la velocidad, sin embargo, su función principal es evitar la entrada de material sólido que pueda afectar el funcionamiento del reactor.

La altura de entrada y salida de la tubería del reactor, deben estar ubicados a una altura del 67% del diámetro del biodigestor, como se detalla en la figura 11.

Figura 11

Altura para la tubería de entrada y salida del reactor.



7.3.3.2. Pozo de salida. Para la salida del lixiviado se recomienda que sea también en régimen laminar, lo cual es consecuencia de la entrada de líquido al reactor en igual régimen. Por su parte, la finca es mayormente de crianza animal, por lo que el lixiviado se libera lejos de la casa, ver figura 12b, y de cualquier fuente de agua, pues este lixiviado tienen altos contenido de nutrientes, los cuáles vecinos aledaños aprovechan para utilizar y abonar sus cultivos especialmente de café.

Figura 12

Pozo de salida



(a)



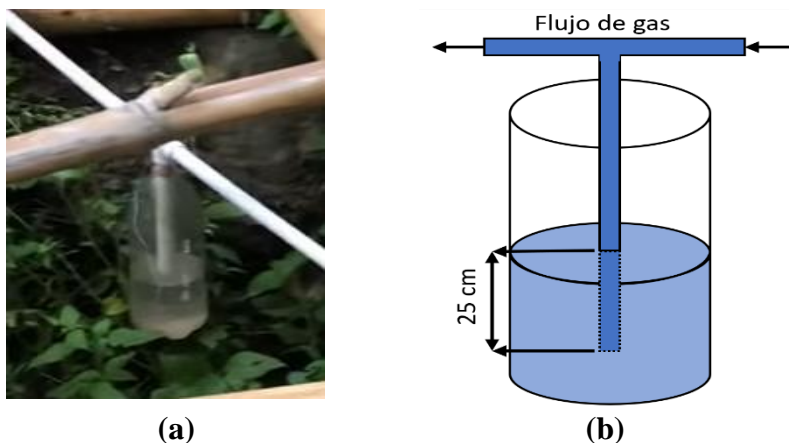
(b)

Nota: (a) Tubería de salida del Reactor. (b) conducción del lixiviado retirado de la casa y cualquier quebrada.

7.3.3.3. Válvula de alivio. Es posible que se produzca más gas del que se consume, por lo cual se utiliza una válvula de alivio para evitar que el reactor estalle o se desgaste rápidamente. En este caso, se hizo una adaptación propia de una válvula doméstica, construida con elementos disponibles en el lugar, ver figura 13.

Figura 13

Válvula de alivio.



Nota: (a) válvula de alivio implementada. (b) Esquema de la válvula de alivia.

Para calcular la presión máxima que soporta el reactor, se utilizará el esquema de la figura 13b, comprendiendo que la presión se relaciona con la altura de agua, obteniendo 2450 Pa, como se detalla en la ecuación (30).

$$P = \rho_{agua} * h * g = \left(\frac{1000kg}{m^3}\right) * 0.25m * 9.8 \frac{m}{s^2} = 2450 Pa = 0.36 psi \quad (30)$$

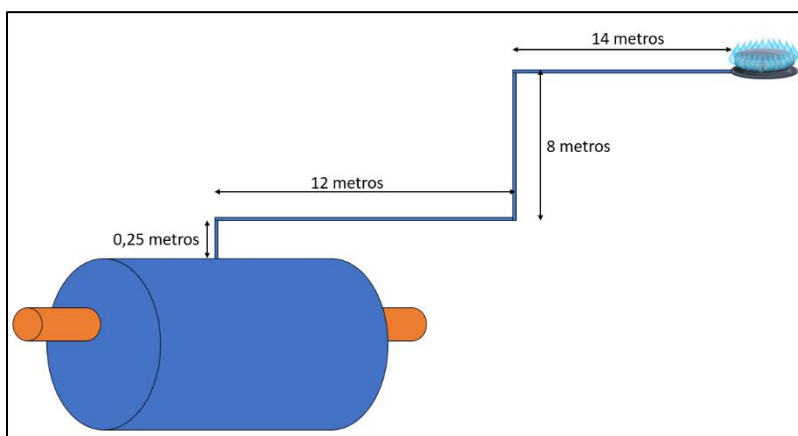
La anterior ecuación no tiene presente la presión atmosférica, por ende, debe añadirse para obtener la presión real, resultando en 103802 Pascales, como se muestra en la ecuación (31).

$$P = P_{atm} + (\rho_{agua} * h * g) = 2450 Pa + 101325 Pa = 103802 Pa = 15.06 psi \quad (31)$$

7.3.3.4. Tubería y pérdidas de presión. La tubería utilizada es de PVC de ½”, que aplica para longitudes entre 20-60 metros. También dispone de tres codos, requeridos para cumplir con el diseño presentado en la Figura 14. Las pérdidas de presión se producen a la presencia de los 3 codos, con 34,25 metros de tubería y 8,25 metros de altura total en la elevación de la tubería.

