

IMPLEMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR PARA EL APROVECHAMIENTO  
ENERGÉTICO DE RESIDUOS ORGÁNICOS DE BUFALOS EN EL MUNICIPIO DE  
RIONEGRO, SANTANDER

GUILLERMO ZAMUDIO LOZA  
JUAN SEBASTIAN GOMEZ AGUILAR

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA (UNAB)  
FACULDA DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA EN ENERGÍA  
BUCARAMANGA  
2021

IMPLEMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR PARA EL APROVECHAMIENTO  
ENERGÉTICO DE RESIDUOS ORGÁNICOS DE BUFALOS EN EL MUNICIPIO DE  
RIONEGRO, SANTANDER.

GUILLERMO ZAMUDIO LOZA  
JUAN SEBASTIAN GOMEZ AGUILAR

Trabajo de grado para optar por el título de  
INGENIERO EN ENERGÍA

Director:  
Prof. YECID ALFONSO MUÑOZ, PhD.

Codirectora:  
Prof. GIANINA GARRIDO, MSc.

Asesor:  
Prof. CARLOS ALIRIO DIAZ, PhD. C

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA (UNAB)  
FACULDA DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA EN ENERGÍA  
BUCARAMANGA  
2021

Nota de aceptación

Aprobado por el Comité Curricular en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Bucaramanga para optar el título de Ingeniero en Energía.

---

Firma del director

---

Firma del codirector

---

Firma del asesor

---

Firma del evaluador

---

Firma del evaluador

Bucaramanga, 24 de Junio de 2021

## AGRADECIMIENTOS

Damos gracias a Dios por permitirnos culminar este proyecto de manera exitosa, finalizando una meta que inicio en el año 2017 y de esta manera emprender nuevas etapas en nuestras vidas.

También queremos aprovechar este espacio para agradecer a nuestros amigos “Camilo Eduardo Delgadillo, Bayrón Diaz Sanabria, Jhon Lewis Lora, Laura Catalina Jaramillo y familiares, quienes en varias ocasiones nos impulsaron a seguir adelante. A ellos muchas gracias.

Quisiéramos agradecer de igual manera al Señor Luis Gabriel Becaria por permitirnos realizar este proyecto en su terreno y por facilitarnos todos los recursos para su desarrollo.

Gracias también a los residentes de la finca “Si Dios Quiere” por estar presentes en el desarrollo de la zanja, el montaje del reactor anaerobio, por mantenernos informados en la producción de biogás y por colaborarnos con los datos de uso de este para los procesos de cocción.

Queremos expresar en gran medida nuestro aprecio y agradecimiento a nuestro director de tesis Yecid Muñoz y a nuestra codirectora Gianina Garrido por corregirnos y supervisarnos en todo momento, estando presentes y al pendiente de todas las fases del proyecto.

También apreciamos la información y apoyo de nuestro asesor Carlos Alirio Diaz, quien nos colaboró con diferentes inquietudes con respecto al tema de la intercambiabilidad de gases y pautas a tener presentes para la correcta instalación del biogás en el sistema a utilizar.

Queremos agradecer a la Universidad Autónoma de Bucaramanga por formarnos con el conocimiento y las competencias para enfrentar diferentes ámbitos laborales y prácticos.

Finalmente, expresamos nuestro agradecimiento a todas las personas que directa o indirectamente estuvieron involucradas en la culminación de este proyecto.

# CONTENIDO

## Contenido

### Tabla de contenido

Resumen .....	10
Abstract .....	11
Introducción .....	12
1.Objetivo .....	13
1.1.Objetivo general .....	13
1.2. Objetivos específicos.....	13
2. Planteamiento del problema.....	14
3. <i>Marco conceptual</i> .....	15
3.1. Biomasa .....	15
3.2. Tecnologías de aprovechamiento de biomasa.....	15
3.3. Biogás .....	16
3.4. Digestión anaerobia .....	17
3.5. Fermentación metanogénica .....	17
3.5.1 Hidrólisis o licuefacción .....	18
3.5.2 Acidogénesis o fermentación.....	18
3.5.3 Acetogénesis.....	18
3.5.4 Metanogénesis .....	18
3.6. Biodigestores .....	18
3.6.5 Biodigestor de modelo Indiano .....	19
3.6.6 Biodigestor de modelo Chino.....	20
3.6.7 Biodigestor de modelo batch .....	21
3.6.8 Biodigestor de modelo tubular.....	22
3.7 Tabla comparativa.....	23
3.8 Factores que determinan los procesos metanogénicos .....	24
3.8.1 Naturaleza y composición de materia prima .....	24
3.8.2 Relación carbono/nitrógeno de materias primas.....	24
3.8.3 Solidos totales (S.T).....	25
3.8.4 Solidos Volátiles (S.V).....	25

3.8.5 Temperatura .....	26
3.8.6 Tiempo de retención hidráulico (TRH).....	27
3.8.7 Velocidad de carga orgánica .....	27
3.8.8 PH.....	27
3.8.9 Efluente líquido (biofertilizante) .....	27
3.9 Instrumentación de un digester anaerobio .....	27
3.9.1 Sensor .....	28
3.9.2 Sensor de presión .....	28
3.9.3 Sensor de temperatura (DS18B20).....	28
3.9.4 Sensor de gas metano (MQ-4).....	29
3.9.5 Arduino .....	29
4. Marco referencial .....	30
4.1 Estado del arte .....	30
4.2 Contexto Latinoamericano y Nacional.....	34
5. Metodología.....	35
6. <i>Desarrollo del proyecto</i> .....	36
6.1 <i>Fase 1: Caracterización del sitio</i> .....	36
6.1.1 <i>Ubicación del sitio</i> .....	36
6.1.2 Biomasa disponible del lugar.....	36
6.2 Parámetros del biodigestor .....	37
6.3 Parámetros obtenidos en laboratorio.....	38
6.4 Dimensionamiento del envoltorio .....	40
6.5 Dimensionamiento de la zanja .....	41
6.6 <i>Dimensionado del reservorio y determinación de los diámetros de tubería</i> .....	41
6.7 Sistema de toma de datos .....	44
6.7.1 <i>Diagrama de bloques</i> .....	44
6.7.2 <i>Esquema del sistema de adquisición de datos</i> .....	45
6.7.3 <i>Programación de los sensores</i> .....	46
6.8 Implementación del Biodigestor .....	52
6.8.1 Construcción de la zanja e integración del biodigestor.....	54
6.8.2 <i>Incorporación del biodigestor</i> .....	56
6.8.3 Implementación del reservorio e instalación al biodigestor .....	57
6.9 Toma de muestra de la cromatografía y resultado del análisis .....	59
6.9.1 Balance teórico de combustión del biogás.....	60

<b>6.9.2 Análisis de intercambiabilidad.....</b>	<b>61</b>
<b>7. Análisis de resultados .....</b>	<b>63</b>
<b>7.1 Análisis de resultados de la matriz ANOVA.....</b>	<b>63</b>
<b>7.2 Esquema final del proyecto.....</b>	<b>67</b>
<b>7.3 Modificación del quemador doméstico e instalación al reservorio.....</b>	<b>69</b>
<b>7.4 Análisis del tiempo de cocción y durabilidad de la llama.....</b>	<b>70</b>
<b>7.5 Costos del proyecto .....</b>	<b>71</b>
<b>7.6 Retorno simple de inversión.....</b>	<b>72</b>
<b>8. Conclusiones:.....</b>	<b>73</b>
<b>9. Recomendaciones .....</b>	<b>74</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>75</b>

## Lista de ilustraciones

Ilustración 1 Tecnologías de aprovechamiento de biomasa.....	16
Ilustración 2 Biodigestor modelo Indiano.....	19
Ilustración 3 Biodigestor modelo chino.....	20
Ilustración 4 Biodigestor modelo batch.....	21
Ilustración 5 Biodigestor modelo tubular .....	22
Ilustración 6 Tasa de crecimiento relativo de microorganismos .....	26
Ilustración 7 Metodología del proyecto.....	35
Ilustración 8 Ubicación geográfica de la finca .....	36
Ilustración 9 Esquema representación isométrica .....	42
Ilustración 10 Perforación del suelo .....	43
Ilustración 11 Sistema de sensores .....	44
Ilustración 12 Ilustración Diagrama de bloques.....	45
Ilustración 13 Esquema de instrumentación para adquisición de data.....	45
Ilustración 14 Medición del plástico calibre 7 .....	52
Ilustración 15 Apertura y sellado de la salida de biogás.....	52
Ilustración 16 Elaboración del agitador .....	53
Ilustración 17 Incorporación de la entrada y salida del biodigestor .....	53
Ilustración 18 Perforación de la zanja .....	54
Ilustración 19 Confección del guarda sombra .....	54
Ilustración 20 Adhesión del polietileno en la zanja e integración del biodigestor .....	55
Ilustración 21 Mezcla [1:2] de estiércol agua .....	55
Ilustración 22 Carga y alimentación del biodigestor .....	55
Ilustración 23 Biodigestor tubular .....	56
Ilustración 24 Acople de válvula de seguridad y sensores .....	57
Ilustración 25 Instalación de las tuberías .....	57
Ilustración 26 Acople del reservorio en el sistema .....	58
Ilustración 27 Llenado del reservorio.....	58
Ilustración 28 Composición GLP producido en la refinería de Barrancabermeja .....	61
Ilustración 29 Intervalos de CH <sub>4</sub> VS Temperatura, día 9 .....	64
Ilustración 30 Intervalos de CH <sub>4</sub> VS Temperatura, día 14 .....	65
Ilustración 31 Intervalos de CH <sub>4</sub> VS Temperatura, día 20 .....	66
Ilustración 32 Mediciones diarias .....	67
Ilustración 33 Esquema final de la finca.....	68
Ilustración 34 Quemador doméstico y su interior .....	69
Ilustración 35 Tipo de llama del biogás producido .....	70

## Listas de tablas

Tabla 1 Características generales del biogás .....	17
Tabla 2 Características de los biodigestores.....	23
Tabla 3 Residuos orgánicos.....	24
Tabla 4 Relación C/N de los distintos tipos de residuos animales .....	25
Tabla 5 Principales artículos investigativos del estado del arte .....	31
Tabla 6 Cálculos del biodigestor .....	37
Tabla 7 Datos de laboratorio .....	38
Tabla 8 Diámetros del biodigestor.....	40
Tabla 9 Tabulación del biodigestor .....	40
Tabla 10 Diámetro de la zanja .....	41
Tabla 11 Valores tabulados.....	41
Tabla 12 Resultados cromatografía .....	59
Tabla 13 Productos del modelo teórico de combustión.....	60
Tabla 14 Resultados matriz ANOVA 1 .....	63
Tabla 15 Resultados matriz ANOVA 2 .....	64
Tabla 16 Resultados matriz ANOVA 3 .....	65
Tabla 17 Tiempo de cocción del agua.....	70
Tabla 18 Costos del proyecto.....	71
Tabla 19 Retorno simple de inversión .....	72

## Resumen

El presente trabajo presenta el desarrollo e implementación de un biodigestor tubular de tipo laguna para la producción de biogás mediante el potencial de biometanización del estiércol de búfalo producido en la finca ubicada en Rionegro, Santander.

Esto con el fin de suplir la demanda mensual de 48,3616 m<sup>3</sup> de gas propano, utilizados para suplir las necesidades básicas como cocinar; abriendo adicionalmente las puertas a un potencial futuro, de generar electricidad con los excedentes.

Los ensayos y estudios llevados a cabo en la finca plantean el aprovechamiento de los residuos orgánicos de 85 búfalos y 85 becerros, los cuales generan una carga diaria total de 329,035 Kg de los cuales se estimó la relación [1:2] (33% estiércol – 67% agua) a temperaturas mesofílicas con un promedio de 25°C a 35°C, con el objetivo de evaluar la producción de gas metano durante 21 a 30 días. Para dicho estudio se implementó el uso de un sistema de monitoreo que permitió conocer los niveles de temperatura y producción de metano, e identificar, como se efectuó producción de biogás, lo que permitió validar que el tiempo de retención obtenido en el orden de 21 días, coincide con el estudio previo de laboratorio que sirvió como referente a este proyecto.

La metodología aplicada para el diseño del biodigestor se basó en la determinación de biogás a producir, siendo el insumo fundamental, de los cálculos para dimensionar el sistema biodigestor y sus componentes. Para la elaboración del biodigestor se seleccionaron materiales que se acoplaran adecuadamente al diseño, dando prioridad a elementos reutilizables como neumáticos estallados, cuñetes de pintura, recipientes plásticos, y envases de bebidas, a fin de hacer más sostenible el proceso. Paralelamente al desarrollo del biodigestor como tal, se realizaron las obras civiles, como la zanja y una cubierta de protección a la intemperie. Una vez finalizada la instalación, como la puesta en marcha de la producción de biogás, se realizó el análisis de cromatografía, que permite determinar las propiedades del biogás, calcular la velocidad de deflagración, energía de ignición y estructura de llama. Adicionalmente se pone en práctica el uso de tratamientos, que logren disminuir la producción del H<sub>2</sub>S en la mezcla del biogás, utilizando limadura de hierro la cual reduce estas trazas que son corrosivas. Finalmente, se procede a realizar la conexión del biodigestor al reservorio, donde se almacena el biogás para uso doméstico; para la adecuada combustión, se realizaron pruebas con diferente diámetro de inyectores, determinándose la necesidad de retirarlos para obtener en los quemadores, una llama con muy buenas características, con la que es posible suplir las necesidades de gas de cocción de la finca, dando respuesta así al objetivo del proyecto.

## Abstract

The present work presents the development and implementation of a tubular biodigester of lagoon type for the production of biogas through the potential of biomethanization of buffalo manure produced on the farm located in Rionegro, Santander, with the capacity to supply the monthly demand of 48.3616 m<sup>3</sup> of propane gas, used to supply basic needs such as cooking; opening the doors to a future potential, to generate electricity with surpluses.

The tests and studies carried out on the farm propose the use of the organic waste of 85 buffaloes and 85 calves, which generate a total daily load of 329,035 Kg of which the ratio [1:2] (33% manure – 67% water) to mesophilic temperatures with an average of 25 ° C to 35 ° C was estimated, with the aim of evaluating the production of methane gas for 21 to 30 days. For this study, the use of a monitoring system was implemented that allowed to know the levels of temperature and methane production, and to identify, how biogas production was carried out, which allowed to validate that the retention time obtained in the order of 21 days, coincides with the previous laboratory study that served as a reference to this project.

The methodology applied for the design of the biodigester was based on the determination of biogas to be produced, being the fundamental input, of the calculations to size the biodigester system and its components. For the elaboration of the biodigester, materials were selected that fit properly into the design, giving priority to reusable elements such as exploded tires, paint buckets, plastic containers, and beverage containers, in order to make the process more sustainable. Parallel to the development of the biodigester as such, civil works were carried out, such as the trench and an outdoor protection roof. Once the installation was completed, such as the start-up of biogas production, the chromatography analysis was carried out, which allows to determine the properties of the biogas, calculate the deflagration speed, ignition energy and flame structure. Additionally, the use of treatments is put into practice, which manage to reduce the production of H<sub>2</sub>S in the biogas mixture, using iron filing which reduces these traces that are corrosive. Finally, we proceed to connect the biodigester to the reservoir, where the biogas is stored for domestic use; for proper combustion, tests were carried out with different diameter of injectors, determined the need to remove them to obtain in the burners, a flame with very good characteristics, with which it is possible to supply the needs of cooking gas of the farm, thus responding to the objective of this project.

## Introducción

Durante los últimos años se han venido presenciando diferentes efectos negativos en el medio ambiente, estos se producen por causa de actividades humanas por lo que se han generado en el país Políticas Nacionales de Cambio Climático (PNCC) las cuales se vienen desarrollando desde el 2014, estas tienen como meta el desarrollo urbano, rural y minero-energético, desarrollando estrategias para la conservación de los ecosistemas [1].

Desde hace años en Colombia se ha venido implementado el uso de la biomasa para procesos de cocción y producción de calor, como es el caso de la leña, la cual ha sido uno de los energéticos tradicionalmente más utilizados en los hogares rurales según la UPME. Para esto se realizó una Encuesta de Calidad de Vida (ECV) durante el año 2018, la cual reveló que 1.664.229 hogares en las zonas rurales continúan implementando el uso de leña como principal fuente energética en los procesos de cocción, esto equivale a un valor estimado de 2.176.000 Ton de leña al año, lo cual genera emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes a 3.699.200 Ton al año [2].

El uso de la biomasa ha incentivado la implementación de distintos compuestos que provienen del aprovechamiento de residuos orgánicos, permitiendo aprovechar los recursos de una manera más eficiente, generando productos de buen poder calorífico como los biocombustibles, el biodiesel y el biogás, teniendo un incremento de un 11,5% para el 2019 según IEA [3]. Siendo así un gran sustituto del uso de leña y gas natural el cual es utilizado no solo para uso doméstico en procesos de cocción sino también para uso vehicular ya que cuenta con un poder calorífico de 6,5 kWh/m<sup>3</sup> [4].

El siguiente trabajo de grado busca estudiar el biogás producido en un biodigestor tubular, aprovechando el potencial energético del estiércol de búfalas y becerros, satisfaciendo la necesidad energética de la finca “Si Dios Quiere” ubicada en la vereda Salinas en el municipio de Rionegro, Santander y estudiando las variables de temperatura y producción de CH<sub>4</sub> para la obtención de un biogás de calidad, permitiendo realizar una cromatografía para calcular el modelo teórico de combustión y análisis de intercambiabilidad, con el fin de contribuir a la conservación del medio ambiente a través de la transformación de residuos y a la generación de energía a partir de recursos renovables, además de la exploración de nuevos métodos para la implementación de este tipo de proyectos [5].

## **1. Objetivo**

### **1.1. Objetivo general**

Implementar un biodigestor tubular de tipo laguna, para la producción de biogás a partir del estiércol de búfalo, instrumentado para la toma de datos, caracterizando su producción en la finca de estudio, ubicada en el municipio de Rionegro, Santander.

### **1.2. Objetivos específicos**

- Dimensionar el sistema de biodigestión de acuerdo con las condiciones propias del sitio, incluyendo el sistema de monitoreo de variables.
- Realizar la puesta en marcha con las respectivas pruebas de funcionamiento y ajustes para la correcta operación del biodigestor in situ con su respectiva instrumentación.
- Caracterizar la producción de biogás con base a las variables monitoreadas en el proceso.
- Determinar las propiedades de combustión del biogás, para su integración en los procesos de cocción.

## **2. Planteamiento del problema**

La finca ubicada en la zona rural del municipio de Rionegro, Santander, se dedica a la producción de leche de búfalo. Para esto cuentan con 170 cabezas de ganado, que producen 329 Kg de estiércol a diario, ha estos desechos no se les da ningún manejo, por lo cual están causando grandes problemas ambientales en la finca como generación de gases, entre estos, el metano que se va a la atmósfera, el CO<sub>2</sub> y la contaminación de los desechos dirigidos a los humedales que afectan los recursos hídricos del sector, donde se observa la contaminación. Adicionalmente, el uso de gas propano resulta costoso, dadas las condiciones geográficas de la zona, el costo de la instalación y el transporte del recurso energético, ocasionando un aumento fijo en los costos del gas para el propietario.

