

**Diseño e implementación de un prototipo de un biodigestor instrumentado  
semicontinuo para la producción de biogás y biol en la finca Alsacia, municipio de  
Sotaquirá, Boyacá**

Camilo Alberto López Morcote, Andrés Fernando Romero Hurtado

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Ph.D. Jabid Eduardo Quiroga Méndez

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

Dedico esta tesis primeramente a mi madre por el apoyo brindado durante estos 5 años de carrera y especialmente en esta recta final para lograr la realización de este proyecto de grado, quien siempre me dio ánimo y me enseñó que aunque la vida no es fácil siempre hay una forma de cumplir los sueños, a mis hermanas Mariana y Leidy, especialmente a Mariana que nunca dudo de mí y que hoy desde el cielo me acompaña en la culminación de mis estudios como profesional, quien me alentó a no dejar mi carrera y día a día me recordaba el amor a esta, a mis sobrinos por siempre recordarme que soy un ejemplo para ellos y no debo bajar los brazos. De manera especial dedico al amor de mi vida Valentina Sisa por su amor y apoyo durante los últimos semestres y a toda la familia Sisa Velandia quienes me adoptaron como un hijo en la realización de esta tesis.

*Andrés Fernando Romero Hurtado*

Con todo mi cariño, dedico este trabajo de grado a Dios, por darme la salud y la fuerza necesaria para seguir adelante. Gracias por permitirme cumplir este sueño. A mi madre, por su apoyo incondicional, por nunca haber dejado de creer en mí y por enseñarme con su ejemplo a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. A mi hermana, que a pesar de todo siempre ha estado ahí para mí, por ser un ejemplo a seguir, por brindarme su apoyo en el momento justo y recordarme cuáles eran mis prioridades. Gracias por ayudarme a tomar decisiones que, con el tiempo, me acercaron a esta meta. Y a la estrellita que está en el cielo, guiando mis pasos, cuidándome desde lo alto y siendo siempre una parte de mí.

Gracias por tanto.

*Camilo Alberto López Morcote*

### **Agradecimientos**

Al culminar este proyecto de grado agradecemos a Dios por ser guía y brindarnos fortaleza en cada etapa de este proceso, nuestras familias y todas las personas que nos apoyaron, acompañaron en el camino e hicieron posible la realización de este proyecto, queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestro director de proyecto, Jabid Quiroga, por su valioso apoyo, dedicación y tiempo durante el desarrollo de esta investigación. Su orientación y compromiso fueron fundamentales para el logro de nuestros objetivos. Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander por brindarnos los recursos, el espacio académico y la formación necesaria para avanzar en nuestro camino profesional y personal. Gracias por ser parte esencial de este proceso de crecimiento y aprendizaje. De manera muy especial, agradecemos a la familia de Camilo, en particular a sus tíos Alfonso y Graciela, por su generosidad, apoyo y por facilitarnos el espacio en su finca, lo cual fue determinante para la instalación y operación del biodigestor utilizado en este proyecto.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
1. Planteamiento .....	16
1.1 Planteamiento del problema .....	16
1.2 Justificación .....	17
2. Objetivos .....	18
2.1. Objetivo general .....	18
2.2. Objetivos específicos .....	18
3. Marco teórico .....	19
3.1 Biogás .....	21
3.1.1 Definición de biogás .....	21
3.1.2 Características fisicoquímicas .....	21
3.1.3 Digestión anaeróbica .....	22
3.1.3.1 Hidrólisis .....	22
3.1.3.2 Acidogénesis .....	22
3.1.3.3 Acetogénesis .....	22
3.1.3.4 Metanogénesis .....	22
3.1.4 Usos del biogás .....	23
3.1.4.1 Generación de energía eléctrica .....	23
3.1.4.2 Calefacción .....	23
3.1.4.3 Combustible para transporte .....	23
3.2 Biol .....	23

3.2.1 Definición de biol.....	23
3.2.2 Forma de aplicación .....	23
3.3 Biodigestores .....	24
3.3.1 Definición de biodigestor .....	24
3.3.2 Tipos de biodigestores.....	24
3.4 Antecedentes .....	24
4. Metodología .....	25
4.1 Diseño del sistema .....	25
4.2 Construcción del prototipo.....	26
4.3 Instrumentación del sistema.....	26
4.4 Operación experimental .....	26
4.5 Análisis de datos .....	27
5. Instrumentación .....	28
5.1 Definición de instrumentación.....	28
5.2 Descripción procedimiento .....	28
5.3 Criterios de selección de sensores.....	28
5.3.1 Sensor de temperatura: Termocupla tipo K con MAX6675. ....	29
5.3.2 Sensor de nivel: HSRS04 (Ultrasónico sin contacto).....	29
5.3.3 Monitoreo de presión: Manómetro.....	29
6. Justificación de la solución .....	32
6.1 Características climáticas de Sotaquirá, Boyacá.....	32
6.2 Planteamiento de alternativas .....	32
6.2.1 Alternativas rodete agitador .....	32

6.2.1.1 Rodete de hélice marina de tres palas .....	32
6.2.1.2 Rodete de turbina con disco con palas. ....	33
6.3 Función de calidad .....	34
6.3.1 Requerimientos de diseño .....	34
6.4 Diseño elegido .....	34
7. Diseño del sistema .....	36
7.1 Diseño conceptual.....	36
7.2 Dimensionamiento del sistema .....	36
7.2.1 Potencial de producción de gas metano. ....	36
7.2.2 Volumen de gas metano producido.....	38
7.2.3 Volumen del biodigestor .....	39
7.3 Componentes del sistema.....	44
7.3.1 Transmisión de potencia.....	44
7.3.1.1 Rodete .....	44
7.3.1.2 Espesor de paletas .....	46
7.3.1.3 Motorreductor.....	49
7.3.1.4 Eje .....	53
7.4 Diseño de tuberías.....	54
7.4.1 Diseño tubería de entrada y salida.....	54
7.4.2 Diseño de la tubería de biogás.....	56
7.4.3 Acoples.....	56
8. Construcción.....	60
8.1 Ensamble.....	63

8.2 Alimentación del sistema.....	64
9. Análisis de resultados .....	64
9.1 Biogás.....	64
9.2 Biol.....	66
9.3 Resultados instrumentación .....	69
9.3.1 Sensores de temperatura.....	69
9.3.2 Sensores de nivel.....	72
9.3.3 Sensor de presión .....	73
10. Presupuesto.....	75
11. Conclusiones .....	76
Bibliografía.....	78
Apéndices .....	81

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Implementación de los sensores en el digestor .....	30
Figura 2. Distribución de los sensores en el digestor .....	31
Figura 3. Distribución tablero de monitoreo .....	31
Figura 4. Lugar de trabajo finca Alsacia .....	32
Figura 5. Rodete de hélice marina de 3 palas.....	33
Figura 6. Rodete de turbina con disco con palas .....	33
Figura 7. Caja gris .....	36
Figura 8. Tanque hermético IBC.....	43
Figura 9. Medidas de un agitador de turbina.....	45
Figura 10. Coeficiente de arrastre para una placa plana .....	47
Figura 11. Número de potencia para turbinas de 6 palas .....	50
Figura 12. Motorreductor 41K30 GN-AF y ficha técnica.....	52
Figura 13. Acople liso con prisioneros.....	54
Figura 14. Filtro de acero inoxidable para biogás .....	56
Figura 15. Diseño técnico del biodigestor.....	58
Figura 16. Ensamblaje acople motorreductor - agitador .....	59
Figura 17. Ensamble de la totalidad del sistema, elaborado en SolidWorks.....	60
Figura 18. Tanque digestor.....	61
Figura 19. Tubería de carga y salida del biol .....	62
Figura 20. Tubería de salida de biogás y salida de residuos .....	62
Figura 21. Acople tanque de carga.....	63

Figura 22. Ensamble total del biodigestor.....	63
Figura 23. Pantalla LCD que muestra los valores de temperatura y nivel.....	64
Figura 24. Resultados muestra de biogás.....	65
Figura 25. Resultados muestra de biol.....	68
Figura 26. Promedio diario de temperaturas durante la carga.....	70
Figura 27. Nivel de vacío en el biodigestor durante la carga.....	72
Figura 28. Presiones registradas durante el proceso de producción.....	74

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Porcentaje detallado de la composición del biogás</i> .....	21
Tabla 2 <i>Tipos de biodigestores, descripción y aplicaciones</i> .....	24
Tabla 3 <i>Composición del gas natural domestico</i> .....	27
Tabla 4 <i>Sensores implementados en el biodigestor</i> .....	30
Tabla 5. Valores de medición matriz QFD .....	34
Tabla 6. Potencial de producción de gas metano según residuo empleado .....	37
Tabla 7. Caracterización de la materia orgánica .....	37
Tabla 8. Constantes a y b para el cálculo del parámetro m empleado en la ecuación 36 .....	51
Tabla 9. Factores de servicio según la naturaleza de la carga y el tiempo de funcionamiento .....	51
Tabla 10. Características de la tubería empleada en el proceso de construcción .....	57
Tabla 11. Promedio diario, tabulación de temperatura .....	69
Tabla 12. Porcentaje de error entre medidas de la termocupla y de Google .....	71
Tabla 13. Tabulación datos de presión .....	73
Tabla 14. Presupuesto elaboración del proyecto .....	75

**Lista de Apéndices**

	<b>pág.</b>
Anexo A. Tabulación de temperaturas y nivel.....	81

### Glosario

**Biodigestor:** Sistema cerrado en el que ocurre la descomposición anaeróbica de la materia orgánica.

**Biogás:** Mezcla de gases generados por la fermentación anaerobia de residuos orgánicos, compuesta por metano y dióxido de carbono.

**Biol:** Subproducto líquido del proceso de biodigestión, rico en nutrientes y empleado como fertilizante orgánico.

**Instrumentar:** Proceso de equipar el biodigestor con sensores y dispositivos de medición para monitorear variables como temperatura, presión y nivel de carga.

**Sólidos totales (ST):** Fracción total de materia presente en una muestra del sustrato, incluyendo sólidos disueltos y suspendidos en el biodigestor.

**Sólidos volátiles (SV):** Porción orgánica de los sólidos totales susceptibles de degradación biológica, directamente relacionada con la producción de biogás.

**Tiempo de retención (TR):** Periodo promedio que el sustrato permanece dentro del digestor antes de ser descargado.

**Velocidad de carga:** Cantidad de material orgánico introducido en el biodigestor por unidad de tiempo. Expresada en (Kg SV/m<sup>3</sup>\*día).

**Volumen de campana:** Espacio destinado a la acumulación de biogás dentro del biodigestor, fundamental para el almacenamiento y regulación de la presión del gas generado.

**Volumen de carga:** Cantidad de sustrato ingresado en el biodigestor en cada ciclo de alimentación.

**Volumen de gasómetro:** Capacidad del sistema de almacenamiento de biogás dentro del biodigestor.

## Resumen

**Título:** Diseño e implementación de un prototipo de un biodigestor instrumentado semicontinuo para la producción de biogás y biol en la finca Alsacia, municipio de Sotaquirá, Boyacá\*

**Autor:** Camilo Alberto López Morcote y Andrés Fernando Romero Hurtado\*\*

**Palabras Clave:** Biodigestor, biogás, biol, digestión anaeróbica, instrumentación, agitador.

**Descripción:** Este proyecto tuvo como objetivo diseñar e implementar un prototipo de biodigestor instrumentado semicontinuo para la producción de biogás y biol, utilizando estiércol animal generado en la finca Alsacia, ubicada en Sotaquirá, Boyacá. La propuesta surge como alternativa energética sostenible frente al uso de leña y carbón, aún común en zonas rurales sin acceso a gas natural, lo cual genera impactos negativos en la salud y el ambiente.