Figura 14.

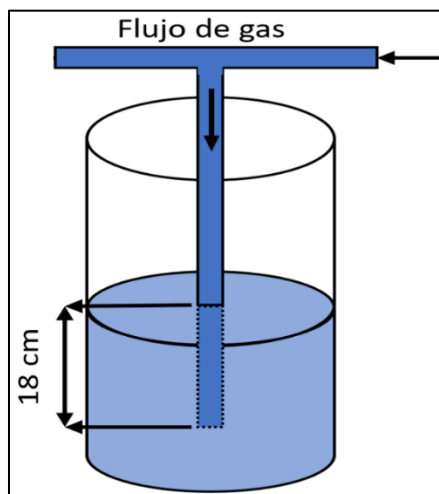
Tubería de PVC para comunicar el biogás con la estufa.



Las pérdidas se calculan colocando otra válvula de alivio al final de la tubería, próxima a la estufa. Se llena inicialmente con altura de 25 cm y cuando la válvula de alivio próxima al reactor indica mediante la generación de burbujas, se le quita 1 cm de altura de agua a la válvula de alivio próxima a la estufa. Luego, se espera 30 minutos y si la válvula de alivio próxima al reactor sigue generando burbujas, se vuelve a sacar 1 cm de agua a la válvula de alivio próxima a la estufa. Este proceso se repite hasta que la válvula de alivio próxima a la estufa empiece a emitir burbujas, cuyo resultado se ilustra en la Figura 15. Esto debe realizarse en un día caluroso en horas próximas al medio día.

Figura 15.

Válvula de alivio al final de la tubería



Aplicando la ecuación de cálculo de presión del agua en función de su altura, se obtiene que la presión de salida es de 103089 Pascales, como se detalla en la ecuación (32).

$$P = P_{atm} + \rho_{agua} * h * g = 101325 Pa + 1764 Pa = 103089 Pa = 14.95 psi \quad (32)$$

8. Implementación y funcionamiento del Biodigestor

Para el funcionamiento del biodigestor, todas las mañanas se aplica 270 litros de agua al excremento de los seis cerdos, para obtener la concentración del afluente de $52.2 \frac{Kg SV}{m^3 digestor}$, el cual se obtuvo con la ecuación (26). Se vierte al sistema de la reducción de caudal de entrada al reactor, es decir al pozo de entrada, manteniendo abierto únicamente la válvula de alivio próxima al biodigestor. Teóricamente se debe esperar 35 días para que se produzca biogás, sin embargo, en este caso para asegurar el proceso, se empieza a utilizar el biogás únicamente cuando la válvula de alivio próxima al reactor empieza a burbujear, el tiempo real (TRH) es de 41 días, desde la primera carga del sistema, hasta el primer día en que se obtuvo biogás y se utilizó para cocinar, en otras palabras, hasta que alcanzó la fase estacionaria.

Durante esos primeros 41 días, se realiza el proceso de digestión anaeróbica, que se concentra principalmente en la fermentación microbiana en ausencia de oxígeno. Allí participan diversos microorganismos dependiendo de la fase de digestión. La primera fase es la hidrólisis, donde, los polímeros complejos como carbohidratos, lípidos y proteínas se descomponen en compuestos más simples, como azúcares, ácidos grasos y aminoácidos. El nombre de esta etapa se debe a la acción de bacterias hidrolíticas como *Bacteroides*, *Lactobacillus*, *Propionibacterium*, *Sphingomonas*, *Sporobacterium*, *Megasphaera* y *Bifidobacterium*, que degradan las moléculas iniciales en productos más accesibles para las fases siguientes (Moreno, 2021). Luego, en la fase de acidogénesis, los productos simples de la hidrólisis se convierten en ácidos orgánicos (como ácido acético, propiónico y butírico), alcoholes y gases como hidrógeno y dióxido de carbono. El término "acidogénesis" refleja la actividad de bacterias acidogénicas como *Propionibacterium*, *Bifidobacterium*, *Streptococcus*, *Enterobacterias*, *Clostridium*, *Paenibacillus*, *Ruminococcus* y el complejo *Cytophaga-Flavobacterium-Bacteroides*, que producen los ácidos característicos de esta etapa (Moreno, 2021). En la tercera fase, acetogénesis, los ácidos orgánicos y otros compuestos intermedios se transforman en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. La etapa recibe su nombre por la presencia predominante de bacterias acetogénicas, como *Syntrophobacter wolinii*, *Syntrophomonas wolfei*, *Acetobacterium*, *Acetoanaerobium* y *Acetogenium*, que son esenciales en la conversión hacia precursores del metano. Finalmente, en la metanogénesis, actúan las arqueas metanogénicas utilizando el ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono para producir metano y agua. Esta etapa lleva su nombre debido a la actividad de arqueas metanogénicas como *Methanobacterium*, *Methanospirillum hungatii* y *Methanobrevibacter*, que son responsables de la generación del metano, el componente principal del biogás (Moreno, 2021).