Por lo tanto, la pregunta de investigación a responder es:

¿Cómo implementar un biodigestor, instrumentado que permita aprovechar los residuos orgánicos correspondientes al estiércol de búfalo y becerro, supliendo la demanda de gas propano y haciendo más competitivo el sector bufalero?

### **3. Marco conceptual**

Dado que el proyecto desarrolla el aprovechamiento de residuos orgánicos, es necesario presentar los conceptos referentes a la biomasa y la metodología para el aprovechamiento de la digestión anaerobia.

#### **3.1. Biomasa**

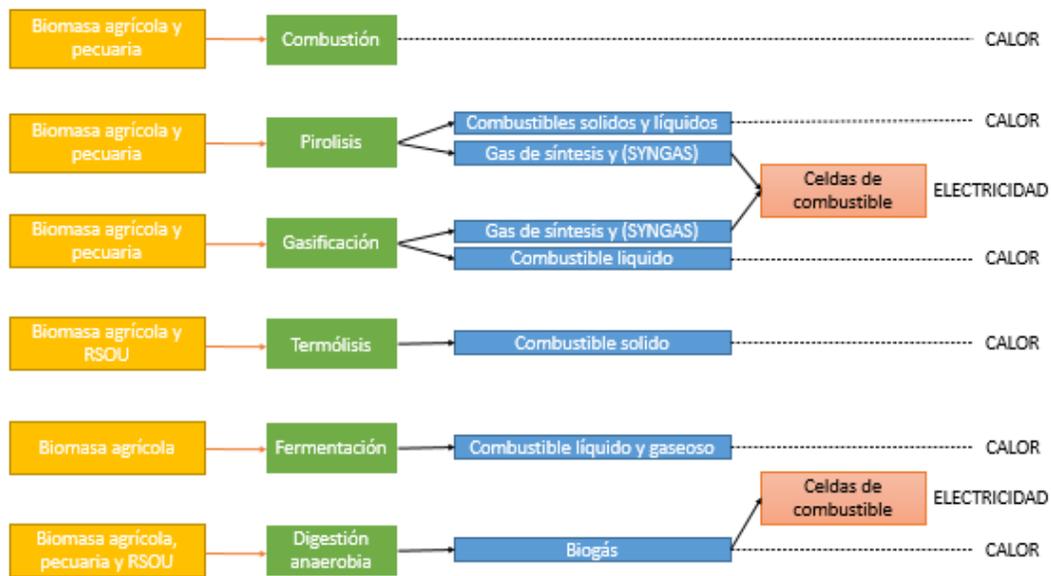
Es considerada en el contexto energético como una fuente de energía renovable que abarca todo un conjunto heterogéneo de materias orgánicas. Los productos provenientes de la naturaleza se consideran biomasa vegetal o animal, mejor conocidos como materia prima. También es considerada la materia orgánica de las aguas residuales y los lodos de depuradora, así como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, aunque dadas las características específicas de estos residuos se suelen considerar como un grupo aparte [6].

La biomasa tiene carácter de energía renovable dado que su contenido energético procede en última instancia de la energía solar, esta se libera al romper los enlaces de los compuestos orgánicos en el proceso de combustión, dando como productos finales dióxido de carbono y agua. Por este motivo, los productos procedentes de la biomasa que se utilizan para fines energéticos se denominan biocombustibles, estos pueden ser según su estado físico, biocombustibles sólidos utilizados básicamente para fines térmicos y eléctricos y líquidos como sinónimo de los biocarburantes para automoción [7] [8].

#### **3.2. Tecnologías de aprovechamiento de biomasa**

El uso de la biomasa por sí sola no permite contribuir a la generación de energía, por lo que requiere el uso de diferentes tecnologías para poder obtener su poder calorífico, transformando la biomasa en biocombustibles sólidos, líquidos y gaseoso [9].

Ilustración 1 Tecnologías de aprovechamiento de biomasa



Fuente [9]

### 3.3. Biogás

Es una mezcla gaseosa producida a partir de la degradación de la biomasa bajo condiciones anaerobias, es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás. Es decir, la materia es descompuesta y transformada por medio de un proceso llamado biodigestión anaerobia [10].

Esta mezcla gaseosa es formada principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene diversas impurezas. La composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. Cuando el biogás tiene un contenido de metano superior al 45% es inflamable. En la siguiente tabla se indican las propiedades físicas [10].

Tabla 1 Características generales del biogás

Características	Valor
Composición	55-70% metano (CH <sub>4</sub> ) 30-45% dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0-6.5 kW h m <sup>3</sup>
Equivalente de combustible	0.60-0.65 L petróleo/m <sup>3</sup> biogás
Límite de explosión	6-12% de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650-750°C (con el contenido de CH <sub>4</sub> mencionado)
Presión crítica	74-88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 Kg m <sup>3</sup>
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible).
Masa molar	16.043 Kg/Kmol

Fuente: [10]

### 3.4. Digestión anaerobia

Como su nombre lo indica es un proceso biológico complejo y degradativo, esta digestión parte de materiales orgánicos de un sustrato, tales como: residuos animales y vegetales los cuales son transformados por acción de las bacterias que no requieren de oxígeno (O<sub>2</sub>), generando así el biogás. Esta mezcla se caracteriza por su elevado porcentaje de metano, dióxido de carbono y adicional de trazas de otros elementos. Es importante resaltar que el biogás generado suele estar contaminado con diferentes componentes, tales como: ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) y el amoníaco (NH<sub>3</sub>) por lo que debe ser tratado, para aprovechar el metano de este [10].

Al utilizar los procesos de digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aerobio [10].

### 3.5. Fermentación metanogénica

En la digestión anaerobia ocurren varios procesos los cuales se clasifican en cuatro pasos, estos cumplen un papel muy importante para la generación de metano y su elevada concentración en el biogás [10].

### **3.5.1 Hidrólisis o licuefacción**

Es la primera para la producción de biogás, en la cual los compuestos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas. Estas enzimas poseen bacterias hidrolíticas, que actúan en el exterior celular por lo que se consideran exoenzimas, digiriendo poco a poco las proteínas y grasas que se encuentran en los residuos orgánicos [11].

### **3.5.2 Acidogénesis o fermentación**

En esta etapa los compuestos orgánicos solubles que comprenden los productos de la hidrólisis son degradados en ácidos orgánicos tales como acético, propiónico y butírico, fundamentalmente. Estos ácidos producen concentraciones de iones de hidrógeno ( $H_2$ ) que se generan en el proceso fermentativo que da como resultado un sustrato [11].

### **3.5.3 Acetogénesis**

En esta etapa los productos correspondientes son convertidos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Mediante el sustrato y los compuestos generados, se alimentan las bacterias las cuales necesitan para su crecimiento, una baja energía y bajas concentraciones de  $H_2$  [11].

### **3.5.4 Metanogénesis**

En esta última fase que es la etapa metabólica, se da la formación de  $CH_4$  el cual es producido a partir del ácido acético o de mezclas de  $H_2$  y  $CO_2$ . Este proceso ocurre bajo condiciones estrictamente anaerobias. Esta reacción es exergónica, por lo que libera energía al realizarse [11].

## **3.6. Biodigestores**

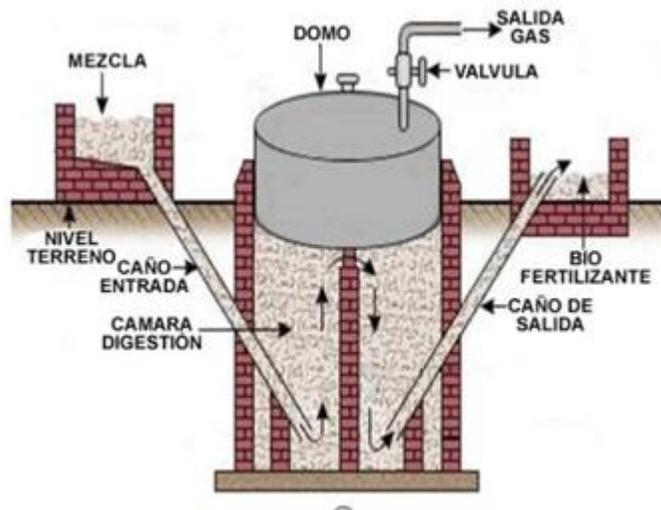
Los biodigestores son estructuras en las cuales se introduce material orgánico en soluciones acuosas donde ocurre la digestión anaerobia de los diferentes residuos orgánicos para la producción de biogás el cual se irá acumulando en la parte superior de la cámara. De los procesos de la digestión se puede obtener biol, mejor conocido como biofertilizante el cual es rico en nutrientes. De las distintas estructuras a utilizar existen las cúbicas o cilíndricas, las cuales se diferencian según en material de construcción: (ladrillos, cemento, acero o plástico), además de ser a prueba de agua, también son selladas para evitar la entrada de aire y de esta manera llevar a cabo los procesos de anaerobios [12].

Para la selección del biodigestor es importante conocer cantidad de gas requerido, el terreno donde se va a instalar y el presupuesto, ya que existen diferentes tipos de biodigestores. Los tipos difieren principalmente en la cantidad de estiércol disponible, el tiempo de retención hidráulico, y el área disponible para su construcción. Algunos de estos son: los modelos indianos, modelos chinos, tipo batch, tipo tubular, de flujo discontinuo, entre otros [12]. A continuación, se explicará cada uno de ellos y su funcionamiento.

### 3.6.5 Biodigestor de modelo Indiano

Este modelo de biodigestor se caracteriza por utilizar una campana como gasómetro, que se puede sumergir sobre la biomasa fermentada, además está formado por una pared central que divide el tanque de fermentación en dos cámaras. La función de la pared divisoria hace que el material circule por el interior de la cámara de fermentación, manteniendo la presión de manera constante. Es decir, como el volumen de gas producido no se consume de forma inmediata, el gasómetro tiene la función de moverse verticalmente, manteniendo la presión dentro del biodigestor constante [12].

*Ilustración 2 Biodigestor modelo Indiano*



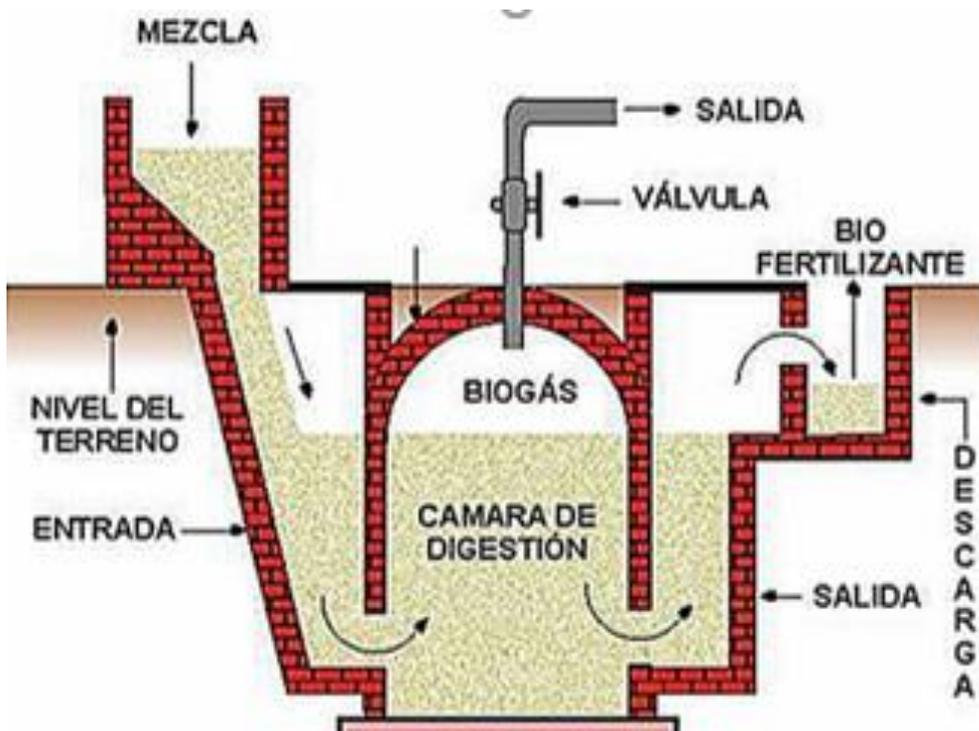
Fuente:[13]

Es importante conocer el residuo a utilizar para alimentación del biodigestor indio, su concentración de sólidos totales (ST) no puede superar el 8%, facilitando la circulación de los residuos dentro de la cámara de fermentación y evitar la obstrucción de las tuberías de entrada y salida del material.

### 3.6.6 Biodigestor de modelo Chino

El modelo chino está constituido casi en su totalidad en ladrillo, por lo cual permite reducir su costo, sin embargo, puede presentar problemas de fuga de biogás, dado el caso que la estructura no cuente con un óptimo sistema de sellado e impermeabilización. Este biodigestor funciona con base al principio de prensa hidráulica, por lo que la presión en su interior aumenta como producto de la acumulación de biogás, provocando el desplazamiento del efluente desde la cámara de fermentación hacia la caja de salida, y en sentido contrario cuando se produzca la descompresión. Este modelo de biodigestor no es muy comercial en la industria del biogás debido a que a que libera gas para reducir la presión interna en el sistema, por esta razón no se utilizan en las grandes industrias, es más de uso rural [12].

*Ilustración 3 Biodigestor modelo chino*

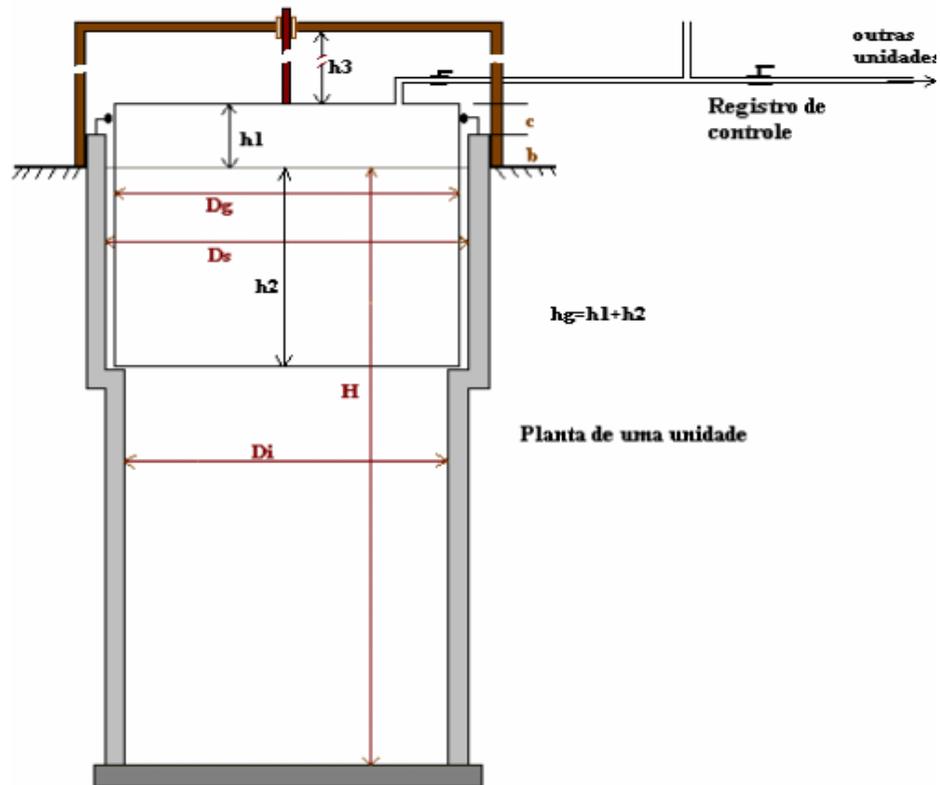


Fuente: [13]

### 3.6.7 Biodigestor de modelo batch

Este modelo se caracteriza por su montaje simple y con pocos requisitos operativos. Para llevar a cabo la instalación puede ser solo un tanque anaerobio o sí se desea, varios tanques en serie. En este tipo de biodigestores se suministra una sola mezcla, por lo tanto, no es un biodigestor continuo. Este modelo permanece en fermentación por un período conveniente, hasta descargar el material del tanque una vez finalizado el período efectivo para la producción de biogás [12].

*Ilustración 4 Biodigestor modelo batch*

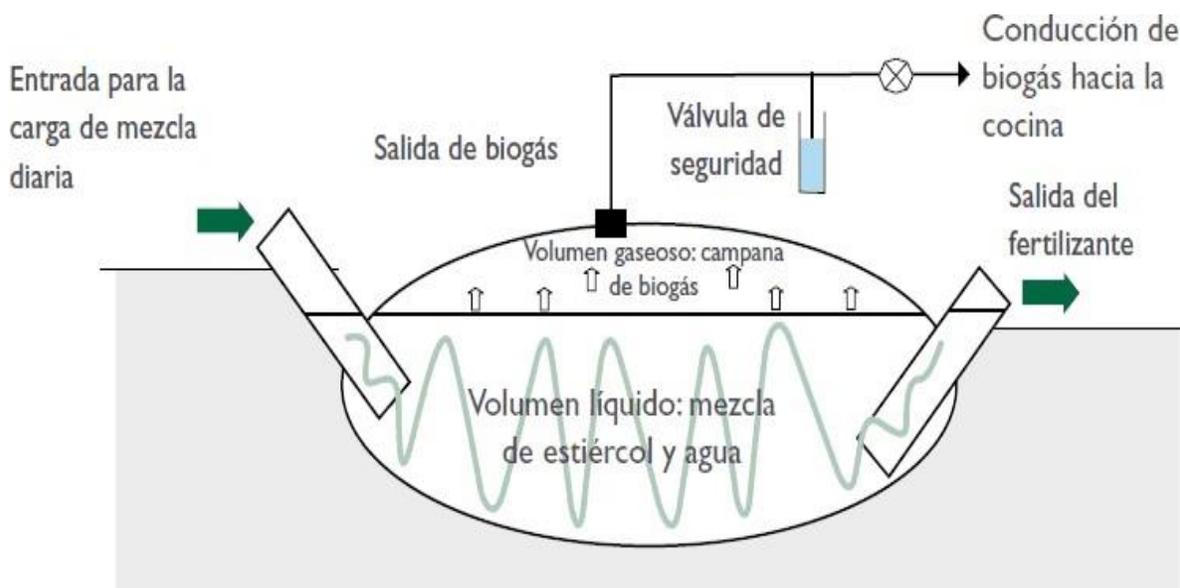


Fuente: [12]

### 3.6.8 Biodigestor de modelo tubular

Este modelo se compone de un material tubular plástico de polietileno, acompañado de dos tuberías de PVC que permiten la entrada y salida de sustrato y biol. Su estructura es completamente sellada y la parte inferior de la planta ocupa un del 75% del volumen, este se compone de la masa de fermentación, y en la parte superior, el 25% restante, es el espacio donde se almacena el biogás. Este tipo de planta se recomienda para aquellos sitios donde predominan las temperaturas altas y constantes [14].