El biodigestor fue construido en un tanque IBC de 1000 litros, con capacidad para procesar 12 kilogramos diarios de estiércol de ganado durante 20 días. Se empleó una relación estiércol-agua 1:1, alcanzando una concentración de metano del 83.62%, adecuada para uso doméstico. Además, se obtuvo biol con propiedades agroecológicas relevantes, incluyendo pH de 6.15 y niveles significativos de nitrógeno, fósforo y potasio, lo que lo hace apto como biofertilizante.

El sistema incorporó sensores de temperatura, nivel y presión que permitieron el monitoreo en tiempo real. Las temperaturas promedio fueron de 18 °C en el interior del tanque y 15 °C en el ambiente; el nivel de biomasa alcanzó los 29 cm y la presión interna fue de 0.09 bares. Estos valores evidencian condiciones óptimas para la digestión anaerobia en climas fríos y subrayan la necesidad de considerar aislamiento térmico para mejorar la eficiencia.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Ingeniería mecánica. Director: Ph.D. Jabid Eduardo Quiroga Méndez.

### Abstract

**Title:** Design and Implementación of a Semi-Continuous Instrumented Biodigester Prototype for Biogas and Biofertilizer Production at Alsacia Farm, Sotaquirá Municipality, Boyacá\*

**Author(s):** Camilo Alberto López Morcote and Andrés Fernando Romero Hurtado<sup>1</sup>

**Key Words:** Biodigester, biogas, biofertilizer, anaerobic digestion, instrumentation, agitador.

**Description:** This project aimed to design and implement a prototype of a semi-continuous instrumented biodigester for the production of biogas and biol, using animal manure generated on the Alsacia farm, located in Sotaquirá, Boyacá. The proposal arises as a sustainable energy alternative to the use of firewood and charcoal, still common in rural areas without access to natural gas, which generates negative impacts on health and the environment. The biodigester was built in a 1000-liter IBC tank, with the capacity to process 12 kilograms of cattle manure per day for 20 days. A 1:1 manure-to-water ratio was used, reaching a methane concentration of 83.62%, suitable for domestic use. In addition, biol with relevant agroecological properties was obtained, including pH of 6.15 and significant levels of nitrogen, phosphorus and potassium, which makes it suitable as a biofertilizer. The system incorporated temperature, level, and pressure sensors that allowed for real-time monitoring. The average temperatures were 18 °C inside the tank and 15 °C in the environment; The biomass level reached 29 cm and the internal pressure was 0.09 bar. These values show optimal conditions for anaerobic digestion in cold climates and underline the need to consider thermal insulation to improve efficiency.

---

\* Degree Work

<sup>1</sup>Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Mechanical Engineering. Director: Ph. D. Jabid Eduardo Quiroga Méndez.

## Introducción

El acceso a fuentes de energía seguras y sostenibles es un desafío en muchas zonas rurales de Colombia, donde la falta de infraestructura limita el suministro de gas natural, obligando a las familias a recurrir a combustibles tradicionales como la leña y el carbón. Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el uso de estos combustibles ocasiona aproximadamente 1.000 muertes al año debido a enfermedades respiratorias y contribuye significativamente a la deforestación y la contaminación ambiental. En el municipio de Sotaquirá, Boyacá, donde el 90.4% de la población reside en zonas rurales, la finca Alsacia enfrenta estas problemáticas, dependiendo de la leña y el carbón para la cocción de alimentos. Ante este panorama, surge la necesidad de desarrollar soluciones sostenibles que permitan mejorar la calidad de vida de estas comunidades.

Diversas investigaciones han explorado el potencial del biogás como alternativa energética renovable. Guerra Acosta y Páez Malquin (2022) diseñaron un biodigestor para producir biogás a partir de residuos orgánicos, obteniendo un 21.11% de metano, inferior al 60% teórico debido a la presencia de oxígeno y nitrógeno. Por otro lado, Gómez Matajira (2020) demostró que la biomasa proveniente de animales de compañía no es una opción eficiente debido a su alto contenido de CO<sub>2</sub>. Estos antecedentes resaltan la importancia de seleccionar adecuadamente la materia prima y los materiales de construcción para maximizar la eficiencia del proceso.

El presente estudio tiene como objetivo diseñar e implementar un prototipo de biodigestor instrumentado semicontinuo para la producción de biogás y biol a partir del estiércol animal generado en la finca Alsacia. Para ello, se plantea un sistema capaz de procesar 12 kg diarios de estiércol durante 21 días, asegurando una generación continua de biogás para su uso doméstico y de biol como fertilizante orgánico.

La fundamentación de este proyecto radica en la necesidad de reducir el impacto ambiental derivado del manejo inadecuado del estiércol, el cual libera gases de efecto invernadero y puede contaminar fuentes hídricas. Según Koopmans (2002) y Smith (2006), la biomasa es una fuente de energía ampliamente utilizada en países en vía de desarrollo, pero su combustión ineficiente genera emisiones nocivas para la salud humana. La digestión anaerobia, en cambio, permite la transformación de la materia orgánica en biogás sin generar contaminantes sólidos o gaseosos adicionales (Varnero, 2011).

El biodigestor propuesto emplea sensores para el monitoreo de temperatura, presión y nivel de biomasa en el tanque de almacenamiento, permitiendo ajustes en tiempo real para mejorar el proceso. La recolección de datos se realizó mediante sensores y muestreo manual, con comparaciones a proyectos previos y mediciones manuales para validar los resultados obtenidos.

Este estudio no solo ofrece una solución energética sostenible para la finca Alsacia, sino que también aporta conocimiento aplicable a comunidades rurales con problemáticas similares. La implementación de un biodigestor instrumentado no solo mejora la eficiencia en la producción de biogás, sino que también permite un control preciso del proceso, facilitando su adopción y replicabilidad en otras regiones. En este sentido, el proyecto busca demostrar la viabilidad de esta tecnología como una alternativa sostenible para la generación de energía en el ámbito rural.

## 1. Planteamiento

### 1.1 Planteamiento del problema

En Colombia, el 60.7% de la población tiene acceso al gas natural para cocinar, mientras que el restante 20.6% utiliza gas licuado (GLP) y el 10.5% aún depende de la leña y el carbón. Este último grupo está conformado mayormente por familias en zonas rurales que carecen de acceso al gas natural debido a la falta de infraestructura para su transporte, así como a condiciones adversas de vías, factores climatológicos y cuestiones de orden público. Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el uso de leña como combustible doméstico ocasiona aproximadamente 1000 muertes al año y contribuye significativamente a la contaminación ambiental. Este método de cocción también conlleva a una gestión ineficiente de los biorresiduos, incluyendo restos de origen animal y vegetal como cáscaras de huevo, hojas secas, restos de frutas y verduras, entre otros. Según las estadísticas del DANE de 2023, el municipio de Sotaquirá, Boyacá, alberga a una población de 8,710 habitantes, de los cuales 7,874 personas (90.4%) residen en áreas rurales. En particular, la finca Alsacia, situada en la vereda Catoba, carece del servicio de gas natural y en su lugar, depende de la leña y el carbón como principales fuentes de cocción. En este contexto, la vivienda genera una cantidad significativa de estiércol animal, lo cual conlleva a la implementación de un biodigestor instrumentado que produzca biogás, biol y permita a los residentes monitorear de manera más eficaz los niveles de presión, temperatura y nivel en el tanque de almacenamiento de la biomasa, mejorando así la calidad de vida de las personas en la vivienda. Por lo tanto, la pregunta de investigación que orienta el desarrollo de este proyecto es: ¿La implementación del biodigestor instrumentado supera las expectativas de proyectos existentes y

garantiza un suministro suficiente de biogás en la vivienda a partir del estiércol animal generado en la finca?

## **1.2 Justificación**

Los desafíos ambientales y energéticos actuales conllevan a la búsqueda de soluciones sostenibles y eficientes que permitan obtener beneficios partiendo de materias primas renovables o de fácil obtención sin degradar más el medio ambiente, es por ello que en la finca Alsacia, la acumulación de estiércol animal representa no solo un problema de manejo de residuos, sino también una oportunidad para aprovechar recursos renovables.

Este prototipo de biodigestor instrumentado semicontinuo ofrece una solución innovadora y sostenible gracias a la capacidad de procesar 12 kilogramos diarios acumulativos de estiércol de ganado lechero por un periodo de 3 semanas, permitiendo así reducir el impacto ambiental producido por el estiércol de estos animales aprovechando el potencial energético para producir biogás de uso doméstico y biol para uso agrícola.

Al ser un biodigestor instrumentado se utilizan diferentes tipos de sensores. Éstos serán responsables de recopilar datos en tiempo real sobre la presión interna, la temperatura externa y del proceso de digestión anaerobia, así como el nivel de la biomasa dentro del sistema. Estos datos permitirán realizar ajustes y correcciones en caso de no tener las condiciones correctas.

En conclusión, la implementación de este prototipo responde a la necesidad de abordar problemas ambientales, agrícolas y energéticos en la finca Alsacia, permitiendo la producción de biogás destinado a las necesidades de la cocina; a su vez en fincas aledañas y comunidades rurales que se encuentren en situaciones similares.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Diseñar e implementar un prototipo de biodigestor instrumentado semicontinuo para la producción de biogás y biol a partir de estiércol animal producido en la finca Alsacia.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Diseñar un biodigestor instrumentado semicontinuo para el tratamiento acumulativo de 12 kilogramos diarios de estiércol animal durante 3 semanas, con el fin de producir biogás y biol continuamente, considerando las condiciones climatológicas de la zona.

Implementar un sistema que facilite la verificación y monitoreo de la temperatura, la presión y el nivel de biomasa que se encuentra en el tanque de almacenamiento con el fin de hacer un uso adecuado del biodigestor conduciendo a mejores resultados y facilitando su manejo.

Determinar la operación de desempeño del biodigestor a través de una cromatografía de gases, obteniendo información sobre la eficiencia del proceso, los componentes y la calidad en los productos generados.

### 3. Marco teórico

La biomasa es muy utilizada como fuente de energía en los países en vía de desarrollo (Koopmans, 2002). En diversos hogares, la leña, el carbón vegetal y otros combustibles sólidos, principalmente residuos agrícolas y carbón, se queman a menudo en fogones abiertos o estufas que no funcionan correctamente. La combustión incompleta libera pequeñas partículas de otros componentes que resultan nocivas para la salud de las personas. Sin embargo, no se puede determinar con exactitud las diferencias de los efectos en la salud humana según el tipo de biomasa utilizada (Smith, 2006).

En este contexto, la biomasa se presenta como una fuente de energía renovable que se fundamenta en la utilización de materia orgánica. Este concepto abarca no solo la materia orgánica de origen vegetal o animal, sino también los residuos orgánicos como las aguas residuales y los lodos de depuradora. (Fernández, 2003). A su vez involucra biorresiduos y excrementos de origen animal.