Una vez cumplido dicho proceso, se produce una llama apta para cocinar cualquier alimento, como se muestra en la Figura 16.

Figura 16.

Estufas del Biodigestor



(a)



(b)

Nota: (a) Estufa de un solo puesto. (b) Estufa de varios puestos.

Los tiempos de cocina habitualmente son 90 minutos en la mañana, 120 minutos en la tarde y 60 minutos en la noche. Aunque en días soleados, la llamarada presenta mayor intensidad, en la noche dicha intensidad disminuye, después de analizar el funcionamiento del biodigestor durante 60 días, se obtiene que en ningún caso el hogar se quedó sin biogás y el biogás era suficiente para cocinar tanto en días lluviosos como soleados. Lo que comprueba que la variación de temperatura ambiental no afecta representativamente la producción de biogás tal como lo presenta (Pedraza y otros, 2002).

Adicionalmente, se puede mencionar que después de los 60 días de observación, se empezó a denotar que el tiempo de retención hidráulica era menor, alcanzando un TRH de 15 días. Una

vez estabilizado el sistema se realizó una prueba cromatográfica para identificar los componentes del biogás

Tabla 7

Gases presentes en el biogás

Componente	Símbolo	Concentración (vol/%)
Metano	CH_4	55-70
Dióxido de Carbono	CO_2	35-40
Agua	H_2O	2-7
Sulfuro de Hidrógeno	H_2S	2
Nitrógeno	N_2	<2
Oxígeno	O_2	<2
Hidrogeno	H_2	<1
Amoniaco	NH_3	<0.05

Finalmente, puede que el biodigestor se llene de sedimento produciendo obstrucción y mal funcionamiento del sistema, en esos casos se realiza limpieza mediante inyección de agua desde el depósito de entrada hasta el depósito de salida, con un indicador empírico: la claridad del agua de salida debía ser muy similar a la inyectada. En este paso, no se tomaron medidas técnicas para comprobar que el sedimento haya sido extraído del reactor.

Al cabo de un tiempo de operar y proveer biogás, el biodigestor dejó de funcionar debido a que el encargado de mantenerlo se desplazó a otro país; y quienes tomaron la finca no continuaron con dicha implementación.

9. Conclusiones

El biodigestor más económico respecto a los materiales requeridos para su implementación, así como su posterior mantenimiento es el de bolsa elástica, denominado también del tipo cilindro, o tubular, o tipo salchichón como se conoce en el área de implementación, por su parecido a tal forma geométrica. Durante muchos años, las tuberías de policloruro de vinilo (PVC) han sido ampliamente utilizadas en instalaciones de agua tanto residuales como potable. Por su bajo costo y durabilidad son elegidas en entornos locales en Santander, Colombia y Latinoamérica.

Existen muchos elementos que se pueden agregar a los biodigestores, que dependen de quien implementa la planta, y del propósito de esta. Sin embargo, hay elementos que no pueden faltar en su diseño o construcción, como es el reactor, la tubería, la válvula y el gasómetro o reservorio. Aunque, algunos de ellos pueden ser reemplazados por alternativas que cumplan la misma función.

Tal cómo se encontró en la literatura, los elementos de menor costo y fácil acceso como las tuberías de pvc, o reactores con bolsas de Plietileno, fueron las que se encontraron en el mercado disponibles para su utilización en la práctica. Esto, debido a que en la literatura se encontró muchos procedimientos empíricos para la construcción de biodigestores rurales, que en su mayoría era implementaciones en países de vía de desarrollo y lugares cuyas características eran similares a las presentadas en el actual trabajo de grado.