*Ilustración 5 Biodigestor modelo tubular*



Fuente: [14]

### 3.7 Tabla comparativa

Para el presente estudio se recopiló información que permite comparar los distintos modelos de biodigestores, con el propósito de estudiar sus características, ventajas y desventajas.

*Tabla 2 Características de los biodigestores*

<b>Características</b>	<b>Tipo tubular</b>	<b>Tipo chino</b>	<b>Tipo indiano</b>
Vida útil	10-15 años	≥20 años	≥15 años
Presión del biogás	Variable y baja	Variable	Constante
Fuga de biogás	No es común	Común	No hay fugas si se le da buen mantenimiento a la cúpula
Tamaño del biodigestor	(4-100) m <sup>3</sup>	5m <sup>3</sup>	(5-15) m <sup>3</sup>
Materiales de construcción	Plástico, polietileno y PVC	Cemento, ladrillo y varillas de hierro	Anticorrosivo, cemento, ladrillo, cúpula
Materiales del sistema	Bajos niveles de mantenimiento, siempre y cuando se tomaran medidas de cuidado con la bolsa y PVC	Baja, no hay componentes móviles, ni elementos que se oxiden	Altos niveles de mantenimiento a la cúpula flotante, eliminación de óxido, recubrimiento con anticorrosivo periódicamente
Ubicación del biodigestor y requerimientos de espacio	Semi enterrado, alto Zanja aprox. 2,5m Profundidad y 50cm de largo por cada metro	Bajo tierra totalmente requerimiento de espacios muy bajos, generalmente solo la línea de extracción	Bajo tierra Requerimiento de espacio en la superficie, solo sobresale la cúpula
Generación de empleos locales	Si	Si	Si
Tipo de residuos	Aguas residuales, RS urbanos y RO.	Sin restricción	Residuos con baja concentración de fibra

Fuente: [13]

Una vez finalizada la comparación se estableció que el biodigestor que mejores condiciones presenta, tanto por el tipo de materiales reutilizables, bajo porcentaje de fugas de biogás y tipos de residuos a tratar es el modelo de tipo tubular.

### 3.8 Factores que determinan los procesos metanogénicos

A la hora de examinar los distintos factores que influyen en los procesos metanogénicos y sus microorganismos, es importante conocer su susceptibilidad a los cambios de temperatura en condiciones ambientales. Por esta razón se evalúa el desempeño del sistema anaerobio y su tasa de producción de metano. Algunas de estas condiciones ambientales son: temperatura mesofílica o termofílica, tipo de materia prima, nutrientes, concentración de minerales y sus trazas. El PH, generalmente se encuentra en niveles cercanos a la neutralidad, evitando compuestos tóxicos como el amoníaco y condiciones redox óptimas [4].

#### 3.8.1 Naturaleza y composición de materia prima

Dentro de los diversos tipos de materia prima es importante caracterizar las reacciones bioquímicas que pueden presentar estos residuos para el desarrollo de las actividades microbianas en el sistema anaerobio seleccionado. El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno, sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores) [4].

*Tabla 3 Residuos orgánicos*

Residuos de origen animal	Estiércol, orina, guano, camas, residuos de matadero (sangre y otros), residuos de pescado.
Residuos de origen vegetal	Maleza, rastrojos de cosecha, pajas, forraje en mal estado.
Residuos de origen humano	Heves, basura, orina.
Residuos agroindustriales	Salvado de arroz, orujos, cosetas, melazas y residuos de semillas.
Residuos forestales	Hojas, vástago, ramas y corteza.
Residuos de cultivos acuáticos	Algas marinas, jacintos y malezas acuáticas.

Fuente: [4]

#### 3.8.2 Relación carbono/nitrógeno de materias primas

El carbono y el nitrógeno son la fuente principal de alimento de bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno constituye la formación de nuevas células. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera una relación de 30:1, hasta 20:1 [4]. Hay dos situaciones que pueden ocurrir dado el caso que la relación carbono/nitrógeno no sea estable:

- Si la relación es superior de 30:1 la descomposición de materiales ocurre de manera lenta debido a la baja multiplicación de bacterias [4].
- Si la relación es inferior a 8:1 se inhibe la actividad de las bacterias debido a la producción excesiva de amoníaco ( $\text{NH}_4$ ) el cual es tóxico para el ser humano [4].

En la presente tabla se seleccionaron las distintas relaciones que se deben tener en cuenta al manejar los distintos tipos de residuos, con el propósito de entender mejor los porcentajes de carbono, nitrógeno y su correcta relación.

*Tabla 4 Relación C/N de los distintos tipos de residuos animales*

Materiales Residuos animales	%C	%N	C/N
Bovinos	30	1.30	25:1
Equinos	40	0.80	50:1
Ovinos	35	1.00	35:1
Porcinos	25	1.50	16:1
Caprinos	40	1.00	40:1
Conejos	35	1.50	23:1
Gallinas	35	1.50	23:1
Patos	38	0.80	47:1
Pavos	35	0.70	50:1
Excretas humanas	2.5	0.85	3:1

Fuente: [4]

### 3.8.3 Sólidos totales (S.T)

Los sólidos totales están compuestos de agua y una fracción sólida. Esta mezcla es utilizada para alimentar el biodigestor y es un factor importante para asegurar una buena digestión anaerobia en los procesos desarrollados. La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas [4].

### 3.8.4 Sólidos Volátiles (S.V)

Es aquella porción de sólidos totales que se obtienen de una muestra, esta es volatilizada cuando se calienta el sustrato durante dos horas a una temperatura de 600°C. Los SV poseen componentes orgánicos, los cuales teóricamente deben ser convertidos a metano [4].

### 3.8.5 Temperatura

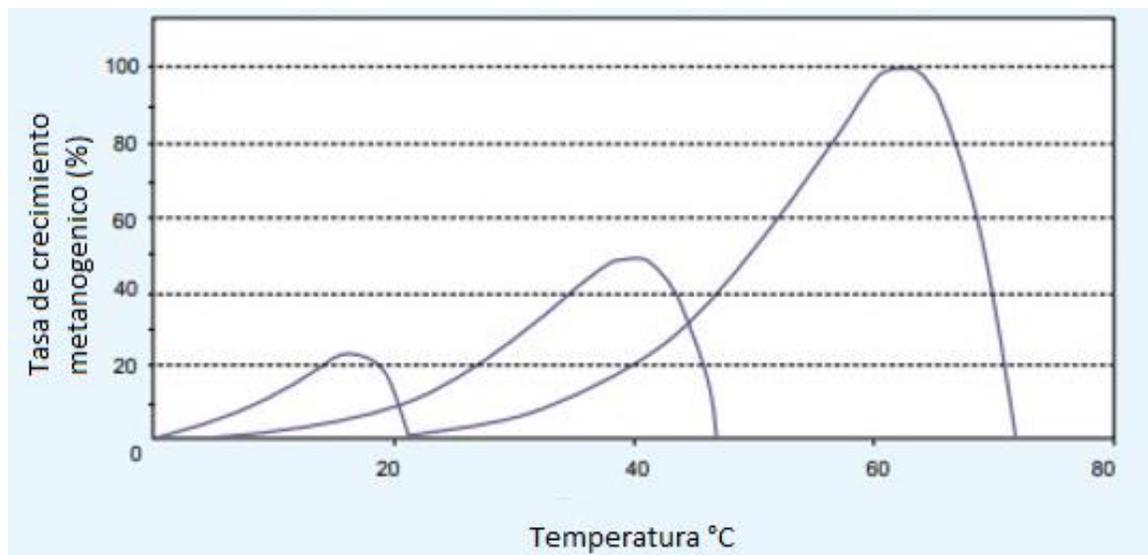
Es uno de los factores más importantes para la correcta operación del reactor anaerobio, ya que se considera como uno de los principales parámetros de diseño. Según la temperatura de operación, su tasa de crecimiento bacteriano y la velocidad de digestión anaerobia deberá variar. Por esta razón es importante garantizar una temperatura homogénea ya que los cambios bruscos de temperatura pueden desestabilizar los procesos del reactor [14].

Existen diferentes rangos de temperatura, estos son:

- Fermentación psicrófila, se aplica en rangos de temperatura entre 10 y 20°C y dura más de 100 días de retención.
- Fermentación mesófila, se aplica en rangos de temperatura entre 20 y 45°C y dura aproximadamente 30 a 40 días de retención.
- Fermentación termófila, se aplica para rangos de temperatura entre 50 y 60°C y más de 8 días de retención. Este tipo de fermentación no es apropiada para biodigestores sencillos.

En la siguiente ilustración se logra observar la tasa de crecimiento metanogénico con respecto a los rangos de temperatura que se manejen en el reactor anaerobio, comprendiendo de una mejor manera la fermentación psicrófila, mesófila y termófila.

*Ilustración 6 Tasa de crecimiento relativo de microorganismos*



Fuente: [14]

### **3.8.6 Tiempo de retención hidráulico (TRH)**

Es el tiempo promedio en que la materia orgánica tarda en degradarse por los microorganismos. A través de distintos estudios se ha concluido que a un tiempo corto de retención de 30 días tiende a influir de manera positiva en la producción de biogás, para que esta sea mayor [15].

### **3.8.7 Velocidad de carga orgánica**

Es el volumen de sustrato orgánico que se carga diariamente al reactor anaerobio. La velocidad de carga orgánica tiene una relación de tipo inversa con el tiempo de retención, es decir, que a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de retención [15].

### **3.8.8 PH**

Cada grupo bacteriano presenta en los procesos de digestión anaerobia diferentes niveles de actividad óptimos en torno a la neutralidad de los valores de PH: fermentativos entre 7.2 a 7.4, acetogénicos entre 7.0-7.2 y metanogénicos entre 6.5-7.5. En los biodigestores operados con estiércol de bovino, los valores óptimos de operación se encuentran en un rango de 6.7-7.5, es importante recalcar que para el desarrollo eficiente de los procesos el PH no puede bajar de 6 ni subir de 8 [15].

### **3.8.9 Efluente líquido (biofertilizante)**

Se obtiene mediante la separación de su fase sólida conocida como "biosol" y su fase líquida como "biofertilizante". Del efluente el 90% corresponde al biofertilizante y el 10% al biosol, el biofertilizante tiene una buena actividad biológica, debido a las diversas características que desarrolla, como fermentos nitrosos y nítricos, microflora, hongos y levaduras que serán un excelente complemento para suelos improductivos [15]. La capacidad de biofertilizante es mayor a la del estiércol fresco y a la del estiércol compostado debido a que el nitrógeno es convertido a amonio ( $\text{NH}_4$ ), este es posteriormente transformado en nitratos para la producción de un mejor biofertilizante. Al aumentar los tiempos de retención (TR), el lodo se descompone más y de esta manera será de mayor calidad [15].

## **3.9 Instrumentación de un digestor anaerobio**

A continuación, se describen algunos dispositivos empleados en la etapa de optimización de los procesos industriales: mediante un conjunto de herramientas que cumplen con la medición, conversión y transmisión de variables, las cuales pueden ser físicas o químicas. Estas operaciones son necesarias para controlar y desarrollar de manera eficiente las operaciones de la planta, en esta literatura se puede encontrar información relacionada con el manejo de variables [16-27].

### 3.9.1 Sensor

Es un dispositivo que permite la medición de una magnitud física del medio. Proporcionando una señal que determina una función de magnitud a medir [16].

### 3.9.2 Sensor de presión

La presión del proceso es una variable que se utiliza para caracterizar el comportamiento dinámico de la producción de biogás. Esto se debe a que cuando se lleva a cabo la biodegradación de residuos orgánicos, el gas se acumula dentro del reactor anaerobio, para esta variable se usó el MPX10. Este sensor de presión diferencial tiene señales armónicas y compensación de temperatura, y la salida es una señal analógica, por lo que puede trabajar directamente con sistemas como microcontroladores y Arduino. La salida diferencial permite medir la presión entre una entrada y la otra entrada, lo que la hace adecuada para sistemas de medición de nivel [16].

#### Características:

- Voltaje: 5Vdc
- Rango: 0 a 1.45 PSI (0 a 10 Kpa)
- Tipo de salida: Analógica
- Tipo de sensor: piezoresistivo
- Tipo: Presión diferencia

### 3.9.3 Sensor de temperatura (DS18B20)

La temperatura del proceso es la variable que mayor impacto tiene en el biodigestor, porque su valor afecta el tiempo de producción del biogás. En este caso se hizo uso de el sensor DS18B20, este es un sensor económico que ha evolucionado considerablemente. Ofrece un amplio rango de medición de 55 ° C a 125 ° C y una precisión superior de  $\pm 0,5$  ° C en el rango de -10 ° C a 85 ° C. Una de las ventajas del DS18B20 es que se vende como sonda TO92 integrada y hermética para la medición de temperatura en líquidos y gases [16].

#### Características:

- Cabezal de acero inoxidable de 6X50 mm
- Rango de fuente de alimentación: 3,0 V a 5,5 V
- Rango de temperatura de funcionamiento: 55 ° C a 125 ° C (67 ° F a 257 ° F)
- Rango de temperatura de almacenamiento: 55 ° C a 125 ° C (67 ° F a 257 ° F)
- Precisión dentro de 10 ° C a 85 ° C:  $\pm 0,5$  ° C.

### 3.9.4 Sensor de gas metano (MQ-4)

Teniendo en cuenta los objetivos del proyecto esta variable es la más importante, el detectar el gas natural generado por el biodigestor para saber el rendimiento de este. En este caso se hizo uso del sensor MQ4. Este es un sensor para detectar metano (gas natural) en el aire, MQ4 puede detectar la concentración de 300 ~ 10,000ppm. Estos sensores ofrecen alta sensibilidad y tiempos de respuesta rápidos. La salida del sensor tiene una resistencia analógica [17].

#### Características:

- Temperatura de funcionamiento: 10 a 50 ° C
- Consumo de energía: Menos de 900 mW
- Concentración: 300 a 10,000 ppm
- Sensibilidad:  $R_s(\text{aire}) / R_s(1000 \text{ ppm CH}_4) > 5$
- Calibración de la salida de comparación entre el potenciómetro incorporado y voltaje digital LM393.
- Condiciones de funcionamiento: Temperatura ambiente: 10 ° C a 65 ° C, Humedad:  $\leq 95\% \text{ RH}$

### 3.9.5 Arduino

Arduino es una placa basada en el microcontrolador Atmel. Un microcontrolador es un circuito integrado que puede registrar instrucciones escritas en cualquiera de los lenguajes de programación disponibles en el entorno Arduino IDE. Estas instrucciones le permiten programar programas que interactúan con los circuitos de la tarjeta. Los microcontroladores Arduino tienen una llamada interfaz de entrada. Esta es una conexión que le permite conectar diferentes tipos de dispositivos a su tablero. La información sobre estos dispositivos conectados se envía al microcontrolador para manejar la transferencia de datos. [18].

#### Características:

- Voltaje Operativo: 5v
- Voltaje de Entrada (Recomendado): 7 – 12 v
- Pines de Entradas/Salidas Digital: 14 (De las cuales 6 son salidas PWM)
- Pines de Entradas Análogas: 6
- Memoria Flash: 32 KB (ATmega328) de los cuales 0,5 KB es usado por Bootloader.
- SRAM: 2 KB (ATmega328)
- EEPROM: 1 KB (ATmega328)
- Velocidad del Reloj: 16 MHZ.

## 4. Marco referencial

### 4.1 Estado del arte

Se realizó una revisión bibliográfica de los distintos documentos referidos al potencial de producción de biogás del estiércol animal y específicamente de búfalo para caracterizar el tema en un contexto global y contar con un sólido referente sobre los adelantos investigativos en la materia. En los documentos encontrados se evidencia la gran utilidad e investigaciones que se están aplicando en países de África y Asia, [20-23] donde se está caracterizando los diferentes tipos de estiércol como materia prima de gran importancia para la producción de biogás, transformación de energía y adicional los procesos de tratamiento que se están aplicando para una limpieza efectiva, debido a que cuenta con trazas corrosivas y tóxicas. Es importante aclarar que en los textos estudiados se analizan los diferentes tipos de estiércol y sus características, en la mayoría de estos referentes bibliográficos se menciona que el terreno donde establezca el reactor anaerobio y las condiciones climáticas del lugar pueden afectar la cantidad de biogás producido.

Debido a que en los países donde se realizaron los estudios de las distintas fuentes consultadas, no poseen las mismas condiciones climáticas y las mismas especies de animales, entre ellas bufalinas, pueden ser tomados como referencias, pero no se puede concluir como resultados que se obtendrán en Colombia. Cabe anotar que no se encontraron artículos que se llevaran a cabo de estudios en Colombia o países con características climatológicas similares. En la Tabla 5, se presenta un resumen detallado de los principales artículos consultados y qué detalles fueron usados en cada uno para este proyecto.

Tabla 5 Principales artículos investigativos del estado del arte

Nombre del artículo	Resumen	Aporte al proyecto
Producción de biogás y biofertilizante mediante reactores anaeróbicos con estiércol porcino y dosis de glicerina [19].	Aplicación de glicerina en 5 biodigestores que cuentan con adiciones diferentes en cada contenedor. Dando como resultado la disminución en la eficiencia del biogás ya que este afecta la aceleración de los microorganismos generando una mayor degradación del sustrato y generando que el PH disminuya debido a su acidificación.	El caso que se desee utilizar un producto que ayude disminuir la producción de H <sub>2</sub> S y nitrógeno dentro del biodigestor, es importante conocer los riesgos que implica usar la glicerina, afectando de esta manera la producción de biogás
Programa de asociación de biogás de África: una revisión de la implementación de cocina limpia a través del desarrollo del mercado en África Oriental [20].	Implementación de biodigestores en las regiones sur de África, para la cocción de alimentos. También plantea los números de biodigestores instalados a partir del 2009 al 2019, teniendo presente la abundancia de ganado en las familias de la región de Kenia, Tanzania y Uganda.	Permite comparar la inversión de costo de instalación y compra del biodigestor, su producción anual tanto en biogás como en biofertilizante y la recuperación de la inversión. Adicionalmente se menciona la posibilidad de implementar el uso de los biodigestores de globo flexible (tubulares) por su economía.
Selección de la tecnología de mejora de biogás adecuada: una revisión de la limpieza, mejora y utilización del biogás [21].	La importancia de seleccionar la tecnología adecuada ya que dependiendo del lugar, factor climático, materia prima y biodigestor se tendrán diferentes resultados. Además, se estudian los componentes que afectan los sistemas, que generan pérdidas en la producción de biogás y su adecuada separación, debido a que posee trazas de compuestos corrosivos y afectan la salud humana.	Las tecnologías que mejor resultado presentan son (lavado de agua, adsorción por cambio de presión y tecnología de membranas) todos se convierten en opciones potenciales, especialmente cuando los costos de operación y mantenimiento (O&M) son tomado en consideración. Es importante tener presente hidróxido de hierro el cual se puede utilizar para eliminar el H <sub>2</sub> S cumpliendo los requisitos de estufas y siendo el más utilizado en proyectos caseros.
Desafíos de la implementación del biogás en países en desarrollo [22].	Desafíos que presenta cada continente para la producción de biogás y los problemas que presentan los países en desarrollo para su uso y aplicación, ya que cuentan con diversos factores que afectan su desempeño y la baja eficiencia en las metodologías empleadas.	Las ventajas que presenta Colombia al ser un país donde no afectan las estaciones climáticas y la importancia de contar con un clima cálido que mejore las cualidades de temperatura presente en el biodigestor.