El estiércol generado en la ganadería provoca impactos ambientales negativos si no existe un uso adecuado, debido a la emisión de gases efecto invernadero a la atmósfera, y a la acumulación de micro y macro nutrientes en el suelo y en cuerpos hídricos (Pinos, 2012). Este tipo de residuos orgánicos pueden ser utilizados como materia prima para su posterior tratamiento y aprovechamiento para extraer energía (Sogari, Reuss y Busso, 2000).

Del procesamiento de esta materia orgánica se obtienen dos productos finales, el biogás y el biol, para esto se hace uso de un biodigestor. Un biodigestor es un dispositivo tipo tanque donde se almacena la biomasa a tratar, es mezclada con agua y al descomponerse genera el biogás (Cortéz, 2019). Al hacer esa mezcla se recomienda diluir lo mejor posible el estiércol en el agua y manejar una relación 1:2 o 1:3. Para el tratamiento de esta biomasa existen dos tipos de digestión,

la digestión aerobia y la anaerobia. La digestión anaerobia es un proceso biológico y degradativo en el cual la materia orgánica es convertida en biogás en ausencia de oxígeno (Varnero, 2011).

En un biodigestor semicontinuo la materia orgánica es continuamente adicionada para almacenarla gradualmente en el tanque, teniendo disponibilidad de biogás constantemente. El estiércol permanecerá el tiempo que sea necesario, pero debe retirarse el gas cada cierto tiempo, permitiendo alimentar pequeñas estufas y calentadores (Espinoza, 2020).

Para la instrumentación del biodigestor se utilizan diferentes tipos de sensores y aparatos que permitan el monitoreo constante de la temperatura, la presión y el nivel de biomasa en el tanque de almacenamiento, esto para llevar un estudio detallado de cada una de estas variables y su comportamiento a lo largo del estudio.

La temperatura es la variable que más impacta en el biodigestor, pues su valor incide en la producción de biogás. Se debe realizar una elección según el tipo de requerimientos (Gómez & Hernández, 2010). Se pueden utilizar diferentes tipos de sensores: termopar (termocupla tipo J, hierro-constantán), el circuito integrado LM35 y termistores NTC y PTC (Rodríguez, Ocampo y Ortega, 2007).

Es importante tener en cuenta que al ser un biodigestor tipo semicontinuo la cantidad de biomasa mezclada con agua va a ir variando todos los días de acuerdo a lo que se deposite, por ello se debe controlar el nivel de biomasa utilizando un tipo de sensor de flotador, un sensor de nivel radar o un sensor de boya, entre otros; esto va a depender de la necesidad. En general la proporción correcta que se debe tener en el tanque corresponde a un 75% de biomasa y un 25% de biogás; con el paso del tiempo la cantidad de gas y por ende la presión dentro del biodigestor va incrementando, se puede hacer la medición de la presión con ayuda de un transmisor de presión, un medidor de tensión o un tipo de sensor de presión, entre otros. (Gómez & Hernández, 2010).

### 3.1 Biogás

#### 3.1.1 Definición de biogás

Gas inflamable producto de la descomposición anaeróbica de materia orgánica como residuos agrícolas, estiércol animal y residuos alimenticios, que contiene gas metano, dióxido de carbono, hidrógeno sulfúrico y amoniaco, empleado para cocinar, calentar espacios o generar electricidad.

#### 3.1.2 Características fisicoquímicas

Según la tabla 1, el biogás está constituido principalmente por metano, dióxido de carbono y otros gases entre los que se resaltan el hidrogeno, nitrógeno, sulfuro de hidrogeno y vapor de agua.

Referente a las propiedades fisicoquímicas se presenta un poder calorífico que permite la buena generación de energía, una densidad similar a la del agua, una alta temperatura de ignición lo cual reduce el riesgo de que el digester haga combustión de manera accidental.

**Tabla 1**

*Porcentaje detallado de la composición del biogás*

Propiedad	Valor	Descripción
Composición de Metano (CH <sub>4</sub> )	50% - 75%	Principal componente energético del biogás.
Composición de Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	25% - 45%	Gas no combustible que reduce el poder calorífico del biogás.
Vapor de Agua (H <sub>2</sub> O)	2% - 7%	Humedad presente en el biogás.
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	<2%	Puede estar presente por contaminación durante la digestión.
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	<2%	Gas inerte en pequeñas cantidades.
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	<1%	Gas combustible en trazas.

Sulfuro de Hidrógeno (H <sub>2</sub> S)	0.01% - 0.4%	Gas corrosivo y tóxico, responsable del olor a huevo podrido.
Poder Calorífico	6.0 – 6.5 kWh/m <sup>3</sup>	Energía disponible por metro cúbico de biogás.
Temperatura de Ignición	650 – 750 °C	Temperatura a la cual el biogás se enciende.
Densidad	~1.2 kg/m <sup>3</sup>	Densidad del biogás a condiciones normales.
Olor	Huevo podrido	Olor característico debido al H <sub>2</sub> S; el biogás desulfurado es inodoro.
Presión Crítica	74 – 88 atm	Presión en la que el biogás se comporta como líquido.
Temperatura Crítica	-82.5 °C	Temperatura a la que el biogás se comporta como líquido.

Nota. Wikipedia. (2024). *Biogás - Biometano*. Wikipedia, La Enciclopedia Libre.

### 3.1.3 Digestión anaeróbica

Es un proceso bioquímico en el cual los microorganismos descomponen materia en ausencia de oxígeno, empleado principalmente en el tratamiento de residuos orgánicos y la producción de biogás como energía renovable. Tiene 4 etapas de desarrollo las cuales son:

**3.1.3.1 Hidrólisis** En esta fase las enzimas descomponen lípidos, polisacáridos y proteínas en compuestos simples como azúcares y aminoácidos, accediendo así a la energía potencial de la materia orgánica.

**3.1.3.2 Acidogénesis** Los productos de la hidrólisis son transformados en ácidos grasos volátiles, hidrogeno y dióxido de carbono, acidificando así el medio.

**3.1.3.3 Acetogénesis** En esta fase los ácidos grasos se transforman en acetato, hidrogeno y dióxido de carbono por bacterias acetogénicas, produciendo así compuestos empleados en la metanogénesis.

**3.1.3.4 Metanogénesis** Convierte el acetato y el hidrogeno en metano y dióxido de carbono, logrando así la producción del biogás que será empleado como fuente de energía.

### **3.1.4 Usos del biogás**

**3.1.4.1 Generación de energía eléctrica** El biogás se puede utilizar para generar electricidad en plantas de cogeneración. Por cada metro cúbico de biogás, se pueden producir aproximadamente 2,4 kWh de energía eléctrica<sup>2</sup>.

**3.1.4.2 Calefacción** Puede ser utilizado para calentar espacios y agua, funcionando de manera similar al gas natural en calderas y sistemas de calefacción<sup>3</sup>.

**3.1.4.3 Combustible para transporte** El biogás puede ser utilizado como combustible para vehículos, incluyendo autobuses urbanos, contribuyendo a la movilidad sostenible<sup>4</sup>.

## **3.2 Biol**

### **3.2.1 Definición de biol**

Es un biofertilizante líquido que consiste en un líquido rico en nutrientes y microorganismos beneficiosos para el suelo, su obtención se da luego de la separación del biogás y contiene nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, ácidos y enzimas.

### **3.2.2 Forma de aplicación**

El biol se puede aplicar de forma foliar, de manera directa sobre las hojas de las plantas mediante aspersores, mejorando así el crecimiento y desarrollo de las mismas, puede ser aplicado

---

<sup>2</sup> Biogás Metano Latam. (s.f.). Beneficios del uso de biogás en las industrias. Recuperado el 10 de febrero de 2025, de <https://biogasmetano-latam.com/beneficios-del-uso-de-biogas-en-las-industrias/>

<sup>3</sup> Ecología Verde. (s.f.). ¿Qué es el biogás y sus usos? Recuperado el 10 de febrero de 2025, de <https://www.ecologiaverde.com/que-es-el-biogas-y-sus-usos-1568.html>

<sup>4</sup> Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (s.f.). Biogás. Recuperado el 10 de febrero de 2025, de <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/biogas>

directamente en el suelo, mejorando así la estructura de este, aumentando el contenido de materia orgánica.

### 3.3 Biodigestores

#### 3.3.1 Definición de biodigestor

Es un sistema biológico diseñado para descomponer materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendo biogás y biofertilizante (biol), contribuyendo a la reducción de gases de efecto invernadero y generación de energías limpias.

#### 3.3.2 Tipos de biodigestores

**Tabla 2**

*Tipos de biodigestores, descripción y aplicaciones*

Tipo de Biodigestor	Descripción	Aplicaciones Comunes
<b>Biodigestor de Flujo Continuo</b>	Funciona con una alimentación constante de materia orgánica, ideal para residuos líquidos como aguas residuales.	Tratamiento de aguas residuales y purines.
<b>Biodigestor de Flujo Discontinuo</b>	Se carga y descarga por lotes, permitiendo un control más fácil y es adecuado para residuos sólidos.	Restos de cosechas, residuos de cocina.
<b>Biodigestor Semicontinuo</b>	Se alimenta periódicamente con pequeñas cantidades de residuos; combina características de los dos anteriores.	Purificación de agua contaminada.
<b>Biodigestor de Tipo Fijo</b>	Utiliza sustratos sólidos (paja, estiércol) en un recipiente fijo; económico y fácil de construir.	Zonas rurales, aprovechamiento de residuos agrícolas.
<b>Biodigestor Tubular o Salchicha</b>	Diseño simple y flexible, adecuado para pequeñas comunidades; fácil de instalar y mantener.	Proyectos familiares y comunitarios.

Nota. Biogasmetano Latam. (2024). Tipos de biodigestores.

### 3.4 Antecedentes

Diseño y construcción de un biodigestor doméstico para producir biogás, Skarlet Alejandra Guerra Acosta, Israel David Páez Malquin (2022), diseñar y construir un biodigestor para producir

biogás, en el desarrollo de este proyecto se lograron emplear residuos orgánicos que permitieron la producción de biogás con un 21.11% de metano siendo menor al resultado esperado de manera teórica que correspondía al 60%, esto debido a una alta presencia de oxígeno y nitrógeno, el biol que se produjo mejora la calidad de las cosechas gracias a la alta concentración de macronutrientes, de esta forma el diseño de este biodigestor aporta al proyecto la forma de emplear los materiales y la materia prima para lograr resultados similares y que ayuden a una disminución de costos.

Diseño y construcción de un biodigestor para la obtención de fertilizante y biogás a partir de materia fecal de animales de compañía, Sergio Andrés Gómez Matajira (2020), diseñar y construir un biodigestor para la producción de fertilizante con el objeto de brindar a la comunidad agricultora un producto natural y sin aditivos químicos que degradan el sustrato, paralelamente a esto producir gas metano mediante la explotación del potencial energético del biogás, a partir del aprovechamiento del estiércol de animales de compañía, con lo que se logró establecer que la biomasa de estos animales no es buena alternativa, debido a que produce alto CO<sub>2</sub> y bajas cantidades de gas metano a pequeña escala, el biol que se produjo no es altamente efectivo como fertilizante, lo que aporta al proyecto actual en la toma de decisiones acerca de la materia prima a emplear, así como los materiales a utilizar en la construcción, debido a que los que se emplearon en este si soportaron las condiciones de operación.