Aunque en la literatura se estimaba un tiempo de retención hidráulica TRH de 35 días, en la práctica resultó un TRH de 41 días, y 40 días en promedio. Esto debido a una mayor concentración del afluente C_o y/o menor carga orgánica volumétrica COV. Sin embargo, después de la estabilización del sistema, y después del período de observación se empezó a denotar que el llenado del biodigestor era menor, incluso con un TRH de 15 días.

El uso de las fórmulas existentes y disponibles en la literatura para el diseño y mapeo de las excavaciones y dimensiones de los biodigestores permiten la facilidad de su duplicación e implementación doméstica.

Los lixiviados también son aprovechados como fuentes de nutrientes para los cultivos, en este caso principalmente de café.

La temperatura juega un papel importante para la biodegradación de la materia orgánica, incluso permite una mejor higienización del lixiviado. Las temperaturas más elevadas en los sistemas termofílicos permiten reacciones más rápidas y una producción de gas más eficiente. En este caso se confirma por observación que la llamarada de gas en días con temperatura menores a 18 °C es de menor intensidad, y que, en días de temperaturas mayores a 22°C la llamarada tiene mayor intensidad.

La cultura y ambiente social, juega un papel importante en el aprovechamiento de la planta de biogás, ya que la novedad o el desconocimiento en los temas presentados en el actual trabajo, pueden ocasionar desperdicio o incluso terminar la operación del biodigestor.

10. Recomendaciones

Hacer uso de las fórmulas para el dimensionamiento del biodigestor es fundamental, pues aporta una guía exacta del paso a paso y los requerimientos para su construcción. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que las condiciones propias del terreno dictarán pautas para tomar decisiones sobre el diseño y la construcción de la planta. Por ejemplo, en este caso se tenía 8 metros para realizar la zanja, de manera que para conservar la relación Longitud/Diámetro propuesto por la literatura se ajustó el radio. Por lo que se recomienda, estar abiertos a hacer los ajustes que se requieran.

Para la implementación de los biodigestores domésticos, se debe tener en cuenta la opinión del encargado del lugar o del biodigestor mismo, ya que esto también puede influir en el diseño del biodigestor, así como la disponibilidad de los recursos, desde el terreno hasta la inversión monetaria y disposición final de los desechos.

Referencias Bibliográficas

- Abanades, S., Abbaspour, H., Ahmadi, A., Das, B., Ehyaei, M. A., Esmailion, F., & Bani-Hani, E. H. (2021). A critical review of biogas production and usage with legislations framework across the globe. . *International Journal of Environmental Science and Technology*.
- Alvarez, R., & Lidén, G. (s.f.). The effect of temperature variation on biomethanation at high altitude. *Bioresource technology*, 7278-7284.
- Angelidaki, I., & Sanders, W. (2004). Assessment of the anaerobic digestion biodegradability of macropollutants. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*.
- Arrieta, W. J. (2016). Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado. 177.
- AYC. (21 de Febrero de 2020). *Ambiente y Ciencia*. <https://www.elnuevosiglo.com.co/ambiente-y-ciencia/gestion-de-residuos-organicos-un-desafio-para-colombia>
- Blank, D., Brockmann, K., Burian, M., Foerster, & & Kapor, Z. (2009). PoA CDM manual: mini biogas plants for households. . (2009).
- Calvo Buendía, E., Guendehou, S., Limmeechokchai, B., Pipatti, R., Rojas, Y., Sturgiss, R., . . . Wirth, T. (2019). 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- CelAgrid, U. (2005). Effect of length: diameter ratio in polyethylene biodigesters on gas production and effluent composition. *Livestock Research for Rural Development*.
- DNP. (2020). <https://www.elnuevosiglo.com.co/ambiente-y-ciencia/gestion-de-residuos-organicos-un-desafio-para-colombia>