<p>Adopción y difusión de energías renovables - El caso del biogás como combustible alternativo para cocinar en Pakistán [23].</p>	<p>Funcionamiento de un biodigestor, composición de sustrato, producción de biogás, implementación, montaje en el hogar y las ventajas que trae usar el biogás en países no desarrollados donde aún se implementa el uso de carbón y leña para la producción de energía, lo cual disminuye el tiempo de trabajo para la recolección de materia prima e impulsa la generación de empleos.</p>	<p>La factibilidad que posee un biodigestor de 4 m<sup>3</sup> el cual genera suficiente energía para cocinar alimentos en un hogar hasta para cuatro personas y la importancia de utilizar una estufa de gas adecuada. Además de los costos del biodigestor 4-15 m<sup>3</sup> en el cual su precio oscila entre (350 -700) USD en los países asiáticos y (600-1200) USD en países africanos.</p>
<p>Evaluación del ciclo de vida del biogás [24].</p>	<p>Análisis de ciclo de vida (ACV) para la producción de biogás, teniendo como referencia 48 estudios recientes de países de todo el mundo que se publicaron en los últimos 13 años (2006- 2018). Para esto utilizaron palabras claves tales como (ACV del biogás, y producción de biogás, impactos ambientales de la producción de biogás, evaluación ambiental de producción de biogás y sostenibilidad ambiental del biogás), con el fin de resaltar los aspectos importantes como el alcance del estudio, tipo de recursos de biomasa, utilización de biogás y categorías de impacto.</p>	<p>Conocer más afondo los ACV que se han realizado en Europa, Asia y África. Permitiendo analizar las metodologías estudiadas, la unidad funcional que manejan, referencias del sistema, y tipo de biofertilizante producido en cada uno de estos continentes, analizando las similitudes que poseen con Colombia. También es de gran utilidad ya que nos permite conocer qué tipo de biomasa es la más empleada en cada continente.</p>
<p>Un filtro de limaduras de hierro para la desulfuración de biogás [25].</p>	<p>Uso de la limadura de hierro como una opción viable y económica para eliminar la producción de H<sub>2</sub>S generada en los procesos del biogás. Para esto se desarrolló un sistema de filtrado en dos etapas para la eliminación del sulfuro de hidrógeno.</p>	<p>El presente artículo aporta conocimiento acerca de la preparación de la limadura de hierro para el uso en los procesos de eliminación del H<sub>2</sub>S.</p>
<p>Generadores eléctricos para residuos de biomasa en sistemas energéticos [26].</p>	<p>Desarrollo de sistemas de producción de biogás en América del Norte para la producción de energía y las ventajas que aplicaría su uso en USA ya que cuenta con una gran cantidad de producción a partir de aguas residuales, vertederos, estiércol animal y fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, teniendo un gran desempeño en la producción de energía en el país y producción de biogás.</p>	<p>Este artículo aporta una idea de las condiciones mínimas que debe tener una granja que desee emplear un óptimo sistema de biogás enfocado en la generación y distribución de energía eléctrica a la red.</p>

<p>UML para el diseño de la Automatización del Biodigestor [27].</p>	<p>Aplicación de un sistema automatizado en un biodigestor tubular con el propósito de mejorar su producción, solucionando los problemas de temperatura que presenta el proyecto establecido el cual se encuentra ubicado a las afueras de la ciudad de Bogotá. Por esta razón en las noches la temperatura disminuye afectando la generación de CH<sub>4</sub>.</p>	<p>Brinda el conocimiento y la eficiencia del uso de los sistemas de modelado. Estas son una buena opción a la hora de mejorar los procesos de elaboración del biogás, ya que en ocasiones existe problemas en las variables de operación, tales como la temperatura que es una perturbación y al disminuir afecta su generación y el volumen del biogás producido.</p>
<p>Desarrollo de estructura adsorbente regenerativa y de baja caída de presión para la mejora del biogás [28].</p>	<p>El uso de la Zeolita X13 para mejorar la calidad del biogás manejando diferentes presiones de gas y caudales tanto en condiciones secas como húmedas. Logrando mejoras en la adsorción de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y Vapor de agua.</p>	<p>La zeolita es una excelente opción a la hora de remover los gases contaminantes en la producción del biogás generando una pureza del 98% según los resultados obtenidos. Sin embargo, es importante tener presente que es un material que no se encuentra en Colombia y al tener que exportarse, puede que no sea tan económico en comparación a otras metodologías.</p>
<p>Adsorción de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) en zeolita (Z): mecanismo de retención [29].</p>	<p>Evaluación del potencial de regeneración de la zeolita al utilizarse en procesos de adsorción para el tratamiento de biogás. En este estudio el objetivo fue comprender el mecanismo de eliminación de H<sub>2</sub>S, realizando caracterizaciones fisicoquímicas complementarias de la zeolita estudiada antes y después de la adsorción de H<sub>2</sub>S: superficie específica, porosidad, pH, espectroscopia infrarroja, termogravimetría y barrido diferencial y calorimetría.</p>	<p>El uso de una zeolita compuesta aproximadamente de 21% de silicio, 14% aluminio, 10% sodio y oxígeno, presenta un rango de 1,4 en la escala de (1 – 1,5) lo que indica que la zeolita es hidrofílica y al estar en presencia de metales como el aluminio y el sodio, tiene capacidades catalíticas en reacciones químicas. Esto permite duplicar su capacidad de adsorción mediante a la impregnación de carbono activado.</p>
<p>Generación de Biogás en un Biodigestor Automatizado [30].</p>	<p>El enfoque principal del artículo es la evaluación y monitoreo de la generación de biogás en un biodigestor de tipo Batch.</p>	<p>Aplicación de sensores que permitan conocer el tiempo de retención exacto para una mayor producción de biogás y de esta forma introducir un nuevo lote para aumentar su generación.</p>

## 4.2 Contexto Latinoamericano y Nacional

Mediante los datos obtenidos en la IEA (Agencia Internacional de Energía) se ha visto reflejado el aumento del biogás y el uso del biodiesel en un 11,5% [3] alrededor del mundo a través de nuevos proyectos, un buen ejemplo es el megaproyecto que se está realizando Brasil el cual pretende construir la mayor planta de biogás en América. El proyecto se realizará en la ciudad de Guariba, en el estado de Sao Paulo el cual tiene como objetivo la construcción de biodigestores que poseen la capacidad de recibir 9200 m<sup>3</sup> de vinaza para tratar 500 toneladas de DQO (Demanda Química de Oxígeno) por día produciendo de esta manera 187.000 Nm<sup>3</sup> los cuales serán empleados para la generación de 17,5 MW. El diseño cuenta con la capacidad de adaptarse a las distintas variaciones de flujo y la composición del sustrato con el fin último de poder tratar la vinaza, pulpa de tapioca y aguas residuales, reutilizando los desechos industriales y ecologizar la matriz energética de Brasil. Adicional se aprovecharán los subproductos del biogás como fertilizantes que permitan mejorar los cultivos o plantaciones de caña de azúcar en el país [31].

Chile es otro de los países implicados en la elaboración de proyectos que incentiven el uso del biogás, en el sector agropecuario y lechero al sur del país en las regiones de: Los Ríos y Los Lagos, los cuales comenzaron en el 2015 y finalizaron en el 2017 los cuales tienen el desafío la generación de 15 kW en una región y 75 kW de electricidad en la otra región y el excedente de biogás se desea inyectar en la red de gas natural, estos proyectos incentivan a la generación, autoconsumo, favoreciendo la utilidad de los residuos y eliminando problemas de salud como los malos olores y la proliferación de moscas y otros vectores [32].

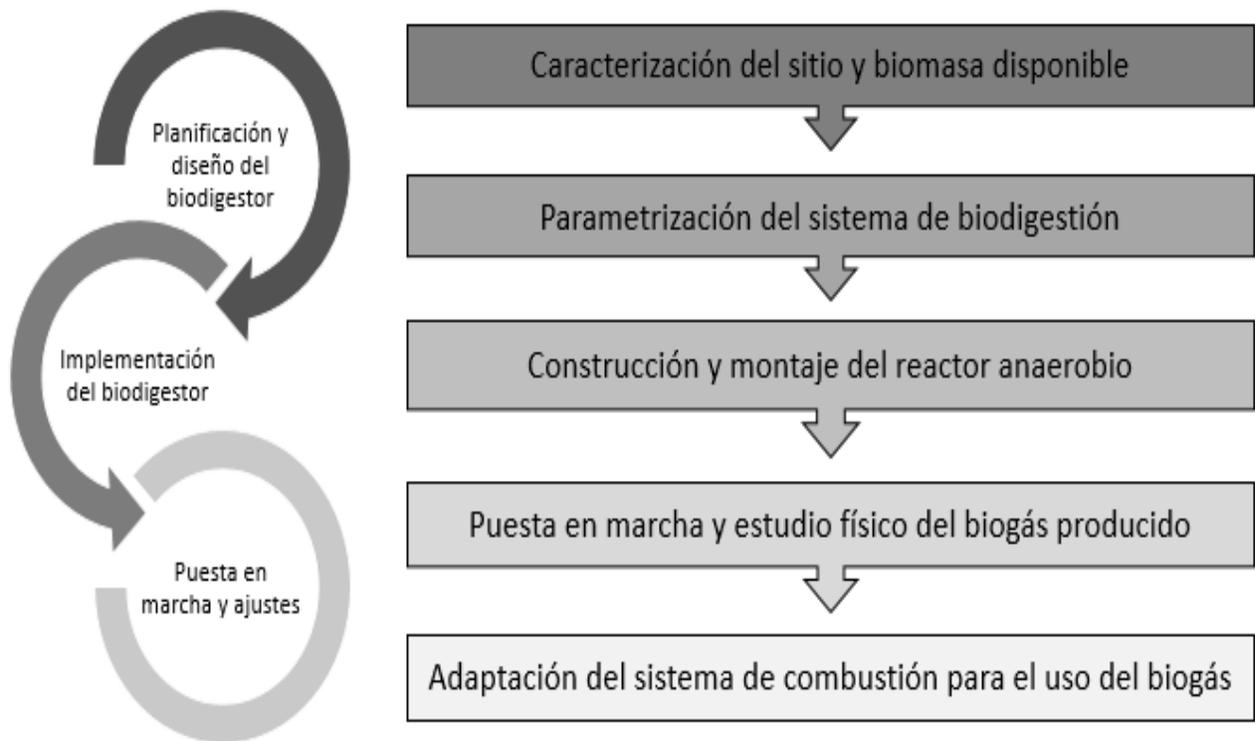
En Colombia se vienen aplicando proyectos a partir del 2005, Doña Juana SAS ESP ha venido desarrollando su proyecto en Bogotá desde el 2010 aprovechando los (RSU) de la ciudad, en el año 2016 realizó 4.637.018 certificados de reducción de emisiones, siendo considerada por la junta Ejecutiva de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (UNFCCC) como una de las empresas más importantes en el mundo, también es importante resaltar que en dicho año comenzó a generar energía eléctrica con una planta de 1,7 MW utilizando 6700 toneladas diarias de (RSU) y reduciendo 800.000 toneladas de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) por día [33].

Otro proyecto que resalta es la implementación de un biodigestor en las huertas orgánicas de PANACA (Parque Nacional de Cultura Agropecuaria) ubicado en Quimbaya (Quindío), el cual les brinda a los visitantes la posibilidad de aprender sobre el manejo de los sistemas de tratamiento de aguas residuales para la generación de biogás y adicional el compostaje producido para el buen manejo y ecología de los suelos del sector, cultivos y jardines del parque nacional [34].

## 5. Metodología

Para llevar a cabo la culminación del proyecto fue necesario seguir una serie de pasos los cuales fueron definidos y catalogados para el desarrollo de las actividades propuestas en los objetivos específicos, teniendo presente que cada una de las etapas posee entradas y salidas de información necesaria para el avance de esta. En la ilustración 7 se muestran todas las etapas requeridas para el progreso del planteamiento el cual posee datos cuantitativos como referente del proyecto [35] y datos propios obtenidos de los estudios físicos y experimentales en el reactor anaerobio.

*Ilustración 7 Metodología del proyecto*



Fuente: Propia

## 6. Desarrollo del proyecto

### 6.1 Fase 1: Caracterización del sitio

#### 6.11 Ubicación del sitio

Para el comienzo de la primera etapa de la metodología se realizó una visita a la finca donde se tiene planeado realizar el biodigestor tubular, llamada “Si Dios Quiere”, la cual está ubicada en la zona rural del municipio de Rionegro, Santander, en la vereda Las Salinas. Las coordenadas del lugar fueron obtenidas mediante el Google Earth, estas son 07°16'22" de latitud norte y 73°09'13" de longitud oeste. Ubicada a 690 m.s.n.m., con una temperatura media de 25°C.

*Ilustración 8 Ubicación geográfica de la finca*



Fuente: Google Earth

#### 6.1.2 Biomasa disponible del lugar

Como continuación del proyecto “Estudio para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos de búfalo mediante la biodigestión en el municipio de Rionegro, Santander” se corroboró que la cantidad de estiércol obtenida en la finca continuara siendo la misma, es decir que se contará con la misma cantidad de búfalos y becerros, teniendo un total de 170 cabezas de ganado para la producción de los 329 Kg de estiércol diario, de los cuales 297,5 Kg son excretados por las búfalas y 31,5 por los becerros [35].

## 6.2 Parámetros del biodigestor

Para realizar los cálculos de la longitud del plástico primero fue necesario tomar los valores de la carga diaria de estiércol la cual fue de  $51,84 \frac{Kg}{día}$  y con la relación que se está manejando es [1:2] se multiplicó este valor por 2, es decir 103,68 Litros de agua. Para el TRH se manejó en valores de climas trópicos seleccionando un valor de 30 días, aunque es bastante amplio se puede disminuir, pero se recomienda trabajar con este valor para efectos de cálculo. Para el volumen de líquidos se multiplico la carga diaria de la mezcla y el TRH, obteniendo el resultado en litros y convierte a metros cúbicos  $m^3$ . El volumen gaseoso es la tercera parte del biodigestor, dividiendo en 3 el volumen líquido. Finalmente se procede a sumar el volumen total de líquidos el cual da un valor de 4147,2 litros y se divide en 1000 para pasarlos a  $m^3$  [35].

Este valor  $4,1472 m^3$  va a ser la carga diaria que se va a introducir al reactor anaerobio por día para su continua alimentación.

En la siguiente tabla se pueden analizar los valores que se tuvieron presentes para realizar los cálculos de carga del reactor anaerobio y su volumen total.

Tabla 6 Cálculos del biodigestor

# Búfalas	Búfalos $\frac{Kg}{Día}$	Número de becerros	Beceros $\frac{Kg}{Día}$	Estiércol total Kg/día
3	5	0	0,371	51,84

Factor	Valor	Unidades
Carga diaria estiércol	51,84	$\frac{Kg}{Día}$
Carga diaria mezcla (L)	103,68	Litros
TRH	30	Días
VL volumen líquido biodigestor	3110,4	Litros
VL volumen líquido biodigestor	3,1104	$m^3$
V Gaseoso	1036,8	Litros
V Total L	4147,2	Litros
V Total	4,1472	$m^3$

Fuente: [35]

$$(01) \text{ Carga de estiércol} = \frac{51,84 \text{ Kg}}{\text{día}}$$

$$(02) \text{ Carga diaria de la mezcla (L)} = \text{Carga de estiércol} * 2 = 103,68 \text{ L}$$

$$(03) \text{ TRH} = 30 \text{ días}$$

$$(04) \text{ Volumen del líquido} = \text{Carga diaria de la mezcla} * \text{TRH} = 3110,4 \text{ Litro} = 3,1104 \text{ m}^3$$

$$(05) \text{ Volumen Gaseoso} = \frac{\text{Volumen de líquido}}{3} = 1036,8 \text{ L}$$

$$(06) \text{ V total líquido} = \text{Volumen líquido} + \text{Volumen gaseoso} = 4147,2 \text{ L} = 4,1472 \text{ m}^3$$

### 6.3 Parámetros obtenidos en laboratorio

En estos cálculos se tiene en cuenta todos los factores que darán como resultado la producción diaria de biogás que sería de 1,83 m<sup>3</sup> y al final se estudiará la producción mensual la cual es de 54,9 m<sup>3</sup>. En la siguiente tabla se observan los factores de sólidos volátiles y el factor de producción del biogás.

Tabla 7 Datos de laboratorio

Datos de laboratorio	Datos tablas	Unidades
Factor de sólidos totales	0,17	
Factor de sólidos volátiles	2,83	$\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3 * \text{VL}}$
Factores SV	0,77	
Sólidos volátiles	2,18	$\frac{\text{Kg} * \text{VL}}{\text{m}^3 * \text{Día}}$
Factor PB	0,27	$\frac{\text{m}^3}{\text{Kg}}$
PB	0,59	$\frac{\text{m}^3 \text{biogás}}{\frac{\text{m}^3 * \text{VL}}{\text{Día}}}$
PB F	1,83	$\frac{\text{m}^3 \text{biogás}}{\text{Día}}$
Total 30 días	54,9	$\frac{\text{m}^3 \text{biogás}}{\text{mes}}$

$$(07) \text{ Factor Sólidos Totales} = 0,17$$

$$(08) \text{ Sólidos Totales} = \frac{\text{Carga Diaria Estiércol} * \text{Factor Sólidos Totales}}{\text{Volumen Líquido}} = \frac{2,83 \text{ Kg}}{\text{m}^3}$$

$$(09) \text{ Factor Sólidos Volátiles} = 0,77$$

$$(10) \text{ Sólidos Volátiles} = \frac{\text{Sólidos Totales}}{\text{Factor Sólidos Volátiles}} = \frac{2,83 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3 \text{VL}}}{0,77} = \frac{2,18 \text{ Kg}}{\text{Día}}$$

$$(11) \text{ Factor Producción Biogás} = \frac{0,27 \text{ m}^3}{\text{Kg}}$$

$$(12) \text{ Producción Biogás} = \text{Producción Biogás} * \text{Sólidos Volátiles} = \frac{0,58 \text{ m}^3 \text{ Biogás}}{\text{Día}}$$

$$(13) \text{ Producción Biogás Final} = \text{Producción Biogás} * \text{Volumen Líquido} = \frac{1,83 \text{ m}^3 \text{ Biogás}}{\text{Día}}$$

$$(14) \text{ Producción Mensual} = \text{Producción de Biogás} * 30 \text{ Días} = \frac{54,9 \text{ m}^3 \text{ Biogás}}{\text{Mes}}$$

## 6.4 Dimensionamiento del envoltente

Para seleccionar el ancho del rollo se sugiere tener un largo sobre diámetro L/d de 7, por esta razón se promedió el ancho de rollo según las medidas establecidas en la tabla 8.