## **4. Metodología**

### **4.1 Diseño del sistema**

Para esta primera etapa del proyecto se consultó sobre los tipos de biodigestores, la capacidad de almacenamiento del tanque digestor, diámetros, ángulos de inclinación y longitudes de tubería, tipos de válvulas, tipos de agitadores y sensores. Posterior a ello se realizaron los

cálculos correspondientes con ayuda de las fórmulas y ecuaciones consultadas en la literatura para el diseño y selección de los elementos ya mencionados. Se hizo el diseño y se seleccionó un tanque de 1.000 L. Se diseñó el agitador, el acople y se seleccionó el motorreductor.

#### **4.2 Construcción del prototipo**

Se realizó la construcción física del sistema y se implementaron los sensores de temperatura, de nivel y presión. Se hizo una modificación al tanque con la apertura de orificios para el acople de 4 tuberías (tubería de carga, descarga, salida de biol y salida de biogás) además, se emplearon acoples herméticos para evitar el ingreso de oxígeno al interior del tanque, añadiendo silicona en las uniones entre tanque y tubería. Adicionalmente se incorporó el sistema de agitación (motorreductor y agitador) el cual fue apoyado sobre la tapa superior del tanque.

#### **4.3 Instrumentación del sistema**

En la tercera fase, correspondiente a la instrumentación del sistema, se utilizaron los sensores descritos previamente en la sección 5.3. Se desarrolló el código de programación en Arduino para la lectura y visualización de los datos, y posteriormente se realizó la instalación y adecuación física de cada sensor dentro del sistema. Se verificó el correcto funcionamiento mediante pruebas de lectura y se puso en marcha el monitoreo continuo, permitiendo la recopilación de datos necesarios para el análisis final.

#### **4.4 Operación experimental**

La operación consistió en alimentar el biodigestor con 12 kg diarios de estiércol y 12 litros de agua obedeciendo la relación 1:1 mencionada. Se llevaron a cabo las siguientes acciones; el monitoreo de la temperatura, nivel y presión en 4 momentos del día (9:00 am, 12:00 m, 4:00 pm y 9:00 pm) tal como se evidencia en el anexo A, todos estos datos se recopilaron en una tabla de datos de Excel. Pasados 30 días se extrajo la muestra de biogás en una bolsa de suero fisiológico

mediante la conexión del equipo venoclisis (manguera de suero) a la tubería de salida del biogás y la muestra de biol se recolectó en una botella plástica de 500 ml.

#### 4.5 Análisis de datos

Se calculó el promedio de las temperaturas tabuladas en la operación experimental y se halló el porcentaje de error entre estas medidas y la temperatura suministrada por internet, así mismo se realizó el respectivo gráfico. Por otra parte, a el nivel y la presión se les realizó su respectivo grafico para poder analizar sus comportamientos. Se enviaron y obtuvieron los resultados de laboratorio de las muestras, las cuales se compararon con los valores reportados en la tabla 3 permitiendo determinar la calidad del biogás y el biol generado.

**Tabla 3**

*Composición del gas natural domestico*

Elemento	Porcentaje	Fórmula
Metano	95%	CH <sub>4</sub>
Etano	2%	CH <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
Dióxido de carbono	0-8%	CO <sub>2</sub>
Oxígeno	0-0,2%	O <sub>2</sub>
Nitrógeno	0-5%	N <sub>2</sub>
Sulfato de hidrógeno	0-5%	H <sub>2</sub> S
Otros gases	A, He, Ne, Xe	trazas

Nota. Preciogas. (s.f.). *Composición del gas natural*. <https://preciogas.com/instalaciones/gas-natural/composicion>

## **5. Instrumentación**

### **5.1 Definición de instrumentación**

Es el proceso de implementación de herramientas y técnicas que permiten medir, controlar y regular variables físicas y/o químicas en procesos productivos, en donde se incluyen sensores y transductores que ayudan a la mejorar el rendimiento y la seguridad de los diferentes procesos industriales.

### **5.2 Descripción procedimiento**

En este proyecto la instrumentación cumple con una parte importante debido a que es fundamental conocer diferentes variables como es el caso de la temperatura la cual se debe establecer en un rango específico para maximizar la actividad microbiana, así como la presión debe ser monitoreada para evitar acumulaciones del gas dentro del tanque que puedan resultar peligrosas, por último, el nivel ya que se evita una posible sobrecarga o derrame de mezcla.

El sistema de instrumentación incluye sensores que captan las magnitudes en tiempo real, un controlador (Arduino) que en este caso se encarga de dar señal de alerta mediante el encendido de un led en caso de que alguna variable este fuera de los límites, para así dar solución de forma manual.

### **5.3 Criterios de selección de sensores**

La selección de los sensores se basó en criterios técnicos, disponibilidad local y facilidad de integración. A continuación, se describen los sensores seleccionados y los criterios para cada variable medida.

### ***5.3.1 Sensor de temperatura: Termocupla tipo K con MAX6675.***

**Rango de operación:** La termocupla tipo K tiene la capacidad de medir temperaturas en un rango desde -200 °C hasta 1250 °C, lo que la hace ideal para aplicaciones como el biodigestor, además que el lugar donde se implemento es un clima frio que en las noches alcanza temperaturas bajas.

**Precisión:** Este sensor tiene una precisión de  $\pm 2$  °C, adecuada para monitorear la actividad microbiana.

**Interfaz digital:** El MAX6675 convierte las señales analógicas de la termocupla en datos digitales, simplificando la conexión con Arduino.

**Disponibilidad y costo:** Es un sensor económico y fácil de encontrar en el comercio local.

### ***5.3.2 Sensor de nivel: HSRS04 (Ultrasónico sin contacto)***

**Rango de operación:** El sensor es capaz de detectar niveles que van desde los 2 cm hasta 4 m, lo que es suficiente teniendo en cuenta que el tanque tiene una profundidad de 1 m aproximadamente.

**Precisión:** Tiene una precisión de  $\pm 3$  mm, lo que da una confiabilidad al nivel.

**Resistencia:** Adecuado para ambientes corrosivos y húmedos.

**Disponibilidad y costo:** sensor económico y fácil de conseguir, además tiene una buena relación costo beneficio.

### ***5.3.3 Monitoreo de presión: Manómetro.***

**Disponibilidad:** Ante la falta de sensores de presión digitales en el comercio local, se optó por un manómetro analógico, accesible y de bajo costo.

**Lectura visual:** Ofrece una medición directa de la presión del gas almacenado y aunque no se integra a un sistema automatizado, cumple con los requerimientos de seguridad y monitoreo establecidos.

**Robustez:** Su diseño analógico lo hace resistente a condiciones ambientales adversas y confiable para un uso prolongado en sistemas de biogás.

En la tabla 4 se evidencia los sensores adquiridos.

**Tabla 4**

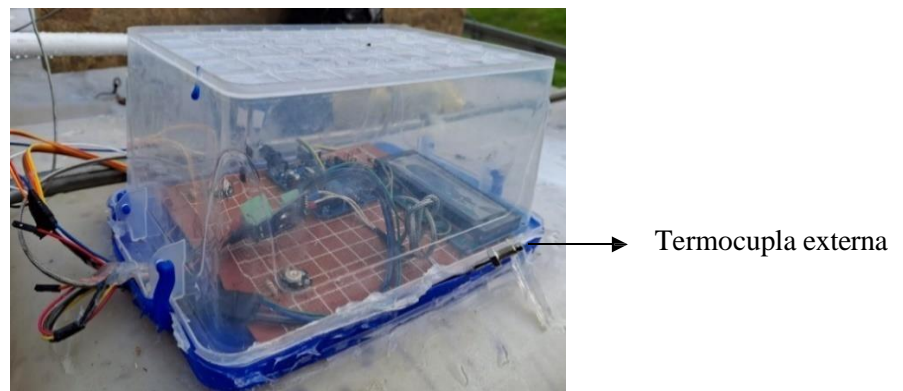
*Sensores implementados en el biodigestor*

Sensor de Temperatura. Termocupla tipo K con MAX 6675	Sensor de Nivel HSRS04	Manómetro analógico
		

Nota. Fuente: Elaboración propia

**Figura 1.**

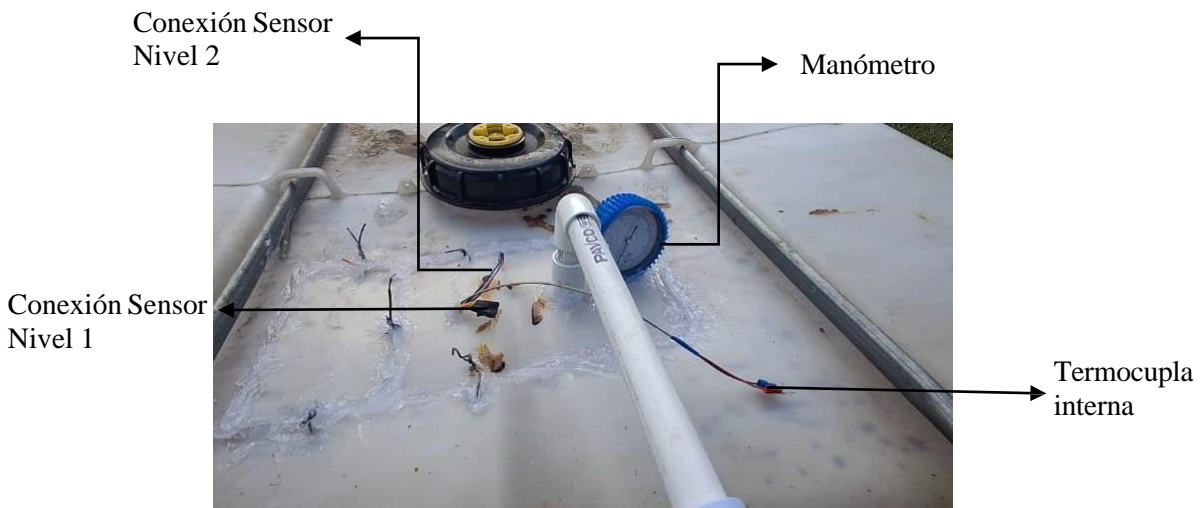
Implementación de los sensores en el digestor



Nota. Fuente: Elaboración propia

**Figura 2.**

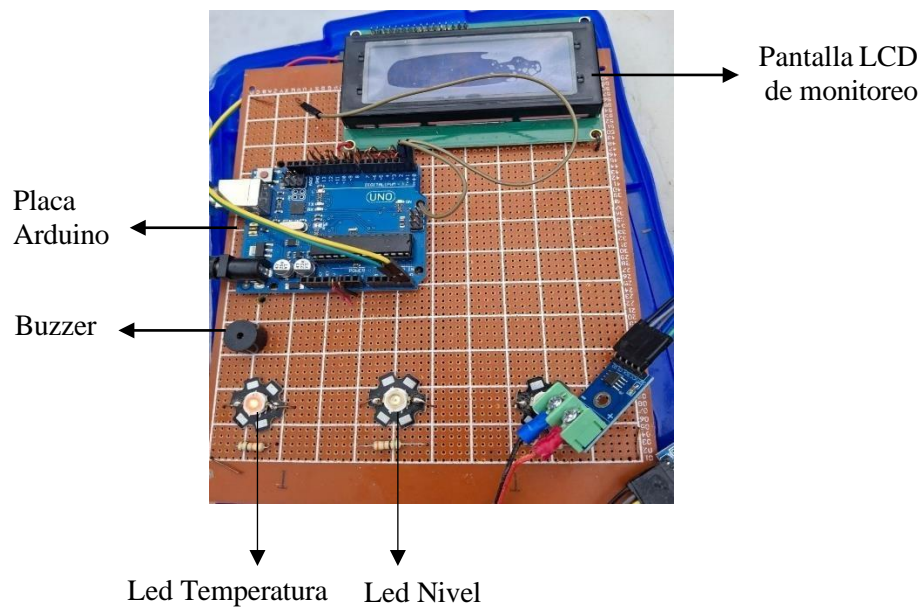
Distribución de los sensores en el digestor



Nota. Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.**

Distribución tablero de monitoreo



Nota. Fuente: Elaboración propia

## 6. Justificación a la solución

### 6.1 Características climáticas de Sotaquirá, Boyacá

Este proyecto fue construido y puesto en marcha en el municipio de Sotaquirá, Boyacá, más exactamente en la vereda Catoba, en la finca Alsacia, figura 4, en donde la temperatura promedio anual es de 14°C<sup>5</sup> y a una altura de 2860 m.s.n.m.