- DNP. (2022). *Economía circular Minambiente*. <https://economiacircular.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/06/guia-nacional-para-la-adecuada-gestion-de-residuos-colombia-2022.pdf>
- Forget, A. (2011). Manual de diseño y de difusión de biodigestores familiares, con enfoque en biodigestores tubulares. *Technologies appropriées—mon expérience péruvienne*.
- García, R., & Marcelo, G. (2017). *Diseño de un biodigestor tubular para zonas rurales de la región Piura*.
- Garfí, M., Martí-Herrero, J., Garwood, A., & Ferrer, I. (2016). Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 599-614. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.071>
- Ghiandelli, M. (2017). *Development and implementation of small-scale biogas balloon biodigester in Bali, Indonesia*.
- Gobierno, C. (2021). *Función Pública*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326>
- Gómez M., S. (2012). Diseño, construcción y puesta a punto de un biodigestor tubular, Carazo-Nicaragua. <https://doi.org/https://e-archivo.uc3m.es/entities/publication/305c78a8-0f83-4baf-8c28-fd938f481039>
- Guardado C., J. A. (2007). *Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas*. Cubasolar.
- Hernández, C. (2023). *Portafolio*. <https://www.portafolio.co/economia/gobierno/volcan-cerro-bravo-servicio-geologico-explico-sus-emisiones-de-gas-583178>
- IPCC. (2024). *IPCC*. <https://www.ipcc.ch/about/>
- ISO. (2018). Biogás — Producción, acondicionamiento, valorización y utilización del biogás — Términos, definiciones y sistema de clasificación.

- Jørgensen, P. J. (2009). Biogas-green energy. . *Faculty of Agricultural Sciences, Aarhus University*.
- Kim, E., Ahn, B., & Kang, C. (2003). Evaluation of the Nutritive Value of Local Defatted Rice Bran and Effects of Its Dietary Supplementation on the Performance of Broiler Chicks. *Journal of Animal Science and Technology*, 45, 759-766.
<https://doi.org/10.5187/JAST.2003.45.5.759>
- Koustoula, M. (2017). Ex-Situ Biogas Upgrade in Plug-Flow Reactors.
- Mace, S., Bolzonella, D., Cecchi, F., & Mata-Alvarez, J. (2003). Comparison of the biodegradability of the grey fraction of municipal solid waste of Barcelona in mesophilic and thermophilic conditions. *Water Sci Technol*, 48, 21–28.
<https://doi.org/10.2166/wst.2003.0212>
- Mart, J., & Cipriano, J. (2012). Design methodology for low costlow-cost tubular digesters. . *Bioresource Technology*.
- Minambiente. (Agosto de 1997).
http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/residuos/politica%20y%20plan%20de%20accion/politica%20de%20residuos.pdf
- Minambiente. (2024). *Gobierno Nacional aprueba nueva política para la gestión integral de los residuos sólidos*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible:
<https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/2562-gobierno-nacional-aprueba-nueva-politica-para-la-gestion-integral-de-los-residuos-solidos>
- Molina, K., Caicedo, L., & Duque, C. (1999). Tratamiento de las excretas de cerdo mediante un reactor anaeróbico SCFBR a nivel de banco. . *Revista Colombiana de Biotecnología*.

- Perrigault, T. (2010). Mejoramiento del comportamiento térmico de un biodigestor low-cost tipo plug-flow.
- PNUMA. (18 de 07 de 2014). *EUR-LEX*. Convenio de Basilea: <https://observatoriop10.cepal.org/es/media/158>
- Roa, R. (2024). <https://www.vanguardia.com/economia/nacional/2024/07/24/que-plantean-ecopetrol-y-minminas-ante-deficit-de-gas-para-2025/>
- Rodríguez, J. (2023). *Portafolio*. <https://www.portafolio.co/economia/gobierno/crisis-de-gas-en-colombia-gobierno-responde-si-hay-desabastecimiento-o-no-583277>
- Schnurer, A., & Jarvis, A. (2009). Microbiological Handbook for Biogas Plant. *Swedish Waste Management*, 1-74.
- Taha, A. (2003). Simulation model of energy fluxes in passive solar greenhouse with concrete North wall. ph. D. Thesis Institute for Techniik in Gratenbau and landwirtschaft, Universitat Hanover, Germany.
- Tefera, T. (2009). Potential for biogas production from slaughterhouses residues in Bolivia: Systematic approach and solutions to problems related to biogas production at psychrophilic temperature. *Environmental Engineering and sustainable development*.
- UNEP. (2024). *Programa para el medio ambiente*. <https://www.unep.org/es/resources/perspectiva-mundial-de-la-gestion-de-residuos-2024>
- Vasco-Correa, J., Khanal, S., Manandhar, A., & Shah, A. (2018). Digestión anaeróbica para la producción de bioenergía: estado global, implicaciones ambientales y tecnoeconómicas, y políticas gubernamentales. *Bioresource Technology*, 247, 1015-1026. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.004>