Tabla 8 Diámetros del biodigestor

Ancho del rollo (m)	Diámetro del biodigestor	Sección eficaz ( $\pi * r^2$ )	Longitud del biodigestor (m)	L/d	L mínima (m)	L máxima (m)	L optima (m)	Error
1	0,64	0,32	12,96	20,2	3,2	6,4	4,8	-170%
1,25	0,8	0,5	8,29	10,3	4	8	6	-38%
1,5	0,96	0,72	5,76	6	4,8	9,6	7,2	20%
1,75	1,12	0,97	4,27	3,81	5,6	11,2	8,4	49%
2	1,28	1,27	3,26	2,55	6,4	12,8	9,6	66%
2,5	1,59	1,98	2,08	1,31	7,95	15,9	11,9	82%
3	1,91	2,86	1,45	0,75	9,55	19,1	14,3	90%
4	2,55	5,03	0,82	0,32	12,7	25,2	19,1	96%
6	3,82	11,4	0,36	0,09	19,1	38,2	28,6	99%
8	5,09	20,3	0,20	0,03	25,4	50,9	38,1	99%

Fuente: [35]

$$(15) \text{ Diámetro biodigestor} = 0,96 \text{ m}$$

$$(16) \text{ Sección eficaz} = \pi * r^2 = 0,72 \text{ m}$$

$$(17) \text{ Longitud biodigestor} = \frac{\text{Volumen Total}}{\text{Sección Eficaz}} = 5,76 \text{ m}^2$$

$$(18) \frac{\text{Longitud}}{\text{Diámetro}} = \frac{\text{Longitud biodigestor}}{\text{Diámetro biodigestor}} = 6 \text{ m}$$

Estos valores son realizados para el ancho de 1,5 m y se tabulan con el ancho de 1,25 m con el fin de obtener la longitud del biodigestor ideal. Es importante aclarar que también se puede utilizar el largo de rollo seleccionado al inicio, pero no es tan preciso encontrar o contrastar estos valores ya que los venden por encima de la medida.

Tabla 9 Tabulación del biodigestor

VALORES PROMEDIO ENTRE EL L/D (10,368 Y 6)				
1,375	0,88	0,61	7,0272	8,184

Fuente:[35]

De esta manera se obtiene la longitud del biodigestor requerida para el plástico que se va a comprar en el mercado y el valor del  $\frac{L}{D}$  se encuentra en el promedio de (10,368 y 6) m.

## 6.5 Dimensionamiento de la zanja

Para el dimensionamiento de la zanja se continuó utilizando la tabla con los valores del ancho de rollo (AR) anteriormente mencionados. Como en la sección se utilizó y se tabulo mediante el AR de 1,5 y 1,25, se volvió a hacer el mismo procedimiento para obtener la medida donde: (a) de la base de la zanja, (b) es la altura de la zanja y (c) la distancia.

En la siguiente tabla se comparan los distintos AR y con base en los valores utilizados en la tabla número ocho, con el objetivo de obtener las medidas del dimensionamiento.

*Tabla 10 Diámetro de la zanja*

AR	8	6	4	3	2,50	2	1,75	1,5	1,25	1
A	2,25	1,91	1,27	0,95	0,84	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
B	2,75	2,11	1,47	1,15	1,01	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
C	2,85	2,21	1,57	1,25	1,12	1	0,9	0,8	0,7	0,6

Fuente: [35]

Una vez obtenidos los valores del AR, se procede a tabular los datos para obtener las medidas que más se acoplen al L/d obtenido en la tabla número nueve.

*Tabla 11 Valores tabulados*

Promedia entre el AR	(1,5 y 1,25)
A	0,45
B	0,65
C	0,75

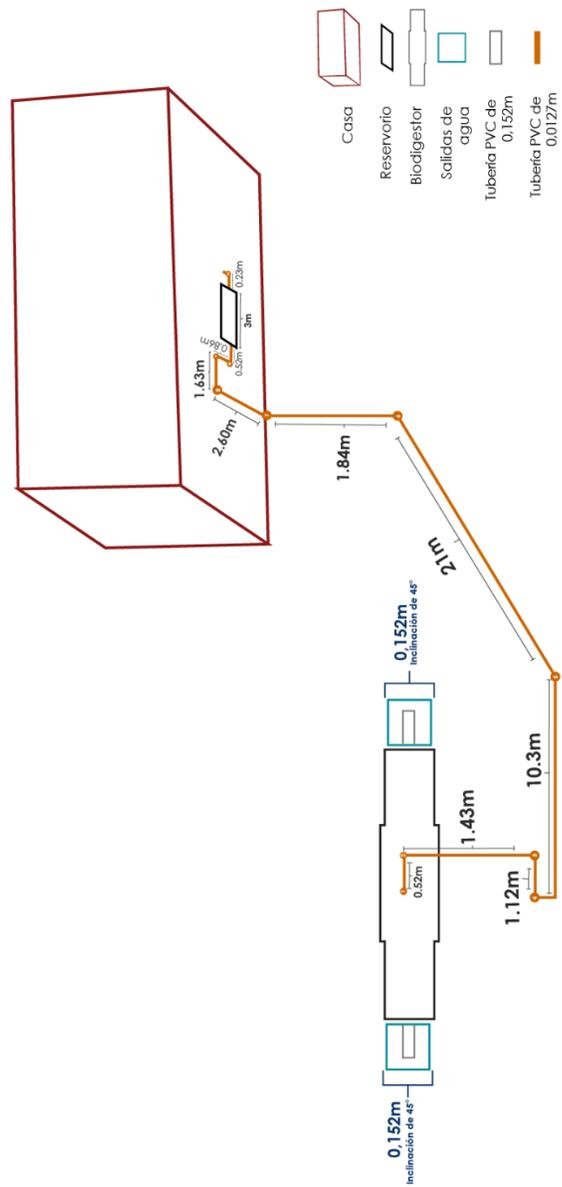
Fuente: [35]

## 6.6 Dimensionado del reservorio y determinación de los diámetros de tubería

Para el dimensionamiento del reservorio se tuvo presente la guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares (2008), donde se establece que el reservorio es la mitad del reactor anaerobio y recomienda manejar tubería de  $\frac{1}{2}$  In, porque el biogás no maneja presión por lo cual con esa medida es más fácil su uso.

A continuación, se definen las medidas a tener en cuenta en el sistema, definiendo la ubicación del biodigestor, las tuberías que llevarían el biogás producido al reservorio y el punto donde se realizaría la zanja, con sus respectivas dimensiones.

Ilustración 9 Esquema representación isométrica



Fuente: Propia

En el plano se observan distintos colores, con el fin de poder explicar la función de cada una de las tuberías y poderlas diferenciar con mayor facilidad.

- Los rectángulos azules a las esquinas del reactor anaerobio representan los tubos de PVC de 6 In los cuales cumplen con la entrada y salida de la mezcla [1:2] de sustrato-agua, es importante tener presente que estas tuberías deben estar a una inclinación de 45°.
- Los dos recuadros negros representan el reactor anaerobio y el reservorio, estos dos se encuentran con el mismo color, ya que fueron elaborados con el mismo calibre de polietileno.
- La línea amarilla representa la tubería de PVB de  $\frac{1}{2}$  In la cual cumple con la función de transportar el biogás generado al reservorio y del reservorio al interior de la vivienda donde se utilizará para procesos de cocción.

De esta manera con el Esquema de la ilustración 9 y teniendo los valores del AR y L/d se procede a ejecutar la perforación en la visita realizada a la finca. En la siguiente ilustración se puede apreciar la zanja, la cual cuenta con los valores obtenidos en las tablas número nueve y once.

*Ilustración 10 Perforación del suelo*



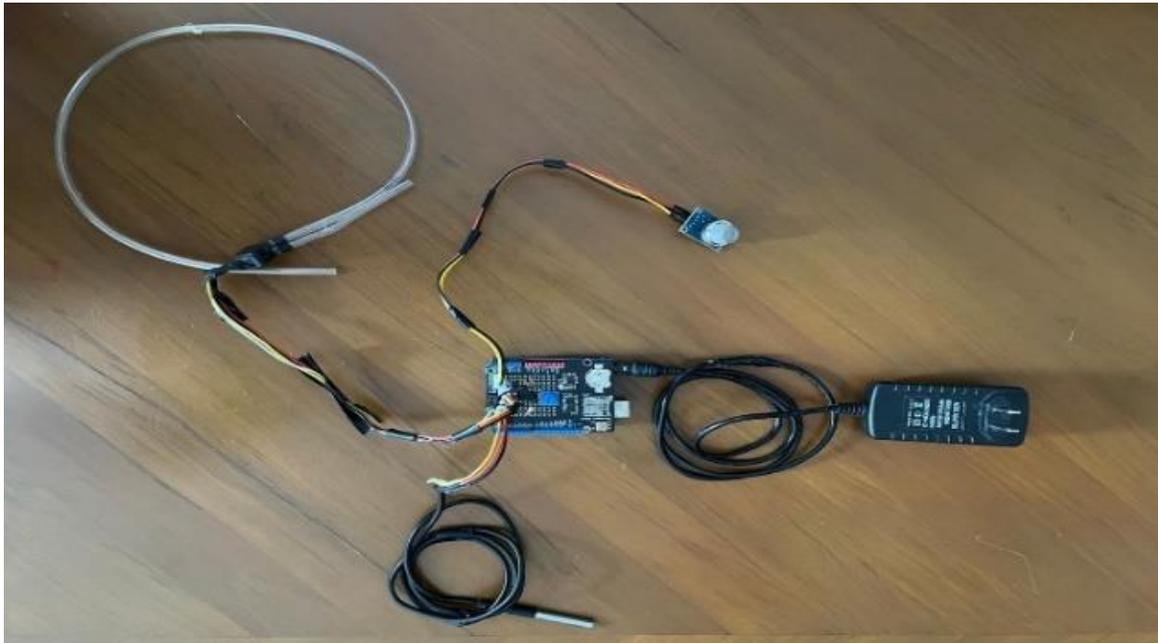
Fuente: Propia

Una vez finalizado el esquema y la perforación de la ilustración 10, se continuó con la toma de datos de los sensores, cada uno con su respectiva programación para su desarrollo.

## 6.7 Sistema de toma de datos

Para el presente proyecto se determinó la necesidad de obtener el TRH, que es el tiempo que se establece para que la producción de biogás sea contante. Para esto se requieren 30 días, en los cuales se utilizaron sensores para el monitoreo de las variables. Para la selección de los sensores se estudió un artículo que presenta condiciones similares [30]. Se tuvo presente los siguientes sensores, temperatura “DS18B20”, presión “MPX10” y de CH<sub>4</sub> “MQ4” interactuando con un módulo Arduino (ver ilustración 11), con el fin de poder examinar cómo estas variables influyen en la producción de biogás y los niveles de metano obtenidos, para utilizarse de manera eficiente en los procesos de cocción. Para la toma de datos se estableció una programación para el monitoreo de las variables, una vez por hora, para poder obtener 24 resultados por día y de esta forma lograr 720 datos al mes.

*Ilustración 11 Sistema de sensores*

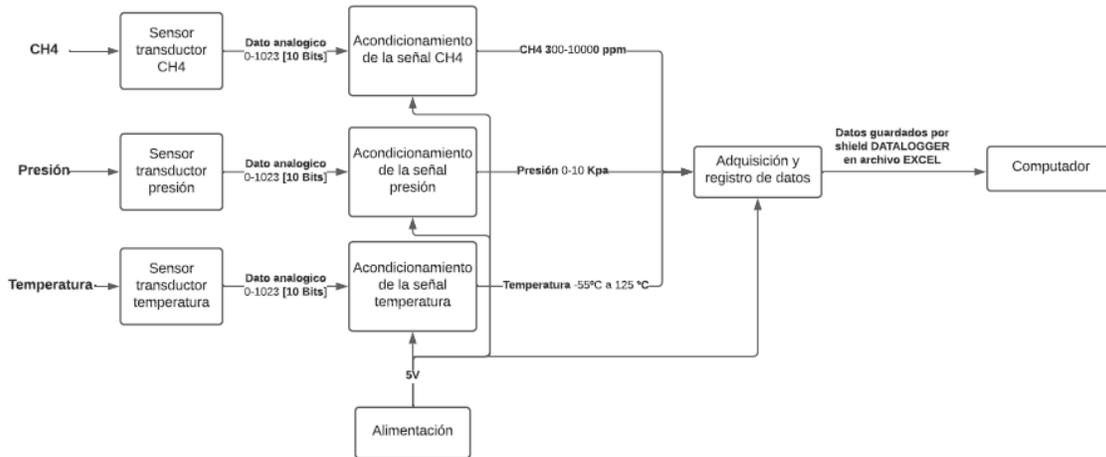


Fuente: Propia

### 6.7.1 Diagrama de bloques

Para representar el proceso de toma de datos que se realiza en el proyecto se utilizó diagramas de bloques, con el fin de interpretar como se encuentran repartidos los sensores, como se observa en la siguiente ilustración 12.

Ilustración 12 Ilustración Diagrama de bloques



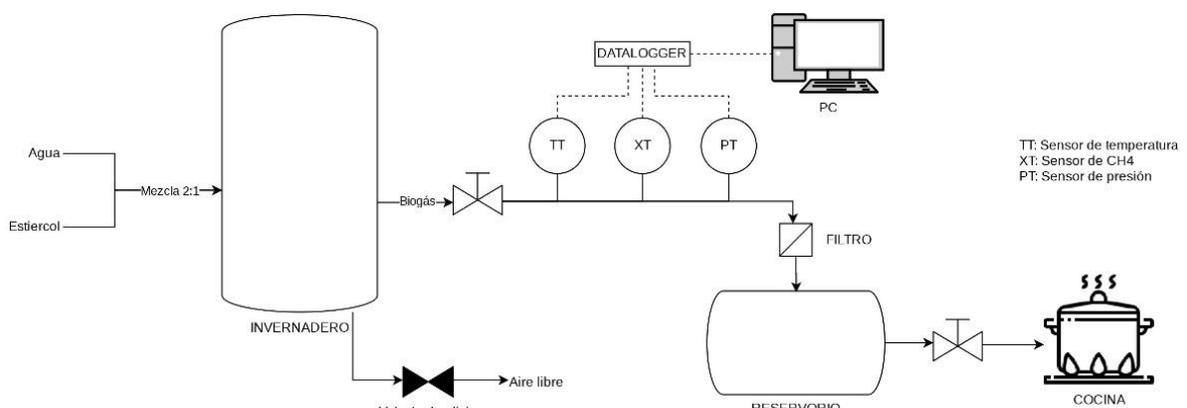
Fuente: Propia

Como se puede ver en la ilustración doce se representaron los sensores anteriormente mencionados, en la parte de acondicionamiento de la señal se refieren los circuitos usados para cada sensor, además de la programación para convertir los datos analógicos a datos según cada variable, esto teniendo en cuenta los datasheets de cada transductor, ya en la parte final se tiene la adquisición y registro de datos que hace parte el datalogger y por último el procesado de los datos adquiridos en el PC, además la alimentación tanto de los sensores como el Arduino y el data logger.

### 6.7.2 Esquema del sistema de adquisición de datos

Al igual que el diagrama de bloques el diagrama P&ID nos permite representar el proceso, en este caso de una forma más visual como se puede ver a continuación.

Ilustración 13 Esquema de instrumentación para adquisición de data



Fuente: Propia

Como se puede analizar de izquierda a derecha se representa la entrada al proceso de sustrato [1:2] y la salida a una válvula manual, los transductores conectados y enviando la señal al datalogger y próximo al PC, además de pasar por el filtro para entrar al reservorio para esperar la apertura de la segunda válvula manual para usar el biogás producido. Por la otra parte se tiene la válvula de alivio del sistema.

### 6.7.3 Programación de los sensores

Como el Datalogger trabaja con memoria microSD, se incluyen las 3 librerías principales: “Wire, SPI, SD” que son las encargadas de analizar las lecturas y fechas, también incluye la librería “RTCLib.h” que es la que maneja el reloj (ref: DS1307) en tiempo real. Las librerías principales para el sensor de temperatura (DS18D20) son aquellas que está en el pin (3) son: Onewire y DallasTemperature.

- Se implemento un objeto llamado “myFile” que es donde se almacenan los archivos, esta es una variable constante de tipo entero que es para la SD.
- El chipSelect = 9; es el pin que se utilizara en el momento de la lectura de la SD, el cual maneja intervalos de 15.

Se definió como palabra clave “inicial” la cual establece el momento en el cual se empieza a guardar la toma de datos desde 0.

- Int a= Se llevará el conteo de las horas
- Int t= Se llevará el conteo de los días

Por último, se definió tres variables de tipo “float” es decir que se manejan números decimales 1) Temp= Temperatura; 2) Presión= Presión; 3) Gas= Gas.

```
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
OneWire ourWire(3); // Se establece el pin 3 como bus OneWire
DallasTemperature sensors(&ourWire); // Se declara una variable u objeto para el sensor
#include "RTCLib.h"
```

```
RTC_DS1307 rtc;
File myFile;
```

```
int segundo, minuto, hora, dia, mes, diaDeLaSemana, anio;
const int chipSelect = 9;
const long interval = 15;
int segundoinicial = 0;
int minInicial = 0;
int horainicial; //int hora = 0;
int s = 0;
```

```
int a = 0;
int t = 1;
float temp;
float presion;
float gas;
```

Definimos el objeto "DateTime" que sería la hora y la fecha con el RTC, "Void" sería la rutina de "leerfecha" que como su nombre lo indica será la encargada diariamente de indicar la fecha, en año, mes, día, hora, minuto y segundo exacto de la toma del dato.

Con la función "rtc.now" sujeta de "HoraFecha" que se colocara cada uno de los datos que necesitamos: segundo, minuto, hora, día, mes y año.

```
DateTime HoraFecha;
void leerfecha() {
```

```
    HoraFecha = rtc.now(); //se obtiene la hora y fecha actual
```

```
    segundo = HoraFecha.second();
    minuto = HoraFecha.minute();
    hora = HoraFecha.hour();
    diaDeLaSemana = HoraFecha.dayOfTheWeek();
    día = HoraFecha.day();
    mes = HoraFecha.month();
    anio = HoraFecha.year();
}
```

"Void imprimirfecha" se utiliza en el monitor serial del Arduino, esto quiere decir que se tiene conectado los sensores al Arduino y esté conectado por medio de USB al portátil se puede analizar en tiempo real todo lo que sucede, pero no se guardara nada en la memoria SD.

- En el monitor se observa de la siguiente manera: "hora/minuto/segundo", posteriormente la fecha: "día/mes/año".

```
void imprimirfecha() {
    Serial.print("hora = ");
    Serial.print(hora);
    Serial.print(":");
    Serial.print(minuto);
    Serial.print(":");
    Serial.print(segundo);
    Serial.print(" Fecha = ");
    Serial.print(dia);
    Serial.print("/");
    Serial.print(mes);
    Serial.print("/");
    Serial.print(anio);
    Serial.println();
    delay(1000);
}
```

“Void leerTemp” se utiliza para crear las siguientes dos líneas de código:

- para incluir en el objeto “sensors”, con esta función lo que se retorna es el valor de la temperatura en grado °C, debido a que se definió al principio del código.
- Siempre que se llama la función “leerTemp” se obtendrá el valor de la temperatura en grados °C guardado en la variable “Temp”.

```
void leerTemp() {  
  
sensors.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura  
temp = sensors.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C
```

Esta parte del código inicia con la función “setup” en la cual se encuentra la función “Serial.begin” se inicia el monitoreo serie a una velocidad de 9600 bps, este se utiliza cuando el sistema está conectado al computador.