#### Figura 4.

Lugar de trabajo finca Alsacia



Nota. Fuente: Elaboración propia

### 6.2 Planteamiento de alternativas

#### 6.2.1 Alternativas rodete agitador

**6.2.1.1 Rodete de hélice marina de tres palas.** Este rodete, figura 5, permite mantener mezclas homogéneas de baja viscosidad, gracias a las altas velocidades que puede alcanzar entre los 400 y 1750 rpm. Posee una geometría la cual permite una mayor área de contacto, con la que

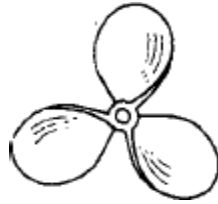
---

<sup>5</sup>Largo León, A. F., & Gómez Pachón, E. Y. (s.f.). Sotaquirá: Conocimiento, diseño e innovación para el desarrollo de la agricultura y la industria alimenticia. En Gestión del conocimiento y la innovación para el desarrollo local: experiencias y resultados en 7 municipios (pp. 133-135). Recuperado el 10 de febrero de 2025, de <https://repositorio.uptc.edu.co/server/api/core/bitstreams/864a7955-32bb-4a07-89e9-9f31784eba49/content>

se logra mantener un flujo turbulento con el cual las partículas en suspensión se distribuyan uniformemente en el agua.

**Figura 5.**

Rodete de hélice marina de 3 palas

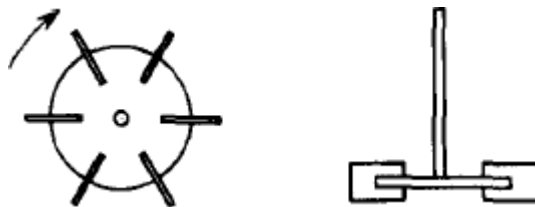


Nota. Tomado de Operaciones Unitarias en Ingeniería Química (6.<sup>a</sup> ed., p. 245), por W. L. McCabe, J. C. Smith y P. Harriott, 1991, McGraw-Hill.

**6.2.1.2 Rodete de turbina con disco con palas.** Se combina un disco de diámetro específico con un número determinado de palas las cuales pueden ser rectas o tener un cierto ángulo de inclinación el cual permite que el fluido tenga una variación de altura y la mezcla sea más homogénea con un flujo radial, su velocidad de operación oscila entre los 20 y los 150 rpm.

**Figura 6.**

Rodete de turbina con disco con palas



Nota. Tomado de Operaciones Unitarias en Ingeniería Química (6.<sup>a</sup> ed., p. 245), por W. L. McCabe, J. C. Smith y P. Harriott, 1991, McGraw-Hill.

## 6.3 Función de calidad

### 6.3.1 Requerimientos de diseño

Para el proyecto se tuvieron en cuenta factores suministrados por personas que están interesadas en adquirir un biodigestor, y dentro de los parámetros a tener en cuenta se tienen los siguientes:

Eficiencia, almacenamiento, seguridad, mantenibilidad, confiabilidad, adecuado sistema eléctrico, facilidad de operación, facilidad de instalación y transporte, costos.

Para la calificación de la matriz QFD se tienen diferentes puntajes de acuerdo a la relación que tienen los requerimientos del cliente con los requerimientos ingenieriles. Los puntajes a tener en cuenta se evidencian en la tabla 6.

#### Tabla 5.

Valores de medición matriz QFD

9	→	Alto
3	→	Medio
1	→	Bajo
0	→	Nulo

Nota. Fuente: Elaboración propia.

## 6.4 Diseño elegido

Ejecutando el análisis correspondiente, se logra establecer que la alternativa que cumple con los requerimientos tanto de la ingeniería como del cliente es aquella que contiene un sistema de alimentación manual, que permite efectuar la mezcla de agua y estiércol previo a ser vertida en el reactor, lo cual facilita a los operadores controlar el flujo que ingresa al sistema, para el sensor de temperatura se optará por una termocupla tipo K debido a que tiene la capacidad de tomar

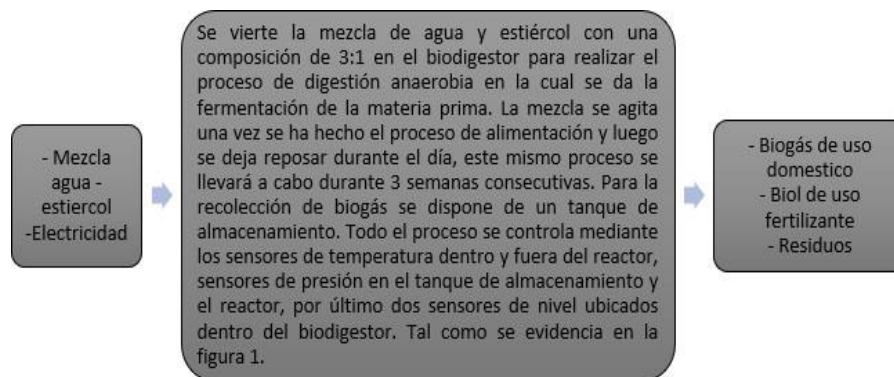
temperaturas desde los 0°C hasta los 1023 °C con un rango de tolerancia de +/- 1.5 °C, este tipo de sensor es resistente a ambientes corrosivos por lo que puede ser utilizado en ambientes húmedos. Para llevar el control de la presión se emplea un manómetro análogo que se adapta a la medición de la presión en la tubería PVC debido a su alta sensibilidad así se presente en niveles muy bajos; para la medición del nivel en el biodigestor y con la necesidad de evitar contacto del sensor con la biomasa, se optó por implementar el sensor ultrasónico sin contacto, esta elección se hizo con el fin de prolongar la vida útil del sensor y garantizar que la recopilación de datos no se vea afectada. Seguido a esto el tipo de válvula al que se recurrió fue al tipo bola, gracias a que proporcionan un sellado hermético en el sistema, además con este tipo de válvulas se da apertura exacta que se desea, permitiendo un control preciso del flujo tanto de la biomasa como del biogás. También se escogió un tipo de motor universal, por la facilidad de instalación y operación al ser un motor eléctrico, al hacer el diseño del biodigestor se hará la elección más detallada y apropiada de dicho motor que cumpla las condiciones establecidas, éste a su vez va conectado con su respectivo agitador Cross beam que facilita la mezcla continua de la biomasa en el tanque. Por último, con base a los criterios de selección y a los cálculos realizados de volumen y presión, se realizó la selección de un tanque en polietileno que cumpla con estos criterios.

## 7. Diseño del sistema

### 7.1 Diseño conceptual

#### Figura 7.

Caja gris



Nota. Fuente: Elaboración propia

### 7.2 Dimensionamiento del sistema

La materia orgánica a utilizar es el estiércol de vaca, se dispone de 12 kg diarios durante 21 días acumulativos.

#### 7.2.1 Potencial de producción de gas metano.

El potencial de producción, es aquel volumen de metano producido por más de sólidos volátiles en [  $m^3 * CH_4/Kg$  SV]. En la tabla 6 se presentan los valores referenciales en la producción de metano<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> SANTIAGO SÁNCHEZ MIÑO; Energías Renovables; Conceptos y Aplicaciones; Fundación Natura; Quito, Junio; 2003

**Tabla 6.**

Potencial de producción de gas metano según residuo empleado

RESIDUO ORGÁNICO	$P_{CH_4}$ [ $m^3CH_4 / Kg SV$ ]
Vaca	0.2
Res	0.35
Cerdo	0.45
Gallina	0.39
Aguas negras	0.406

Nota. Fuente: Elaboración propia

### Solidos totales (ST).

Corresponde a la materia orgánica seca, libre de humedad. Los valores promedio se muestran en la tabla 7.

### Solidos volátiles (SV).

Parte de la materia orgánica que se puede transformar en biogás. Los valores promedio de solidos volátiles se muestran en la tabla 7.

**Tabla 7.**

Caracterización de la materia orgánica

N°	WA	E	ST	SV	Np	Pp	Kp	ST/T	SV/ST
1	Vaca	86	12	10	0.45	0.094	0.29	14%	83%
2	Toro	58	8.5	7.2	0.34	0.092	0.21	15%	85%
3	Becerro	62	5.2	2.3	0.27	0.066	0.28	8%	44%
4	Cerdo	84	11	8.5	0.52	0.18	0.29	13%	77%
5	Oveja	40	11	9.2	0.42	0.087	0.32	28%	84%
6	Chivo	41	13	--	0.45	0.11	0.31	32%	0%
7	Caballo	51	15	10	0.3	0.071	0.25	29%	67%
8	Gallina	85	22	17	0.84	0.3	0.3	26%	77%
9	Roedor	64	16	12	1.1	0.3	0.4	25%	75%
10	Pavo	47	12	9.1	0.62	0.23	0.24	26%	76%
11	Pato	110	31	19	1.5	0.54	0.71	28%	61%

Nota. Fuente: ASAE Standard D384.1 DEC93; American Society of Agricultural Engineers.

**Donde:**

WA = Peso promedio de cada animal (Kg).

T = Cantidad total de estiércol promedio (Kg), por cada 1000 Kg de peso del animal.

ST = Contenido promedio de sólidos totales en Kg, por cada 1000 Kg de peso del animal.

SV = Contenido promedio de sólidos volátiles en Kg, por cada 1000 Kg de peso del animal.

Np = Contenido promedio de nitrógeno en gramos por Kg de sustancia.

Pp = Contenido promedio de fósforo en gramos por Kg de sustancia.

Kp = Contenido promedio de potasio en gramos por Kg de sustancia.

ST/T = Porcentaje de ST sobre el total de estiércol.

SV/ST = Porcentaje de sólidos volátiles sobre sólidos totales.

**7.2.2 Volumen de gas metano producido.**

Es el volumen producido a partir de la degradación de la biomasa introducida al digestor, teniendo en cuenta variables como la temperatura y el tiempo de retención (RT), a continuación, se muestran las expresiones a emplear<sup>7</sup>:

Volumen de gas metano producido

$$V_{CH_4} = P_{CH_4} * SV * \left(1 - \frac{K_o}{U_o * TR - 1 + K_o}\right) [m^3 * \frac{CH_4}{dia}] \quad \text{ecuacion (3)}$$

Descomposición de sólidos volátiles.

$$K_o = 0.6 + 0.0006 * e^{(0.1185 * SV)} \quad \text{ecuacion (4)}$$

---

<sup>7</sup> Chen, Y.R.; Kinetic Analysis of Anaerobic Digestion of Pig manure and its Design Implications; Agricultural Wastes 8; 1983. Thomas, M.v. & R.A. Nordstedt; Trans ASAE 36 (2)

Crecimiento de la producción de metano respecto a la temperatura.

$$U_o = 0.013 * T - 0.129 \quad \text{ecuacion (5)}$$

**Donde:**

$K_o$  = Es la descomposición de los sólidos volátiles en el tiempo, además es una cantidad adimensional.

$U_o$  = Es el crecimiento de producción de metano con el cambio de temperatura por día.  
[m<sup>3</sup>/día]

TR = Tiempo de retención [días]

T = Temperatura [°C]

### 7.2.3 Volumen del biodigestor

Para calcular el volumen del reactor se empelo la siguiente expresión:

$$V_D = E * TR * Fd \quad \text{ecuacion (6)}$$

donde:

E = Cantidad de estiércol que se ingresa al día [Kg-día]

TR = Tiempo de retención de la materia orgánica en el biodigestor. [días]

Fd = Factor de disolución del residuo.

Se presenta el cálculo de la producción diaria de metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). A partir de los 12 Kg diarios de estiércol.

A partir de la cantidad de estiércol que ingresa al digestor diariamente se halla el peso total de los bovinos (W<sub>A</sub>):

La expresión para calcular dicha cantidad que ingresa diariamente es:

$$E = W_A * \frac{86 \text{ kg}}{1000 \text{ kg de animal}} \quad \text{ecuacion (7)}$$

Despejando  $W_A$ :

$$W_A = \frac{12 \text{ kg} * 1000 \text{ kg de animal}}{86 \text{ kg}} = 139.5348 \text{ kg} \approx 140 \text{ kg}$$

Sólidos totales (ST):

$$ST = W_A * \frac{E}{1000 \text{ kg de animal}} \quad \text{ecuacion (8)}$$

$$ST = 140 \text{ kg} * \frac{12 \text{ kg}}{1000 \text{ kg de animal}} = 1.68 \text{ Kg/día}$$

Sólidos volátiles:

$$SV = W_A * \frac{10 \text{ Kg}}{1000 \text{ Kg de animal}} \quad \text{ecuacion (9)}$$

$$SV = 140 \text{ Kg} * \frac{10 \text{ Kg}}{1000 \text{ Kg de animal}} = 1.4 \text{ Kg/día}$$

$$U_o = 0.013 * T * 0.129 \quad \text{ecuacion (10)}$$

donde:

T es la temperatura promedio al interior del digestor.

Reemplazando:

$$U_o = 0.013 * 15 - 0.129 = 0.066$$

$$K_o = 0.6 + 0.0006 * e^{(0.1185*SV)} \quad \text{ecuacion (11)}$$

$$K_o = 0.6 + 0.0006 * e^{(0.1185*1.4)} = 0.6007$$

Finalmente se aplicó la ecuación 3 para determinar el volumen de gas metano.

$$V_{CH_4} = 0.2 * 1.4 \frac{\text{Kg}}{\text{día}} * \left(1 - \frac{0.6007}{0.066 * 21 - 1 + 0.6007}\right) [m^3 \text{ CH}_4 / \text{día}]$$

$$V_{CH_4} = 0.1095 [m^3 CH_4/día]$$

Seguido a esto se calcula el volumen de dióxido de carbono producido:

$$Vol_{CO_2} = \frac{V_{CH_4} * 0.4}{0.6} \quad \text{ecuacion (12)}$$

$$Vol_{CO_2} = \frac{0.1095 * 0.4}{0.6} == 0.073 m^3$$

La cantidad de volumen de biogás producido es la suma de del volumen de metano y de dióxido de carbono.

$$Vol \text{ de Biogás} = CH_4 + CO_2 \quad \text{ecuacion (13)}$$

$$Vol \text{ de Biogás} = 0.1095 m^3 + 0.073 m^3$$

$$Vol \text{ de } CH_4 + CO_2 = 0.1825 \left[ \frac{m^3 \text{Biogás}}{día} \right]$$

Al hacer la conversión a litros:

$$V_D = 0.1825 m^3 * \left( \frac{1000 Lt}{1 m^3} \right) = 182.5 Lts$$

Con la ecuación 6 se calcula el volumen total del biodigestor, cabe destacar que se debe hacer una relación estiércol/agua en la mezcla para ser ingresado al digestor. La humedad que tiene el estiércol bovino es de aproximadamente 80%, por lo cual 1 Kg de estiércol es igual a 1 Kg de agua; por lo cual la relación por la que se optó es 1:1, que es la más recomendada para la mezcla de los residuos bovinos.

Por lo anterior el factor de disolución del residuo es 2, que equivale a 1 Kg de estiércol, más un Kg de agua, en total se deposita una mezcla de 24 Kg.

$$V_D = 12 \frac{Kg}{día} * 21 días * 2 = 504 Kg$$

Dado que el resultado tiene unidades de kilogramo, se hace la conversión a litros y poder dimensionar el reactor.

$$V_D = 504 \text{ Kg} * \left(\frac{1 \text{ Lt}}{1 \text{ Kg}}\right) * \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ Lt}}\right) = 0.504 \text{ m}^3$$

En la conversión se hace la equivalencia de Litros a Kilogramos dado que el estiércol bovino tiene un 80 % de humedad y un 20 % de materia seca.

Teniendo en cuenta las características del digestor tipo Plug Flow, el porcentaje de espacio que le corresponde a la fase líquida es de un 75% y un 25% a la fase gaseosa. Por ende, se tiene que:

$$V_D = V_L = 0.504 \text{ m}^3 = 75\%$$

**Volumen de campana:**

$$V_c = V_L * \frac{0.25}{0.75} \quad \text{ecuacion (14)}$$

**Donde:**

$V_c$  = Volumen de campana o gasómetro.

$V_L$  = Volumen del líquido.

$$V_c = 0.504 \text{ m}^3 * \frac{0.25}{0.75} = 0.168 \text{ m}^3$$

De esta manera el volumen real del digestor será:

$$V_{RD} = V_c + V_D = 0.168 \text{ m}^3 + 0.504 \text{ m}^3 = 0.672 \text{ m}^3 \quad \text{ecuacion (15)}$$

Asumiendo un factor de seguridad ( $N_s$ ):

$$N_s = 1.4$$

$$V_{RD} = 0.672 \text{ m}^3 * N_s = 0.672 \text{ m}^3 * 1.4 = 0.9408 \text{ m}^3$$

Se realizo el dimensionamiento del digestor.

$$V_{RD} = A_D * L_D \quad \text{ecuacion (16)}$$

$$A_D = b * h$$

$$V_{RD} = b_D * h_D * L_D$$

Se despeja la longitud del digestor

$$L_D = \frac{V_{DR}}{b_D * h_D} = \frac{0.9408 \text{ m}^3}{0.8 \text{ m} * 1.5 \text{ m}} = 0.784 \approx 0.8 \text{ m}$$

Por último, se halló el volumen final teniendo en cuenta la longitud calculada.

$$V_D = L * h * b \quad \text{ecuacion (17)}$$

$$V_D = 0.8 \text{ m} * 1.5 \text{ m} * 0.8 \text{ m} = 0.96 \text{ m}^3$$

Se decidió optar por un tanque hermético IBC de 1.000 Litros o  $1\text{m}^3$ , cuenta con una válvula de descarga y una boca de llenado en la parte superior. Para la implementación de un biodigestor funciona debido a su estructura hermética, se puede instalar de forma sencilla y tiene una buena mantenibilidad. Adicional a ello para la instalación de un agitador y válvulas es más sencillo empleando otras herramientas y logrando hacer el sellado directamente en el punto de instalación, tal como se observa en la figura 8, adicionalmente se encuentran sus propiedades.

### Figura 8.

Tanque hermético IBC



Material	Polietileno de alta densidad
Capacidad	275 galones (1000 litros)
Dimensiones	1 * 1 * 1.16 [m]
Estiba	Madera, metalica, plastica

Fuente:Contenedor IBC. (s. f.). Resitrans Group [Imagen].

**Cálculo de la presión atmosférica al interior del biodigestor:**

$$P_1 = P_o + \Delta P \quad \text{ecuacion (18)}$$

Donde:

$P_1$  = Presión hidrostática al fondo del tanque

$P_o$  = Presión inicial = 980 [Pa]

$\Delta P$  = Variación de la presión teniendo en cuenta la altura del fluido.

$$P_1 = P_o + \rho g h_L$$

Donde:

$g$  = gravedad = 9.81 [m/s<sup>2</sup>]

$h_L$  = Altura del liquido

$\rho_{H2O}$  = densidad del sustrato  $\approx$  [1000 Kg/m<sup>3</sup>]

Altura del sustrato:

$$h_s = \frac{0.504 \text{ m}^3 * 1.5 \text{ m}}{0.96 \text{ m}^3} = 0.7875 \text{ [m]} \quad \text{ecuacion (19)}$$

Con la altura del sustrato, se halla la presión.

$$P_1 = 980 \text{ [Pa]} + 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.7875 \text{ m}$$

$$P_1 = 8705.375 \approx 8.7 \text{ KPa}$$

**7.3 Componentes del sistema****7.3.1 Transmisión de potencia****7.3.1.1 Rodete**

Según (Sierra, 2013, p.57) la velocidad a la cual debe ser agitada la mezcla dentro del biodigestor para permanecer homogénea, debe estar en el rango de los 33 rpm y 40 rpm, hasta los 80 rpm y 220 rpm. Teniendo en cuenta esta información se estableció la velocidad de rotación en

30 rpm. De acuerdo a la figura 9 y según (McCabe, Smith y Harriot, 1991, p.251) se establecen los siguientes parámetros de proporción para un tanque de agitación.

$$\frac{D_p}{D_t} = \frac{1}{3} \qquad \frac{E}{D_p} = 1 \qquad \frac{w}{D_p} = \frac{1}{5} \qquad \frac{L}{D_p} = \frac{1}{4}$$

Donde:

$D_p$ , es el diametro de las paletas

$D_t$ , es el diametro o en este caso la longitud del lado del tanque

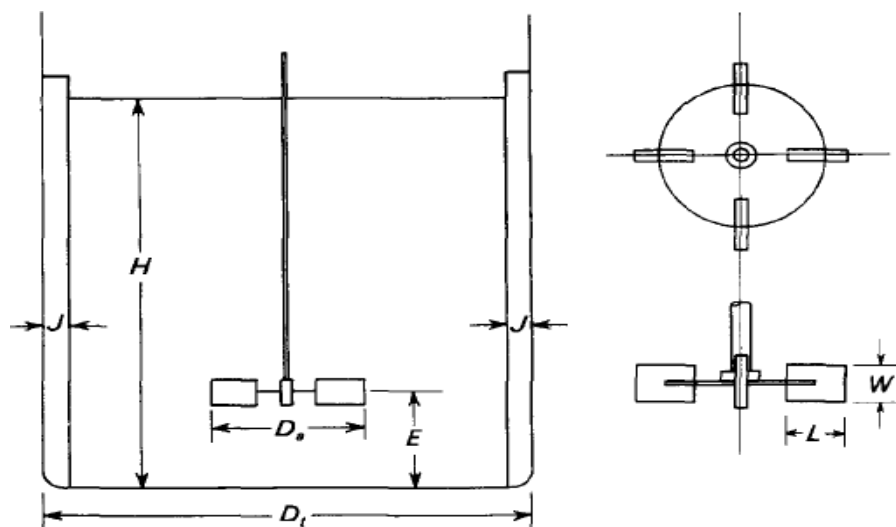
$E$ , distancia entre el fondo del tanque y el agitador

$w$ , es el alto de la paleta

$L$ , es el ancho de la paleta.