“Sensors.begin” con esto se inicia la librería “Sensors” la cual empieza a tomar los datos del sensor de temperatura en conjunto de “rtc.begin” que es el reloj en tiempo real.

Una vez iniciada la lectura si es exitoso el proceso, se empezará a calcular la información “serial.print” se refiere a los datos del tiempo, para posteriormente incluirla en la SD en función de “myFile.print”, de lo contrario nos arrojará un error en el monitor, esto se hace en periodo de prueba para comprobar que esté funcionando de manera correcta y proceder a la creación del archivo en Excel con el objetivo de tomar datos de manera completa.

```
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
  sensors.begin(); //Se inicia el sensor de temperatura  
  rtc.begin(); //Inicializamos el RTC  
  pinMode(2, OUTPUT);  
  while (!Serial) {  
    ; // wait for serial port to connect. Needed for native USB port only  
  }  
  
  // Serial.print("Initializing SD card...");  
  //  
  // // see if the card is present and can be initialized:  
  // if (!SD.begin(chipSelect)) {  
  //   Serial.println("Card failed, or not present");  
  //   // don't do anything more:  
  //   while (1);  
  //   Serial.println("card initialized.");
```

```

leerfecha();
minInicial = minuto;
segundoinicial = segundo;
horainicial = hora;

// imprimirfecha();
// Serial.print("Dia ");
// Serial.print(diaDeLaSemana);
// Serial.print(" Hora ");
// Serial.print(hora);
// Serial.print(" Minuto ");
// Serial.print(minuto);
// Serial.print(" Segundo ");
// Serial.print(segundo);
// Serial.println(" ");
// Serial.println(" ");

Serial.print ("Iniciando SD ...");
if (!SD.begin(9)) {
  Serial.println ("No se pudo inicializar");
  return;
}
Serial.println ("inicializacion exitosa");

if (!SD.exists ("datalog.csv"))
{
  myFile = SD.open ("datalog.csv", FILE_WRITE);
  if (myFile) {
    Serial.println ("Archivo nuevo, Escribiendo encabezado(fila 1)");
    myFile.println ("Fecha, Temperatura, Presion, Gas");
    myFile.close();
  }

  else {

    Serial.println ("Error creando el archivo datalog.csv");

  }
}

Serial.println ("Fecha de inicio toma de datos ");
imprimirfecha();
Serial.println();
Serial.println();

delay(120000);

void loop() {

// for (int d = 0; d < 2; d++) {
// for (int h = 0; h < 60; h++) {

```

```

while (t < 31) {
if (a < 24) {
leerfecha();

if (hora != (horalnicial - 1)) {

imprimirfecha();
myFile = SD.open ("datalog.csv", FILE_WRITE);//abrimos el archivo
if (myFile) {
leerTemp();
//presion = (float)analogRead(A0)*10/747;
presion = (float)analogRead(A0) * (0.056) - (23.3);
if (presion < 0) {
presion = 0;
}
if (presion > 10) {
presion = 10;

gas = (float)analogRead(A1) * 10000 / 1023;
if (gas < 0) {
gas = 0;
}
if (gas > 10000) {
gas = 10000;
}
myFile.print(ano);
myFile.print("/");
myFile.print(mes);
myFile.print("/");
myFile.print(dia);
myFile.print(" ");
myFile.print(hora);
myFile.print(":");
myFile.print(minuto);
myFile.print(":");
myFile.print(segundo);
myFile.print(" ");
myFile.print(",");
myFile.print(temp);
myFile.print(" C");
myFile.print(",");
myFile.print(presion);
myFile.print(",");
myFile.println(gas);

```

Una vez guardar la información horaria “myFile.print” en la SD, se creó un archivo llamado “myFile.println” para almacenar todos los datos: fecha, temperatura, presión y gas.

```

myFile.close(); //cerramos el archivo

Serial.print("Temperatura ");
Serial.print(temp);
Serial.println(" C");
Serial.print("Presion ");
//Serial.print((float)analogRead(A0)*10/747);
Serial.print((float)analogRead(A0) * (0.056) - (23.3));
Serial.println(" Kp");
Serial.print("Gas ");
Serial.print((float)analogRead(A1) * 10000 / 1023);
Serial.println(" ppm");

//Serial.print(a);
//Serial.print(" ");
//Serial.println(segundo);
horalInicial = hora + 1;
a = a + 1;
//delay(100);

}

else {
// if the file didn't open, print an error:
Serial.println("Error al abrir el archivo");
}
}
}

else {
Serial.print("tramo completado dia #");
Serial.println(t);
Serial.println(" ");
a = 0;
t = t + 1;
leerfecha();
horalInicial = hora;
}

}

// }
// }
// while(1);
}

```

## 6.8 Implementación del Biodigestor

En el inicio de los resultados se mostrará todo proceso realizado para la elaboración del biodigestor, desde la ubicación donde se llevaría a cabo la instalación, hasta su conexión al reservorio y modificación en la educación y montaje al quemador.

*Ilustración 14 Medición del plástico calibre 7*



Fuente: Propia

Para esto se extendió el polietileno y se procedió a realizar una doble capa, llevando de un extremo al otro el inicio del plástico de manera interna. Una vez realizado se procede a medir y cortar la capa que será destinada para la elaboración del biodigestor, el reservorio y el excedente se procederá a utilizar como una capa protectora entre zanja y el biodigestor tubular.

*Ilustración 15 Apertura y sellado de la salida de biogás*



Fuente: Propia

Para esto se procede a conecta un macho y una hembra en el centro del polietileno, estos vienen acompañados de un plástico reutilizado de cuñetes o recipientes plásticos y caucho de neumático los cuales al ser conectados a presión dan como resultado la salida del biogás sin presentar fuga alrededor del orificio.

*Ilustración 16 Elaboración del agitador*



Fuente: Propia

Una vez efectuada la salida del biogás se procede a realizar el agitador el cual cumple la función de ayudar mezclar la composición de sustrato [1:2] este fue ejecutado con cuñetes de pintura y una soga que cumpla con una longitud superior a 7 metros que sería el largo del biodigestor. Para esto se le asignó una medida de 15 metros.

*Ilustración 17 Incorporación de la entrada y salida del biodigestor*



Fuente: Propia

Para esto se llevó a cabo el corte y lijado de un tubo de PVC de 6 In, dando en efecto dos piezas de 1 metro los cuales antes de ser fijados, se ingresó el agitador. Para esto se realizaron unos dobleces al polietileno y adicional con el uso del caucho de neumático se ajustó y se sujetó el plástico al tubo de PVC, dado como resultado final el desarrollo del biodigestor.

### 6.8.1 Construcción de la zanja e integración del biodigestor

Para el desarrollo de la zanja se tiene presente las dimensiones del biodigestor y adicional se analizó el punto estratégico donde se llevaría a cabo su instalación, debido a la que la finca cuenta con establos de ordeño donde se limpia el ganado una vez terminado el proceso este tiende a realizar deposiciones las cuales debido a su mal manejo están afectando las lagunas del sector. Por esta razón se desea aprovechar en su mayoría el estiércol producido y que su vez sea fácil de transportar al biodigestor.

*Ilustración 18 Perforación de la zanja*



Fuente: Propia

*Ilustración 19 Confección del guarda sombra*



Fuente: Propia

*Ilustración 20 Adhesión del polietileno en la zanja e integración del biodigestor*



Fuente: Propia

Una vez realizada la zanja se procedió con la nivelación y la incorporación del guarda sombra, este es un accesorio adicional que permite alargar la vida útil del biodigestor y lo protege de cualquier otro factor que pueda rasguñar o afectar el polietileno.

*Ilustración 21 Mezcla [1:2] de estiércol agua*



Fuente: Propia

*Ilustración 22 Carga y alimentación del biodigestor*



Fuente: Propia

Una vez realizada la adhesión del polietileno se efectuó la recolección de la mezcla de sustrato, para esto se ejecutaron 5 baldes de agua equivalentes a 100 Litros y 2 baldes de estiércol correspondiente a 56 Kg para generar 1 carga de alimentación. Para llevar a cabo la puesta en marcha de biodigestor y su descomposición anaerobia fue necesario realizar 45 cargas, con el objetivo de llenar el 60% del biodigestor y dejar un 40% para la producción y almacenamiento del biogás. Finalizado el proceso de llenado se realizó la instalación de los sensores para la toma de datos, estos tuvieron intervalo de 9 días para comenzar a registrar niveles de metano (CH<sub>4</sub>) en el biodigestor.

### 6.8.2 Incorporación del biodigestor

Para la incorporación del biodigestor fue necesario realizar en la zanja dos perforaciones de 45° donde se ubicaron los tubos de PVC para su alimentación y extracción del biol. Una vez instalado el biodigestor se procedió a realizar su respectiva alimentación. Para esto se conoce que la mezcla sustrato-agua es [1:2] por lo cual fue necesario agregar 56 Kg de estiércol y 100 L de agua a la mezcla, hasta llenar un 60% del volumen total de biodigestor, dejando tapada la entrada y salida de la mezcla, iniciando de esta forma el proceso de hidrólisis. Para la activación del biodigestor fue necesario un tiempo de 7 a 14 días para producción de biogás. En la parte superior del reactor anaerobio se encuentra un arreglo que se le realizó al tubo de PVC, mediante la unión de un macho y un hembra de PVC, cuñetes de pintura y caucho de neumático se realiza la conexión que permite la salida del biogás, sin generar fugas. Adicional a la salida del reactor anaerobio se instaló una válvula de alivio para evitar un acceso de biogás que pueda afectar el sistema y adicional se realizaron conexiones de tuberías de ½ In donde se aplicó la limadura de hierro para la eliminación del compuesto H<sub>2</sub>S que es corrosivo para los metales y equipos.

En la siguiente ilustración se observa el reactor anaerobio, ubicado en la zanja, adicional se logra analizar el arreglo realizado al tubo de PVC para la salida del biogás y la válvula de alivio, que se encarga de evitar los excesos de biogás.

*Ilustración 23 Biodigestor tubular*



Fuente: Propia

### 6.8.3 Implementación del reservorio e instalación al biodigestor

Para lograr la instalación del reservorio fue necesario dimensionar e instalar la tubería que transportaría el biogás al reservorio, para esto se tomaron las medidas necesarias para realizar los cortes y conexiones necesarias a la tubería de PVC de ½ In. Adicional a la salida del biodigestor se instaló una válvula de seguridad que permite controlar el exceso de producción de biogás, con el fin de evitar un aumento de presión que pueda afectar el sistema y al lado también se instalaron los sensores para la toma de datos. Los sensores fueron introducidos en la tubería del biodigestor y su Arduino fue protegido en una caja hermética y para la salida de los sensores se selló con silicona y se forro con tiras de neumático, evitando algún escape de biogás.

*Ilustración 24 Acople de válvula de seguridad y sensores*



Fuente: Propia

Una vez instalada la válvula de seguridad se depositó agua hasta la mitad del recipiente, con el objetivo de cumplir dos fines. El primero es permitir que en caso de que el biogás no se consuma este tenga una manera de nivelar la producción, evitando un exceso gas en el biodigestor. El segundo fin es que, a mayor distancia del biodigestor al reservorio, el biogás necesita una mayor presión para poderse desplazar por lo cual la válvula de seguridad necesita una mayor concentración de agua para evitar fugas cuando se esté utilizando el biogás.

*Ilustración 25 Instalación de las tuberías*



Fuente: Propia

Una vez realizado el sondeo e instalada la tubería se procedió a verificar que no tenga ninguna fuga, para esto se efectuaron monitores con agua y jabón con el objetivo de comprobar que no exista ningún escape antes de tapar la perforación. Finalizada la revisión se procede a conectar la tubería con el reservorio y adicional se instala una trampa de agua a la entrada del reservorio debido a que le biogás posee trazas de H<sub>2</sub> que al ser condensarse formarían acumulaciones de diferentes compuestos.

*Ilustración 26 Acople del reservorio en el sistema*



Fuente: Propia

Al ser instalado el reservorio se procedió a realizar estudios con el propósito de analizar la velocidad con la cual este lograría llenarse, contando con las condiciones óptimas del biodigestor y siempre y cuando se respetaran los parámetros establecidos, los cuales son mantener una alimentación diaria del biodigestor (5 baldes de agua y 2 de estiércol) y adicional mantener la válvula de segura con la cantidad de agua necesaria. Una vez fueron examinados estos requisitos se llevó a cabo la apertura de las válvulas y en un transcurso de 15 minutos se visualizó el llenado del sistema de almacenamiento en su totalidad.

*Ilustración 27 Llenado del reservorio*



Fuente: Propia

Finalizado el llenado del reservorio se procede a adaptar la manguera de gas con la cual se alimentaría el sistema de combustión, en este caso se utilizó una manguera de gas amarilla, por normativas de seguridad, es importante recalcar que estas mangueras son utilizadas debido a que otros gases de mayor poder calorífico poseen una presión que se debe soportar, pero en el caso del biogás cualquiera manguera que se desee utilizar no va a presentar ninguna complicación ya que este se caracteriza por no tener presión, de igual manera se seleccionó una manguera de gas.

## 6.9 Toma de muestra de la cromatografía y resultado del análisis

Para la puesta en marcha del estudio fisicoquímico, fue necesario utilizar una bolsa tedlar para la captura del biogás a evaluar. Este se realizó a la salida del reservorio con el fin de que la muestra obtenida pasara por la limadura de hierro generando de esta manera una reducción en el porcentaje de las trazas de H<sub>2</sub>S que es el compuesto corrosivo que se desea eliminar. Para la cromatografía se llevó a cabo el análisis en el laboratorio de ciencias químicas de la UIS, esta prueba está enfocada en la composición molecular del CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S del biogás producido, de esta manera los resultados del examen fueron los siguientes:

Tabla 12 Resultados cromatografía

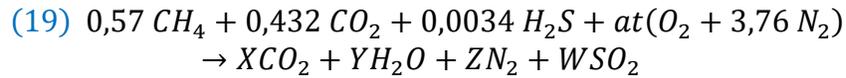
<b>Fecha de muestreo:</b> No especifica		<b>Fecha de recepción:</b> 15/03/2021	
<b>Características de la muestra:</b> Biogás		<b>Fecha de análisis:</b> 17/03/2021	
<b>No. De análisis:</b>		CG_G170321	
<b>Lugar de muestreo:</b>		No especificado	
<b>Responsable:</b>		Guillermo Zamudio	
<b>Muestra: CG_G170321</b>			
<b>Componente</b>	<b>Formula</b>	<b>Porcentaje (Molar)</b>	
Metano	CH <sub>4</sub>	57,43±0,2	
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	43,23±0,3	
Sulfuro de hidrógeno	H <sub>2</sub> S	0,34±0,06	

Fuente: Laboratorio de ciencias químicas de la UIS

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios debido a que en los informes analizados [10] y en la tabla 1, se puede detallar que la composición del biogás por excelencia debe tener una composición de 55-70% de (CH<sub>4</sub>) de 30-45% de CO<sub>2</sub> y el excedente son trazas de otros compuestos. También es posible resaltar que el mínimo porcentaje que debe tener un gas para considerar volátil es del 45% de (CH<sub>4</sub>) por lo cual el biogás producido cumple con las condiciones requeridas [4].

### 6.9.1 Balance teórico de combustión del biogás

Para el presente análisis se evaluó el proceso de combustión del biogás, con el objetivo de analizar la eficiencia de ignición, el porcentaje de emisiones contaminantes y la relación aire/combustible.

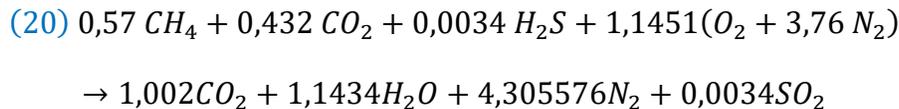


Una vez realizado el despeje de las variables (X, Y, Z, W, at) se procede a remplazar estos valores en la ecuación.

Tabla 13 Productos del modelo teórico de combustión

Productos	
X	1,002
Y	1,1434
At	1,1451
Z	4,305576
W	0,0034

Fuente: Propia



Conociendo la composición del biogás, que es ((0,57Kmol de CH<sub>4</sub>), (0,432Kmol de CO<sub>2</sub>), (0,0034Kmol de H<sub>2</sub>S) y (2x 4,76Kmol de aire)) por cada m<sup>3</sup> se produciría → ((1,002Kmol de CO<sub>2</sub>), (1,1434Kmol de H<sub>2</sub>O), (4,305576Kmol de N<sub>2</sub>) y (0,0034Kmol de SO<sub>2</sub>). Una vez conocida la composición del biogás y sus reactivos, se procede a obtener la relación aire/combustible, el % máximo de CO<sub>2</sub>, Kmol de humos secos y el índice de CO<sub>2</sub>.

$$(21) \quad \text{Aire requerido} = (4,76 * 1,1451) = 5,450676 \frac{Kmol_{aire}}{Kmol_{fuel}}$$

$$(22) \quad Kmol \text{ humos secos} = (1,002 + 4,305576 + 0,0034) = 5,310976$$

$$(23) \quad \% \max CO_2 = \frac{Kmol_{CO_2}}{Kmol_{humos \ secos}} * 100\% = \frac{1,002}{5,310976} * 100 = 18,86658874\%$$

$$(24) \quad \text{Índice de } CO_2 = \frac{Kg \ CO_2}{Kg \ CH_4} = \frac{Kmol \ CO_2 * M_{CO_2}}{Kmol \ CH_4 * CH_4}$$

$$= \frac{1,002(2 * 16) + 12}{0,57(4 * 1) + 12} = 4,834210 \frac{Kg \ CO_2}{Kg \ CH_4}$$

Una vez obtenidos los valores del modelo teórico de combustión del biogás, se procede a realizar los cálculos del análisis de intercambiabilidad con el objetivo de poder determinar la viabilidad del cambio del gas propano utilizado en el quemador por el gas obtenido, sin tener que realizar ninguna modificación a la estufa o los quemadores de la finca.

### 6.9.2 Análisis de intercambiabilidad

Para el presente análisis se determinó el potencial de intercambiabilidad de una mezcla de GLP y el biogás generado mediante el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos de búfala. Este estudio se realizó en un sistema de combustión (quemador de uso doméstico), con el objetivo de comparar el contenido energético de cada mezcla, mediante el índice de Wobbe.