### Figura 9.

Medidas de un agitador de turbina



Nota. Tomado de Operaciones Unitarias en Ingeniería Química (McCabe, Smith & Harriott, 1991, p. 251).

Teniendo en cuenta que las proporciones establecidas son para un tanque cilíndrico y que el empleado en el desarrollo de este proyecto es cubico, se realizaron las siguientes modificaciones a criterio propio y de profesionales colaboradores, logrando que el agitador cumpla su función en el interior del recipiente.

$$\frac{Dp}{Dt} = \frac{47}{100} = 0.47$$

$$\frac{L}{Dp} = \frac{18.25}{47} = 0.388$$

Desarrollando se obtuvieron los siguientes resultados:

$$Dp = 0.47Dt = 0.47(1) = 0.47m \approx 47cm$$

$$E = Dp = 0,47m \approx 47cm$$

$$w = \frac{1}{5}(0.47m) = 0,094m \approx 9.4cm$$

$$L = 0.388Dp = 0.388(0,47m) = 0,1825 \approx 18,25cm$$

### 7.3.1.2 Espesor de paletas

Para el cálculo del espesor de la paleta primero se establece el uso de 6 paletas para el rodete y se calcula la fuerza ejercida sobre cada una de estas mediante la ecuación 29.

$$F = \frac{1}{2} \cdot C_a \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \quad \text{ecuacion (29)}$$

Donde:

$C_a$ , es el coeficiente de arrastre

$\rho$ , es la densidad del medio, En este caso medio acuoso o agua.

$v$ , es la velocidad

$A$ , es el area

Con base a esta ecuación se calcula el torque aplicado sobre cada paleta teniendo en cuenta la velocidad radial y calculando la relación entre el largo y el ancho de la paleta se ingresa a la figura 10 para obtener el valor de  $C_a$ .

$$\frac{b}{h} = \frac{L}{w} = \frac{18,25}{9,4} = 1,94 \quad \text{ecuacion (30)}$$

$$n = 30 \text{ rpm}$$

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} = \frac{2\pi(30)}{60} = 3.1415 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$T = \int F \cdot dr$$

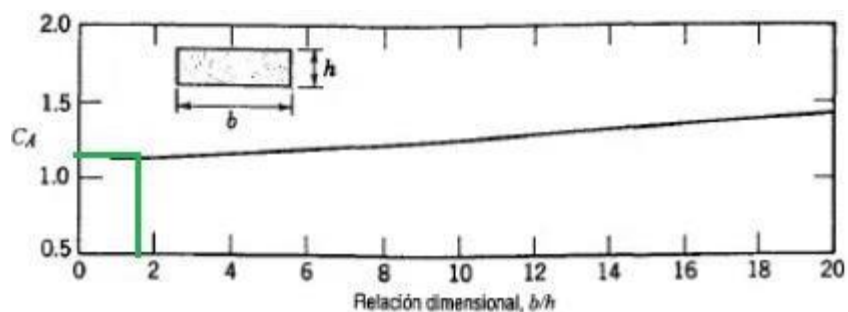
$$T = \frac{1}{2} C_a \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot w \int_{0.0525}^{0.235} r^3 dr \quad \text{ecuacion (31)}$$

$$T = \frac{1}{2} * 1.2 * 998 * 3.1415^2 * 0.094 * \left( \frac{0.235^4}{4} - \frac{0.0525^4}{4} \right) = 0.4224 \text{ Nm}$$

$C_a = 1.2$  tomado de la figura 10

### Figura 10.

Coefficiente de arrastre para una placa plana



Nota. Tomado de Operaciones Unitarias en Ingeniería Química (McCabe, Smith & Harriott, 1991, p. 150).

Ahora se calculó el espesor de la paleta paletas para lo cual es necesario conocer las propiedades del material en el que se va fabricar el agitador, en este caso teniendo en cuenta que es un medio acuoso altamente corrosivo, se plantea usar acero inoxidable, posiblemente AISI 316 o AISI 304, para lo cual se preguntó en diferentes talleres de metalurgia y se optó por el AISI 304, comercialmente conocido como acero quirúrgico debido a que es más fácil de conseguir y su costo es bajo en relación al otro, teniendo como propiedades mecánicas<sup>8</sup> las mencionadas a continuación.

$$\rho = 8000 \frac{kg}{m^3}$$

$$\delta_y = 241MPa$$

$$\delta_u = 586MPa$$

Ahora según Mott en donde se especifica que para elementos que no involucran la presencia del factor humano, se usa un factor de seguridad de:

$$N=2.5$$

Empleando las fórmulas del libro de Mott se calcula el esfuerzo permisible

$$\sigma_{per} = \frac{\delta_y}{N} = \frac{241MPa}{2.5} = 96.4MPa \quad \text{ecuacion (32)}$$

Con este valor se calcula el espesor mínimo de las paletas mediante las siguiente formula:

$$e = \sqrt{\frac{6 \cdot T}{w \cdot \sigma_{per}}} \quad \text{ecuacion (33)}$$

---

<sup>8</sup> Mott, R. L. (2004). Diseño de elementos de máquinas (4ª ed., Apéndice 6, Tabla A-12, p. 653). Pearson Educación. Recuperado de [https://www.academia.edu/36103249/Dise%C3%B1o\\_de\\_elementos\\_de\\_m%C3%A1quinas\\_Mott](https://www.academia.edu/36103249/Dise%C3%B1o_de_elementos_de_m%C3%A1quinas_Mott)

$$e = \sqrt{\frac{6 \cdot 0,4224}{0,094 \cdot 96,4 \times 10^6}} = 0.0005288 \text{ m} \approx 0.52 \text{ mm}$$

Donde

$T$ , es el torque aplicado en cada paleta

$s$ , es el modulo elastico

$w$ , es la altura de la paleta

$s$ , es el espesor de la paleta

Se consulto con el fabricante y se encontró que el espesor es demasiado bajo por lo tanto se estableció el espesor en el primer valor por encima del calculado, que es de 3 mm, logrando mantener condiciones de operación.

### 7.3.1.3 Motorreductor

Para el cálculo de la potencia del motorreductor primero se necesitó calcular los números adimensionales de Reynolds y Frauden con las ecuaciones 34 y 35.

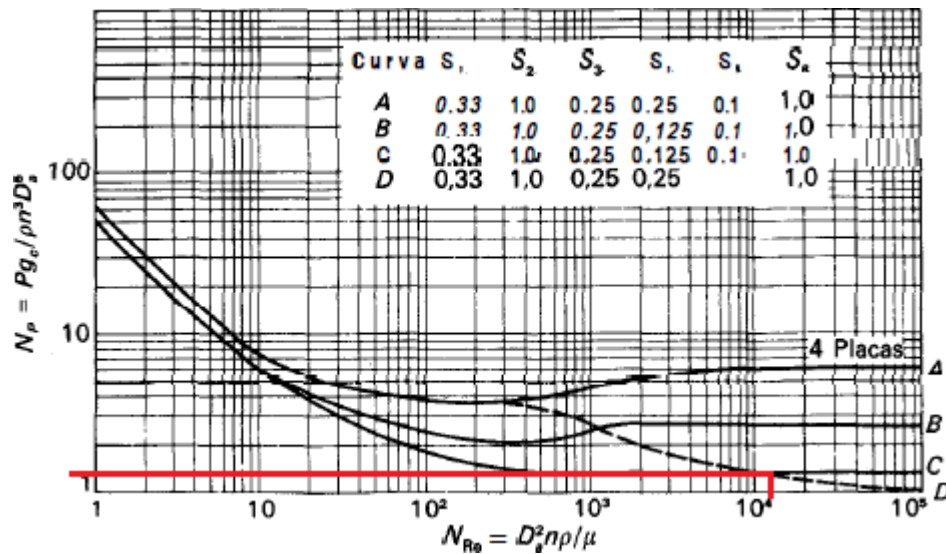
$$Re = \frac{N\rho \cdot Dp^2}{\mu} = \frac{0.5 * 0.47^2 * 998}{0.000998} = 110450 \quad \text{ecuacion (34)}$$

$$Fr = \frac{N^2 * Dp}{g} = \frac{0.5^2 * 0.47}{9.81} = 0.01197 \quad \text{ecuacion (35)}$$

Con el número de Reynolds se ingresó a la figura 11 para obtener el número de potencia ( $N_p$ ), el cual fue necesario para el cálculo de la potencia requerida por el motorreductor.

**Figura 11.**

Número de potencia para turbinas de 6 palas



Nota. Tomado de Operaciones Unitarias en Ingeniería Química (McCabe, Smith & Harriott, 1991, p. 275).

Según los trazos se encuentra que el  $N_p$  (número de potencia) es de 1.4. ahora con la ecuación 36 se calcula la potencia:

$$P = \frac{N_p * Fr^m * n^3 * Dp^5 * \rho}{g} \quad \text{ecuacion (36)}$$

En la ecuación 36 se necesita el parámetro  $m$ , el cual se calcula empleando la ecuación 37, en donde las constantes  $a$  y  $b$  se obtuvieron de la tabla 8 a la cual se ingresó teniendo en cuenta la gráfica 9.13 del libro operaciones unitarias en ingeniería química Química (McCabe, Smith & Harriott, 1991, p. 259) en donde se relaciona el número de potencia y el número de Reynolds para turbinas de 6 palas.