Ilustración 28 Composición GLP producido en la refinería de Barrancabermeja

Componente	Formula	$V_a \left( \frac{m^3(ST)_{aire}}{m^3(ST)_{gas}} \right)$	$V_f \left( \frac{m^3(ST)_{humos-hum.}}{m^3(ST)_{gas}} \right)$	$V_f \left( \frac{m^3(ST)_{humos-sec.}}{m^3(ST)_{gas}} \right)$	PCI <sub>VOLUMÉTRICO</sub> $\left( \frac{Kwh}{m^3(ST)} \right)$	PCS <sub>VOLUMÉTRICO</sub> $\left( \frac{Kwh}{m^3(ST)} \right)$
Metano	CH <sub>4</sub>	9.52	10.52	8.52	9.43	10.49
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	16.66	18.16	15.16	16.95	18.55
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	23.80	25.8	21.8	24.66	26.78
Butano Normal	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	30.94	33.44	28.44	31.17	33.77
Isobutano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	30.94	33.44	28.44	31.06	33.66
Pentano Normal	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	38.08	41.08	35.08	38.37	41.5
Isopentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	38.08	41.08	35.08	38.29	41.41
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	14.28	15.28	13.28	15.63	16.69
Propileno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	21.42	22.92	19.92	23.06	24.68
Butileno	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	28.56	30.56	26.56	29.75	31.87
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	11.90	12.4	11.4	14.75	15.28
Hidrogeno	H <sub>2</sub>	2.38	2.88	1.88	2.83	3.36
Monóxido de C	CO	2.38	2.88	2.88	3.31	3.31

Fuente: [36]

$$(25) W_s = \frac{PCS}{\sqrt{d_r}} = \frac{\text{Poder calorífico superior gas propano}}{\sqrt{\text{Densidad relativa}}} = \frac{\frac{24,68 \text{ Kwh}}{m^3}}{0,58} = \frac{42,55 \text{ Kwh}}{m^3}$$

$$(26) W_s = \frac{PCS}{\sqrt{d_r}} = \frac{\text{Poder calorífico superior biogás}}{\sqrt{\text{Densidad relativa}}} = \frac{\frac{10,49 \text{ Kwh}}{m^3}}{0,83} = \frac{12,63 \text{ Kwh}}{m^3}$$

Una vez realizado el análisis de intercambiabilidad, se observa que no es posible adecuar el biogás al sistema de combustión debido a que presentan índices de Wobbe muy distintos, por lo cual es necesario realizar modificaciones en el quemador doméstico a utilizar. Para esto se realizó modificaciones en los inyectores

de presión los cuales fueron siendo modificados poco a poco ampliando su diámetro y con la ayuda de un calibrador se tomaron medidas y se comparó cual medida se ajustaba mejor a los quemadores. Después de realizar ampliaciones de (0,2 mm, 0,4 mm, 0,6 mm, 0,8 mm, 1 mm, 2 mm, 3mm, 5mm) se determina que la salida del biogás continúa siendo ineficaz por lo que fue necesario retirar los inyectores de gas ya que al no tener presión en biogás no se notaba las modificaciones realizadas.

## 7. Análisis de resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos tras el desarrollo de las diferentes fases del proyecto: el resultante de la experimentación se refleja en un análisis de varianza ANOVA, posteriormente se presenta el esquema final del proyecto del proyecto, para pasar a las pruebas de combustión y un estimado de ahorros obtenidos por la implementación del proyecto.

### 7.1 Análisis de resultados de la matriz ANOVA

Se realizó un estudio ANOVA con el propósito de evaluar cómo influyen los dos factores estudiados en la producción de CH<sub>4</sub>, en la toma de datos, dadas las características de los sensores, se obtuvo que la presión siempre se mantuvo constante, y no es indispensable para determinar el comportamiento de producción de biogás, no se evalúa en el presente análisis de varianza. Para esta investigación se tomaron distintos datos durante un período de 30 días que es el lapso que se requiere para llevar a cabo un tiempo de retención hidráulica ideal (TRH) y lograr determinar que las mediciones obtenidas fueran nulas (datos iguales) o alternas (datos diferentes), para definir el resultado se desarrolló este análisis con un nivel de significancia del 5%. Se presupone igualdad de varianzas para el análisis y como resultado se deduce que el nivel de confianza es del 95%, que la temperatura ambiente sí influye en la producción de CH<sub>4</sub> ya que el Pvalue que arroja el análisis de varianza es menor al 5%, es decir que de esta manera se rechaza la hipótesis nula al no ser iguales las medias.

Para los resultados se seleccionó el análisis de varianza de 3 días en los cuales la curva de comportamiento logra evidenciar de la mejor manera la producción de ppm CH<sub>4</sub> con respecto a la temperatura, certificando que este vector si influye en la variable de respuesta.

#### Día 9 (04-01-2021):

Tabla 14 Resultados matriz ANOVA 1

Información del factor		
Temperatura	Niveles	Valores
(°C)	22	32.69, 33.19, 34.06, 34.56, 35.50, 35.63, 35.75, 35.88, 36.00, 36.25, 36.44, 36.63, 37.13, 37.56, 39.25, 39.56, 39.69, 40.50, 42.00, 42.25, 43.31, 43.38

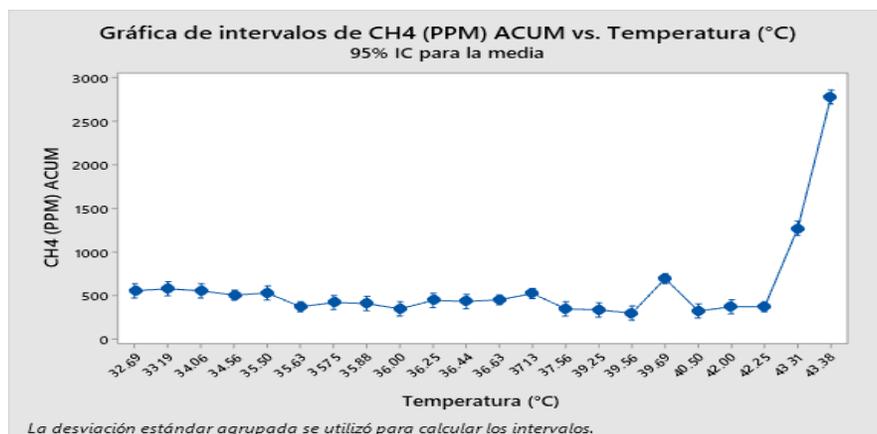
Análisis de varianza					
Fuente	GL	SC Ajustada	MC Ajustada	Valor F	Valor P
Temperatura	21	5976010	284572	255,46	0
Error	6	6684	1114	x	
Total	27	5982694	x		

Resumen del modelo			
S	R-cuad	R-cuad (ajustado)	R-cuad (pred)
33,3759	99,89%	99,5%	99,69%

Fuente: Propia

Para el análisis de las tablas “información del factor y análisis de varianza” se tuvo presente que la cantidad de datos registrados, en el día nueve fueron 28 de los cuales 6 se encontraron repetidos y debido a esto el análisis de varianza registro 22 datos y el sistema descarta uno. Por esta razón se observan que los grados de libertad del factor temperatura (GL) se trabajan con 21 datos y a partir de estos, se comienza a trabajar en la suma de cuadrados ajustada (SC Ajustada), la media ajustada (MC Ajustada), valor de Fisher (Valor F) y el valor de producción (Valor P).

Ilustración 29 Intervalos de CH4 VS Temperatura, día 9



Fuente: Propia

En la ilustración 29 se observa el comportamiento de generación de ppm de CH<sub>4</sub>, donde aumenta de manera exponencial con la variación de temperatura. De esta manera se afirma que la ilustración número 6 si cumple con un crecimiento relativo de microorganismos, acelerando la descomposición de la proteína de la mezcla sustrato y generando un incremento en las medición y producción de metano.

**Día 14 (04-06-2021):**

Tabla 15 Resultados matriz ANOVA 2

Información del factor		
Temperatura	Niveles	Valores
(°C)	21	30.06, 30.50, 30.56, 31.37, 31.50, 31.87, 32.00, 32.13, 32.88, 33.13, 33.50, 33.94, 35.00, 35.88, 36.56, 37.38, 37.94, 40.06, 44.75, 48.88

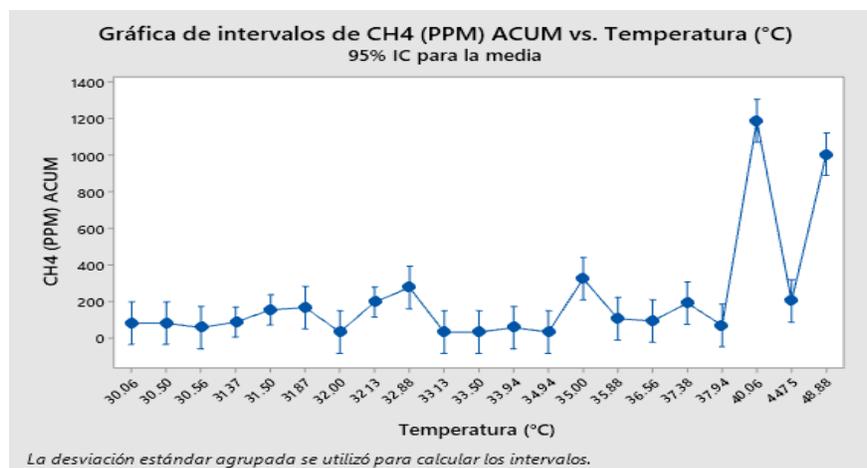
Análisis de varianza					
Fuente	GL	SC Ajustada	MC Ajustada	Valor F	Valor P
Temperatura	20	1882250	94112	71.19	0.002
Error	3	3966	1322	x	
Total	23	1886216	X		

Resumen del modelo			
S	R-cuad	R-cuad (ajustado)	R-cuad (pred)
36.36	99,79%	98.39%	99.09%

Fuente: Propia

Para comprender de una mejor manera el análisis de varianza es importante entender cómo funciona el valor de F el cual es obtenido de dividir la temperatura del MC Ajustada, sobre el error de la MC Ajustada. Esto da como resultado 71.19 que sería el Valor F calculado, este es comparado con el valor teórico que se encuentra en la tabla de Fisher a través de los grados de libertad y al dividir estos valores se obtiene como resultado final el Valor P.

Ilustración 30 Intervalos de CH<sub>4</sub> VS Temperatura, día 14



Fuente: Propia

En esta grafica se puede visualizar que la producción de CH<sub>4</sub> continúa dependiendo de la variación de temperatura, pero cada día que pasa las proteínas de la mezcla de sustrato van disminuyendo por lo cual aún se requiere de temperaturas mesofílicas (20°C a 45°C) para la generación de microorganismos que ayuden a descomponer la mezcla, realizando el proceso de metanogénesis.

**Día 20 (04-12-2021):**

Tabla 16 Resultados matriz ANOVA 3

Información del factor		
Temperatura	Niveles	Valores
(°C)	14	30.75, 31.00, 31.06, 31.37, 32.00, 33.37, 33.50, 34.19, 35.02, 35.18, 35.51, 35.78, 36.02, 43.38

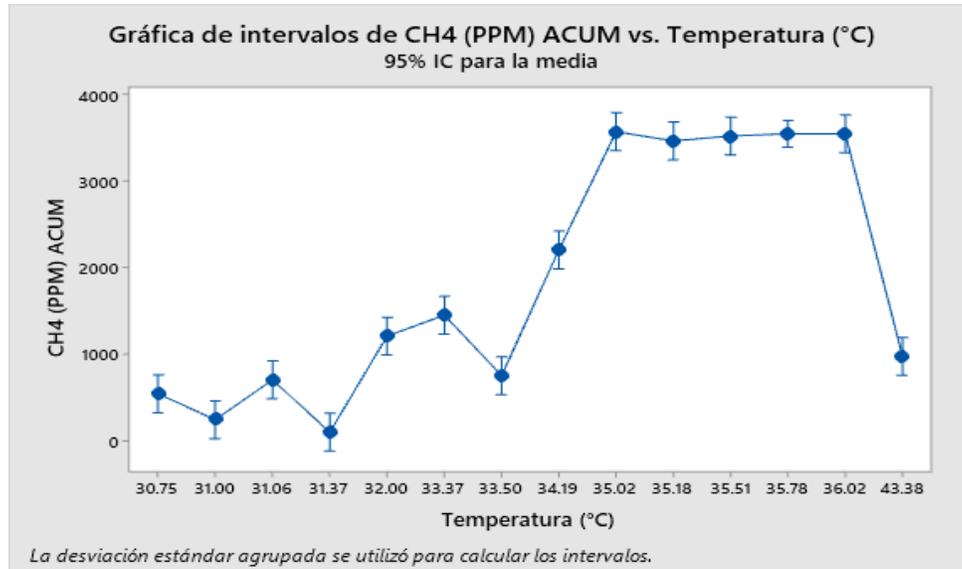
Análisis de varianza					
Fuente	GL	SC Ajustada	MC Ajustada	Valor F	Valor P
Temperatura	13	28039341	94112	7341.57	0.009
Error	1	294	1322	x	
Total	14	28039635	x		

Resumen del modelo			
S	R-cuad	R-cuad (ajustado)	R-cuad (pred)
17.1403	100.00%	99.99%	99.95%

Fuente: Propia

Por último, el resumen del modelo teórico se determina mediante medidas estadísticas que indican la línea de regresión ajustada, donde el (0% indica que el modelo no explica ninguna porción de la variabilidad y el %100 si explica la porción de variabilidad) de datos con respecto a la media. Esto evidencia que el R-cuadrado presenta una correlación muy fuerte, afirmando que los valores de temperatura ingresados si se ajustan, aproximándose a un 100%.

*Ilustración 31 Intervalos de CH4 VS Temperatura, día 20*



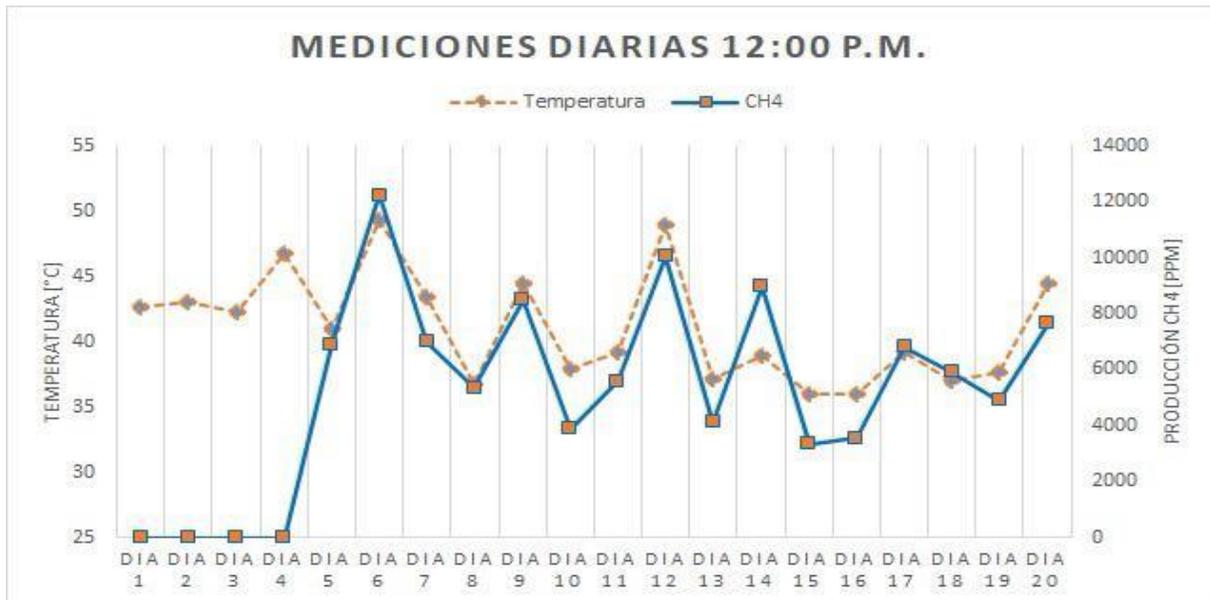
Fuente: Propia

En la ilustración 31 se observa como la temperatura influye en la producción de ppm de CH<sub>4</sub>, pero al final hay una caída considerable. Esto se debe a que el biodigestor fue alimentado hace 20 días y la carga orgánica ha perdido lignina de los alimentos, debido a esto de aquí en adelante la producción de biogás comenzara a disminuir, por esta razón en los siguientes días se deben realizar cargas orgánicas diarias para que la producción se mantenga constante.

Es importante resaltar que el TRH observado tiene sentido y coincide con los valores analizados en el estudio [35] donde se indica que según la temperatura de la “vereda salinas” el TRH es de 21 días al presentar temperaturas mesofílicas y termofílicas.

En la siguiente ilustración se analiza la generación de ppm de CH<sub>4</sub> con respecto al transcurso de los días y la temperatura a una hora determinada, con el fin de poder demostrar el proceso de digestión anaerobia y su comportamiento para la producción, desde el día 1 hasta el día 20.

### Ilustración 32 Mediciones diarias



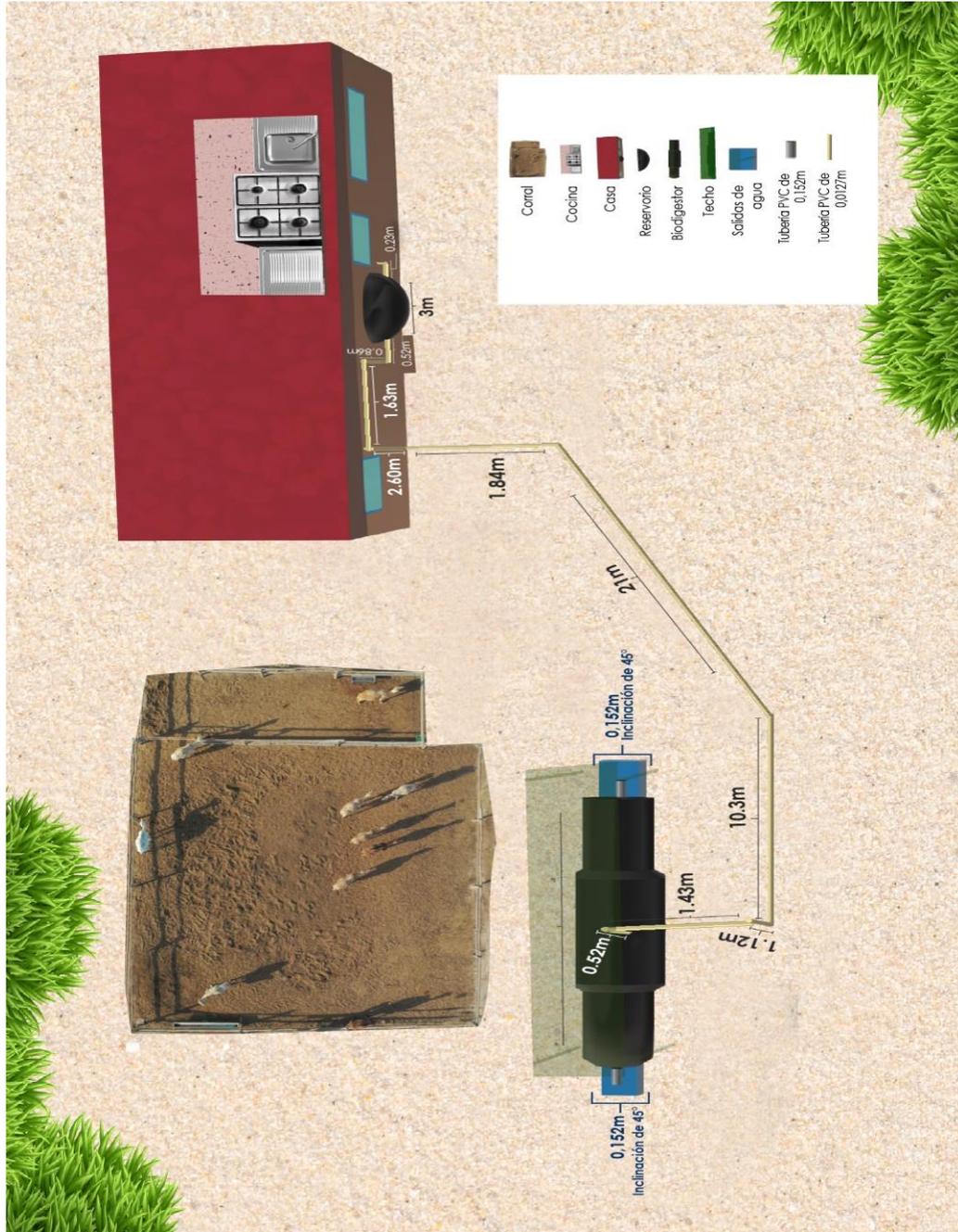
Fuente: Propia

De la ilustración anterior se puede determinar que la temperatura si influye en la producción de ppm de CH<sub>4</sub> y que al pasar los 15 días del TRH la concentración de CH<sub>4</sub> ira disminuyendo de manera considerable, dando a entender que a partir de ese día es recomendable comenzar con la alimentación diaria del reactor anaerobio.

## 7.2 Esquema final del proyecto

Para el renderizado del diseño se tuvo presente las últimas modificaciones que se realizaron en el proyecto, como lo son los tubos de PVC que permiten la entrada y salida de la mezcla de sustrato, la cubierta ubicada en la parte superior del reactor anaerobio, las tuberías que llevan el biogás producido del reactor al reservorio y la tubería que va a la instalación a la cocina, donde se llevaran los procesos de cocción. Esto con el fin de poder presentar una ilustración más real del diseño final del proyecto.

Ilustración 33 Esquema final de la finca



Fuente: Propia

### 7.3 Modificación del quemador doméstico e instalación al reservorio

Para iniciar las modificaciones en el quemador fue necesario comprender que influía en la salida del gas, para esto se revisó y desinstalo el sistema que se iba a trabajar. Una vez analizada la estufa se llegó a la conclusión que los inyectores son fundamentales para este proceso, debido a que la estufa viene acoplada a trabajar con presiones de gas licuado de petróleo (GLP) o gas natural, por lo cual el diámetro que se está manejando no es el apropiado para trabajar con biogás. En la ilustración 27 se puede apreciar el interior de la estufa y la conexión al sistema de gas mediante la válvula de seguridad. Una vez el biogás ingresa, pasa por cada uno de los ductos donde se encuentran los fistos (inyectores de gas) los cuales fueron modificados y de ahí se procede a realizar las pruebas correspondientes de funcionamiento.

*Ilustración 34 Quemador doméstico y su interior*



Fuente: Propia

En la ilustración 34 se logra detallar que hay buena estabilidad de llama al utilizar el biogás en los quemadores y una vez analizada su estructura se procede a realizar las pruebas de comparación con el GLP con el fin de revisar el calentamiento de diferentes alimentos

Ilustración 35 Tipo de llama del biogás producido



Fuente: Propia

#### 7.4 Análisis del tiempo de cocción y durabilidad de la llama

Para los resultados obtenidos, se llevó a cabo una comparación en el tiempo destinado que requiere el biogás para la cocción de agua, dejando como unidad de medida el minuto. De esta manera se procede a llevar a cabo el punto de ebullición del líquido comparando distintos diámetros utilizados en los inyectores de gas, con el fin de determinar los tiempos de cocción.

En la siguiente tabla se aprecian los distintos diámetros utilizados en los inyectores de gas para los procesos de cocción, donde se observa que el biogás presenta resultados satisfactorios.

Tabla 17 Tiempo de cocción del agua

Diámetro (mm) / Salida biogás	Tiempo
0,2 mm	No se consigue llama
0,4 mm	No se consigue llama
0,6 mm	No se consigue llama
0,8 mm	14 minutos
1 mm	14 minutos
2 mm	13 minutos
3 mm	12 minutos
5 mm	10 minutos
Sin inyector	7 minutos

Fuente: Propia

## 7.5 Costos del proyecto

Para finalizar se tuvo presente el valor total del montaje del proyecto “implementación de un biodigestor para el aprovechamiento energético de residuos orgánicos de búfalos en el municipio de Rionegro, Santander”. Para esto se realizó una tabla donde se recopila los distintos elementos comprados para llevar a cabo el montaje de todo el proyecto, en cada una de las visitas realizadas. En la siguiente tabla se logra observar cada uno de los elementos utilizados, la cantidad que fueron comprados y su valor por unidad, esto con el fin de conocer cuánto cuesta realizar un proyecto como este.

Tabla 18 Costos del proyecto

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unidad</b>	<b>Total</b>
Tubería de 3m de PBC de 5 In	1	\$ 90.000,00	\$ 90.000,00
Codo 45° de PBC de 5 In	2	\$ 10.000,00	\$ 20.000,00
Conector Y conexión 1/2	1	\$ 17.000,00	\$ 17.000,00
Codos 90° de PBC de 1/2 In	16	\$ 500,00	\$ 8.000,00
Caucho de neumático	5	\$ 2.000,00	\$ 10.000,00
Macho liso de PBC de 1/2 In	2	\$ 500,00	\$ 1.000,00
Hembra lisa de PBC de 1/2 In	2	\$ 500,00	\$ 1.000,00
Tubería de 3m de PBC de 1/2 In	13	\$ 6.000,00	\$ 78.000,00
Limadura de hierro	5	\$ 2.000,00	\$ 10.000,00
40 m de plástico de calibre	1	\$ 400.000,00	\$ 400.000,00
Limpiador de tubería	1	\$ 10.000,00	\$ 10.000,00
Pegamento de tubería	1	\$ 10.000,00	\$ 10.000,00
Válvulas	5	\$ 1.000,00	\$ 5.000,00
Trampa de agua	1	\$ 14.000,00	\$ 14.000,00
Cuerda de 20 m	1	\$ 25.000,00	\$ 25.000,00
Manguera de biogás de 5 m	1	\$ 15.000,00	\$ 15.000,00
Cromatografía	1	\$ 170.000,00	\$ 170.000,00
Sensor MQ4	1	\$ 23.000,00	\$ 23.000,00
Sensor de Temperatura	1	\$ 10.000,00	\$ 10.000,00
Sensor de presión (MPX100P; X0816AC)	1	\$ 30.000,00	\$ 30.000,00
Datalogger shield para Arduino	1	\$ 18.000,00	\$ 18.000,00
Uno compatible con Arduino	1	\$ 26.000,00	\$ 26.000,00
Memoria microSD 16 Gb clase 10	1	\$ 29.000,00	\$ 29.000,00
Extensión 20 m	1	\$ 20.000,00	\$ 20.000,00
<b>Total</b>		<b>\$ 1.040.000,00</b>	

Servicios	Horas	Valor hora \$	Total \$
Mano de obra	60	20000	1200000
Transporte	30	20000	600000
Valor Materiales	NA	1040000	1040000
Valor total del proyecto	\$ 2840000		

Fuente: Propia

## 7.6 Retorno simple de inversión

Para los costos de retorno se tuvo presente el valor que gasta el propietario todos los meses con el uso del gas propano para los procesos de cocción, de los cuales consume \$70.000 por la pimpina de gas y \$10.000 que son los gastos relacionados al transporte. Teniendo presente este costo se procede a dividir el valor total del proyecto con el propósito de conocer en cuanto tiempo el cliente recuperara la inversión. Merece mencionarse que este es un análisis simple, que pretende obtener un período aproximado de retorno de inversión asumiendo valores constantes.

Para la siguiente tabla se tuvo presente la inversión inicial del proyecto con los costos relacionados al transporte, gas propano. Estos valores presentan un aumento anual del 5%.

*Tabla 19 Retorno simple de inversión*

Proyecto	Inversión Inicial	Mes1	Mes2	Mes3	Mes4	Mes5	Mes6	Mes7	Mes8	Mes9	Mes10	Mes11	Mes12
Primer año	\$2'840.000	\$80.000	\$80.000	\$80.000	\$80.000	\$80.000	\$80.000	\$80.000	\$80.000	\$80.000	\$80.000	\$80.000	\$80.000
Segundo año	\$1'880.000	\$84.000	\$84.000	\$84.000	\$84.000	\$84.000	\$84.000	\$84.000	\$84.000	\$84.000	\$84.000	\$84.000	\$84.000
Tercer año	\$872.000	\$88.200	\$88.200	\$88.200	\$88.200	\$88.200	\$88.200	\$88.200	\$88.200	\$88.200	\$88.200	-	-
	\$-10.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Propia

Se puede analizar que a partir del tercer año “34 meses” el cliente recuperara su inversión. El digestor anaerobio tipo tubular tiene una vida útil de 10-15 años como se observa en la tabla número dos, generando ganancias de hasta 12 años según el buen cuidado que se le dé.

## 8. Conclusiones:

- Se logró implementar un biodigestor tubular instrumentado que permite sustituir la demanda de GLP de mensual de 48,36 m<sup>3</sup> mediante el aprovechamiento del estiércol del ganado bufalino en la finca, consiguiendo una producción de 54,96 m<sup>3</sup> de biogás al mes. Evitando así el costo anual de \$960.000 asociados a la adquisición de este combustible.
- Los resultados experimentales, en concordancia con la caracterización física, mostraron que la producción de biogás mediante la composición [1:2] del estiércol de búfala y de becerro, en las condiciones del lugar de implementación del proyecto, permite obtener un biogás de buena calidad, reflejado en un porcentaje de 57,42% CH<sub>4</sub> siendo un valor superior al 45% requerido por un gas para considerarse volátil.
- Con las variables monitoreadas de temperatura y gas metano se logró realizar el análisis de varianza, que permitió demostrar, que el factor de temperatura si influye en la producción de las partes por millón (ppm) de CH<sub>4</sub>.
- El análisis experimental realizado evidencia que el TRH después del día 20 tiende a disminuir en la producción de CH<sub>4</sub>, debido que la proteína de la mezcla ha sido consumida por las bacterias anaerobias, validando los análisis a escala tomados como referencia para la realización del presente proyecto.
- Se estableció que para las propiedades de combustión del biogás el aire requerido en los quemadores debe ser de  $5,450676 \frac{Kmol \text{ aire}}{Kmol_{fuel}}$ , esto con el objetivo de que la llama sea estable y produciendo  $4,83 \frac{Kg CO_2}{Kg CH_4}$ .
- En el análisis de intercambiabilidad se comparó el índice de Wobbe del gas propano utilizado en el sector y el biogás producido en la finca, obteniendo como resultado que el PCS del gas propano es superior al del biogás y por esta razón no se puede sustituir directamente, requiriéndose modificaciones en el sistema.
- Se determinó que para poder efectuar el cambio de gas propano a biogás, es necesario retirar los inyectores de la estufa de propano original, para permitir suficiente paso de biogás a los quemadores. Obteniendo una llama estable, que permite conseguir tiempos de cocción cercanos a los ofrecidos en línea base, por el gas remplazado.

## 9. Recomendaciones

- Se debe realizar una alimentación diaria del con una composición [1:2] un balde de estiércol y dos baldes de agua, la cual no debe ser modificada para el correcto funcionamiento del biodigestor.
- La remoción de sólidos se debe realizar cada 12 meses con el movimiento de los cuñetes de pintura que están por dentro del biodigestor, estos se pueden manipular con la cuerda que esta al inicio y al final. De esta manera las bacterias puedan tener su propio funcionamiento biológico y al realizar la remoción de sólidos se afecta el tiempo de retención hidráulica acelerando el proceso.
- Realizar una vez al mes una inspección visual a los envoltentes plásticos del biodigestor y el reservorio para evitar fugas. Es importante no manejar objetos corto-pulsantes al momento de manipularlo.
- Sí se sospecha de fugas realizar una mezcla agua-jabón, hacer revisión de tubería, para corroborar que no haya fugas en el trayecto que inicia desde el biodigestor, pasa por el reservorio y termina en la parte de la cocina
- Mantener selladas las válvulas y darles buen uso, que sean manipuladas solamente cuando sea necesario, y estrictamente por la persona encargada.
- Cambiar cada 6 meses la limadura de hierro, que funciona como filtro para la remoción de trazas de  $H_2S$  y tener en cuenta que antes de cambiarla tendrá que pasar por un proceso de oxidación (colocarlo con agua a la intemperie) para su correcto funcionamiento.
- Por seguridad y protección se debe tener en cuenta no fumar cerca ni manipular elementos inflamables en las cercanías del biodigestor.

## Bibliografía

- [1] A. BIOGÁS, «AIN BIOGÁS,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.cra.gov.co>.
- [2] UPME, «UPME,» 9 12 2019. [En línea]. Available: [www1.upme.gov.co/hidrocarburos/plan\\_sustitucion\\_progresiva\\_lena.pdf](http://www1.upme.gov.co/hidrocarburos/plan_sustitucion_progresiva_lena.pdf).
- [3] IEA, «IEA,» Julio 2020. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/reports/renewables-information-overview..>
- [4] Minergia, «Minergia,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>.
- [5] INERCO, «UPME,» 1 12 2018. [En línea]. Available: <https://bdigital.upme.gov.co>.
- [6] J. Fernanda, «Energías renovables para todos,» IBERDROLA, España, 2003.
- [7] J. Fernandez, «Desarrollo de los cultivos energeticos,» *AGRO*, vol. 1 06, pp. 42-44, 2006.
- [8] R. Perez Calero, J. A. Carta Gonzalez, A. Colmenar Santos y M. A. Castro Gil, «Centrales De Energia Renovables,» Prentice Hall, Madrid, 2009.
- [9] O. Maser cerutti, F. Coralli, C. Garcia Bustamante, E. Riegelhaupt, T. Arias Chalico, J. Vega Gregg y R. Diaz Jimenez, «La bioenergía en Mexico,» CIFOR, Mexico, 2011.
- [10] M. T. V. Moreno, «Manual de biogás,» FAO, 2011, 2011.
- [11] Y. Lorenzo Acosta y M. C. Obaya Abreu, «La digestión anaerobica,» ICIDCA, Cuba, 2005.
- [12] R. Deganutti, M. d. c. Jampaulo Placido, M. Rossi, B. R. Tavarez y B. C. Dos Santos, «Biodigestores Rurais,» SciELO, Sao Paulo, 2002.
- [13] Agroecología, «Desechos a energía,» Ecoferia, Chile, 2014.
- [14] Y. Olaya Arboleda y L. O. Gonzalez Salcedo, «Diseño de biodigestores,» CMP, Palmira, 2009.
- [15] A. X. P. Ocaña, «Evaluación de un efluente liquido obtenido mediante biodigestores con diferentes tiempos de retencion hidraulica (TRH),» A. X. P. Ocaña, Ecuador, 2020.
- [16] M. I. S. Gutiérrez, «Fundamentos básicos de instrumentación y control,» UPSE, Santa Elena, 2017.
- [17] A. Ordoñez Mendoza, E. Fitz Ridriguez, T. Espinosa Solares, M. D. C. Gonzalez Rangel y N. Velazquez Lopez, «Determinación de concentración de metano con sensores semiconductores,» Efofan, Mexico, 2017.
- [18] R. E. Herrera, «Guia de usuario de arduino,» San Francisco, California, 2009.
- [19] M. L. Veronezea, D. Schwantesb Affonso, C. Gonzalves Jr, A. Richardt, J. Manfrinb, A. Paz Schillerb y T. Bana Schubaa, «Producción de biogás y fertilizantes mediante reactores anaerobicos con estiercol porcino y dosis de glicerina,» Science Direct, Brasil, 2019.
- [20] H. Clemens, R. Bailis, A. Nyambane y V. Ndungu, «Programa de asociación de biogás de África: Una revisión de la implementación de cocina limpia a través del desarrollo del mercado en Africa oriental,» Science Direct, Africa, 2018.
- [21] Q. Sun, H. Li, J. Yan, L. Liu Y y Y. Zhixin, «Selección de la tecnología de mejora de biogás adecuada: una revisión de la limpieza, mejora y utilización del biogás,» Science Direct, China, 2015.
- [22] R. J. Patinvoh y M. J. Taherzadeh, «Desafios de la implementación del biogás en países en desarrollo,» Science Direct, Africa, 2019.
- [23] N. Yasmin y P. Grundmann, «Adopción y difusión de energías renovables - El caso del biogás en países en desarrollo,» Science Direct, Pakistan, 2019.
- [24] H. A. A. Nur Izzah, M. M. Hanafiah y S. H. Gheewala, «Evaluación de ciclo de vida del biogás,» Science Direct, Malasia - Kebangsaan, 2019.
- [25] E. Lazaro, C. Del Carpio, L. Víneces y J. Oliden, «Un filtro de limadura de hierro para la desulfuración de biogás,» IEE Xplore, Lima, Peru, 2019.
- [26] N. Curry y D. P. Pillay, «Generadores electricos para residuos de biomasa en sistemas energeticos,» IEEE Xplore, Montreal, Canada, 2014.
- [27] L. A. Arias Barragan, A. J. Chica Leal, O. D. Florez Cediél y M. A. Becerra Perez, «UML para el diseño de la automatización del biodigestor,» IEEE Xplore, Colombia, 2011.
- [28] W. Y. Hong, S. P. Perera y A. D. Burrows, «Desarrollo de estructura adsorbente regenerativa y de

- baja caída de presión para la mejora del biogás,» IEEE Xplore, Australia, 2019.
- [29] L. Sigot, G. Ducom y P. Germain, «Adsorción de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) en Zeolita, mecanismo de retención,» Science Direct, Francia, Lyon, 2016.
- [30] V. Á. Ramirez Coutiño, L. M. Cuevas Vega, A. Vargas Hernandez y F. R. Perez Sanchez, «Generación de biogás en un biodigestor Automatizado,» Ecofan, Mexico, 2017.
- [31] F. Narciso de Laprida y V. Lopez, «The new farm company S.A,» 01 01 2019. [En línea]. Available: <http://www.agritotal.com>. [Último acceso: 15 10 2020].
- [32] M. D. Energía, «Energía Gob,» 30 11 2015. [En línea]. Available: <https://energia.gob.com>. [Último acceso: 15 10 2020].
- [33] B. D. Juana, «Biogás Doña Juana,» NEFCO, 2017. [En línea]. Available: <https://biogas.com.co>. [Último acceso: 16 10 2020].
- [34] D. C. C. Gómez, Estrategias de educación ambiental para el parque nacional, Pereira: Universidad Tecnologica De Pereira, 2011.
- [35] D. J. Vega Martinez y F. L. Silva Ariza, Estudio para la producción de biogás a partir de residuos, Bucaramanga: Facultad dde Ingeniería, 2020.
- [36] UPME, «Upme,» 01 Abril 2017. [En línea]. Available: [https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/Cadena\\_GLP\\_2017\\_30032017.pdf](https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/Cadena_GLP_2017_30032017.pdf).
- [37] A. A. A. Arrieta, Estimación de las propiedades de combustión de combustibles gaseosos, Medellin, 2002.