**Tabla 8.**

Constantes a y b para el cálculo del parámetro m empleado en la ecuación 36

Figura	Línea	a	b
9.13	D	1,0	40,0
9.14	B	1,7	18,0
9.14	c	0	18,0
9.14	D	2,3	18,0

Nota. Tomado de *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (McCabe, Smith & Harriott, 1991, p. 261).

$$m = \frac{a - \log(Re)}{b} = \frac{1 - \log(110450)}{40} = -0.1011 \quad \text{ecuacion (37)}$$

$$P = \frac{1.4 * 0.01197^{-0.1011} * 0.5^3 * 0.47^5 * 998}{9.81} = 0.6386 \left[ Kg * \frac{m}{s} \right] = 6.26 W = 0.04023 Hp$$

Ahora se halla el factor de servicio con base al catálogo de Cotransa:

**Tabla 9.**

Factores de servicio según la naturaleza de la carga y el tiempo de funcionamiento

Naturaleza de la carga de la máquina accionada Nature de la charge de la machine entraînée		Duración del funcionamiento [h] Durée de fonctionnement [h]					Frecuencia de arranque z [arr./h] Fréquence de démarrage z [dém./h]							
Ref. Réf.	Descripción Description	3 150 ≤ 2 h/d	6 300 2-4 h/d	12 500 4-8 h/d	25 000 8-16 h/d	50 000 16-24 h/d	2	4	8	16	32	63	125	250
a	Uniforme	0,8	0,9	1	1,18	1,32	1	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,4	1,5
b	Sobrecargas moderadas (1,6 × normal) Surcharges modérées (1,6 × normal)	1	1,12	1,25	1,5	1,7	1	1	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,4
c	Sobrecargas fuertes (2,5 × normal) Fortes surcharges (2,5 × normal)	1,32	1,5	1,7	2	2,24	1	1	1	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32

Nota. Adaptado de "Catálogo de Productos" (Cotransa, 2025, p. E6).

Se selecciona el factor de servicio ( $f_s$ ) de 0.8 debido a que las condiciones de operación son uniformes y el agitador estará encendido en un tiempo de 30 minutos para 4 turnos en el día, lo cual da como resultado un de 2 horas diarias tal como se evidencia en la tabla 9.

Con este factor de servicio se calcula la potencia real a emplear en el motorreductor

$$P = P_o * f_s = 6.26W * 0.8 = 5W \quad \text{ecuacion (38)}$$

Contando con la información de potencia y velocidad requerida para el motorreductor se contacta con la empresa EXH, los cuales entregan las referencias de motores disponibles con las especificaciones entregadas por el grupo de trabajo, en donde se selecciona la siguiente alternativa:

### Figura 12.

Motorreductor 41K30 GN-AF y ficha técnica.



Especificaciones técnicas	
Ref.	41K30GN-AF+4GN60K
Voltaje	110 V
Potencia	30 W
Velocidad de salida	30 RPM
Eje	10 mm
Longitud del eje	30 mm
Cuñero	4 mm

Nota. Tomado de "Motorreductor 30W 30RPM", por Exhibir Equipos.

Debido a que el lugar donde se desarrolla el proyecto es una finca en zona rural, la corriente que llega a esta solo posee una fase, por lo que el motorreductor debe ser monofásico, tal como el seleccionado y donde según la figura 12 la potencia de este es mayor a la calculada en la ecuación 38, brindando de esta forma una mejor estabilidad al proceso con una velocidad igual a la establecida en los parámetros de operación.

### 7.3.1.4 Eje

Para realizar el diseño del eje se necesitan los parámetros de potencia, torque y velocidad angular con los cuales se calcula el diámetro del eje con la ecuación 40

$$P = T * \omega \quad \text{ecuacion (39)}$$

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{30[W]}{3.1415} = 9.55 [Nm]$$

Diámetro del eje:

$$D = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot N}{\pi \cdot S_y}} \cdot \sqrt{\frac{3}{4} \cdot T^2} \quad \text{ecuacion (40)}$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 2}{\pi \cdot 241 \cdot 10^6}} \cdot \sqrt{\frac{3}{4} \cdot 9.55^2} = 0.00887m = 0.88cm$$

Teniendo en cuenta los calibres en que viene la varilla de acero y los cálculos realizados, se toma la decisión de dejarlo a la medida de una pulgada con el fin de que se pueda realizar un acople sencillo y que el motor, y el eje puedan soportar el peso del rodete sin sufrir una sobrecarga.

Entregando la información al fabricante, él aconseja que se realice el acople liso con 2 prisioneros de 4 mm los cuales son de la medida del chavetero del motor, fabricados en acero convencional ya que no está expuesto a un ambiente corrosivo como se muestra en la figura 13.

### Figura 13.

Acople liso con prisioneros



Nota. Fuente: Elaboración propia

## 7.4 Diseño de tuberías

### 7.4.1 Diseño tubería de entrada y salida.

En el diseño de las tuberías de entrada y de salida del digestor (figura 19 y 20), se proyecta un tubo de alimentación a una altura de 65 cm respecto al suelo, así mismo, se ubica el tanque de alimentación a una altura de 1.2 m, considerando 5 cm adicionales correspondientes al empalme de la unión entre el tanque de alimentación y la tubería. Una vez se establecieron estas medidas se procede al cálculo de la longitud que debe tener la tubería de alimentación.

Considerando las alturas del tanque de alimentación y el digestor se muestra que:

$$h_a = h_t - h_d \quad (\text{ecuación 41})$$

$$h_a = 1.2 \text{ m} - 0.65 \text{ m} = 0.55 \text{ m}$$

donde:

$h_a$  = diferencia de altura.

$h_t$  = altura del tanque de almacenamiento.

$h_d$  = altura del digestor.

Una vez calculada la diferencia de alturas entre el tanque y el digestor se tiene como resultado 0.55 m, con esto se obtiene la medida de la tubería de carga, como se evidencia a continuación.

$$T_c = \frac{0.55}{\cos 45^\circ} = 0.77 \text{ m}$$

Una vez calculada la tubería de entrada, la medida e inclinación para la tubería de salida del fertilizante, va a ser la misma que la tubería de entrada como se muestra en la figura 15. La tubería seleccionada debe cumplir con diferentes criterios como la resistencia a los factores ambientales a los cuales va a estar expuesta, la fácil mantenibilidad e instalación de la misma, el fácil acceso en caso de necesitar hacer algún cambio, entre otras.

La tubería presenta una inclinación de  $45^\circ$  en relación con el tanque de carga, lo cual favorece el flujo adecuado de la mezcla. Ésta pendiente, junto con el apoyo de la gravedad, ayuda a prevenir posibles bloqueos.

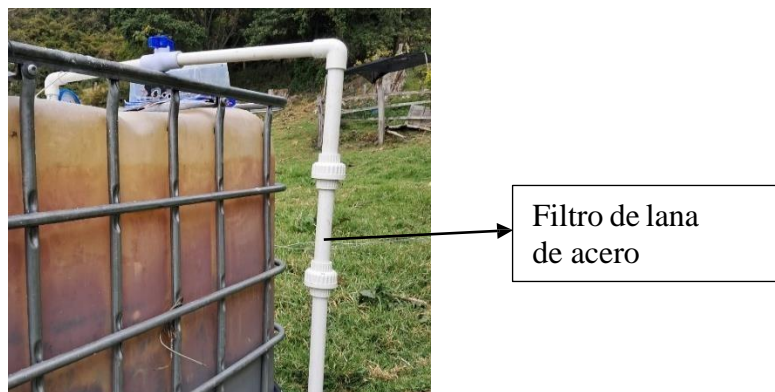
Cada tubería se controla con una válvula de bola que se activa de forma manual, esto con el fin de evitar el ingreso de oxígeno al sistema y controlar de manera adecuada el flujo de entrada y salida.

#### 7.4.2 Diseño de la tubería de biogás.

El biogás debe ser transportado desde el tanque digestor hasta el punto donde será utilizado, para esto, es fundamental utilizar un material resistente a la presión generada por el biogás. El PVC es el material que mejor se adapta a estas necesidades debido a su durabilidad y resistencia. Al igual que en las tuberías de carga y descarga del biodigestor, las conexiones deben ser completamente herméticas para mantener un ambiente anaeróbico dentro del sistema, estas tuberías también serán controladas mediante válvulas de bola para regular el flujo y prevenir el ingreso de oxígeno. A lo largo del trayecto de la tubería de salida del biogás, se debe instalar un filtro de lana de acero como se evidencia en la figura 14 para evitar la emisión de malos olores durante el uso del biogás.

#### Figura 14.

Filtro de acero inoxidable para biogás



Nota. Fuente: Elaboración propia

#### 7.4.3 Acoples.

En las conexiones entre el tanque y las diferentes tuberías (carga, descarga y biogás), se instala un adaptador para tanque roscable. Este adaptador es también conocido como acople de

macho y hembra roscado, tiene varios campos de aplicación, pues cada lado es roscable, además de introducir un empaque en caucho para cuando se instaló no se presente ningún tipo de fuga. Este acople está disponible en varias dimensiones de tubería, desde 1/2" hasta 3", por lo cual se utiliza en todas las conexiones pertinentes. En la tabla 10 se muestra el diámetro de la tubería utilizada en su alimentación, salida de biol, salida de residuos y salida de biogás.

**Tabla 10.**

Características de la tubería empleada en el proceso de construcción

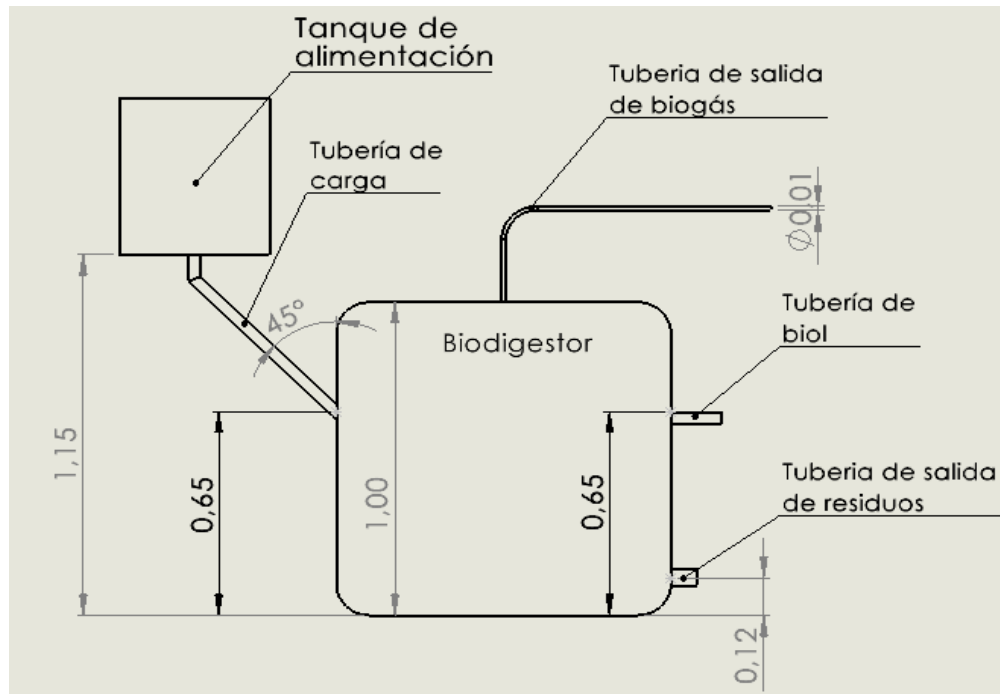
Tubería	Diámetro (in)
Carga	2
Descarga de fertilizante	1.5
Salida de biogás	0.5
Salida de residuos	2

Nota. Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la figura 15 se presenta el diseño técnico del biodigestor, el cual detalla las medidas exactas del sistema, incluyendo los grados de inclinación de la tubería y las dimensiones de cada uno de sus componentes. Este esquema permite visualizar de manera clara cómo se distribuyen los diferentes elementos, asegurando un flujo eficiente de los materiales y la correcta funcionalidad del biodigestor.

**Figura 15.**

Diseño técnico del biodigestor



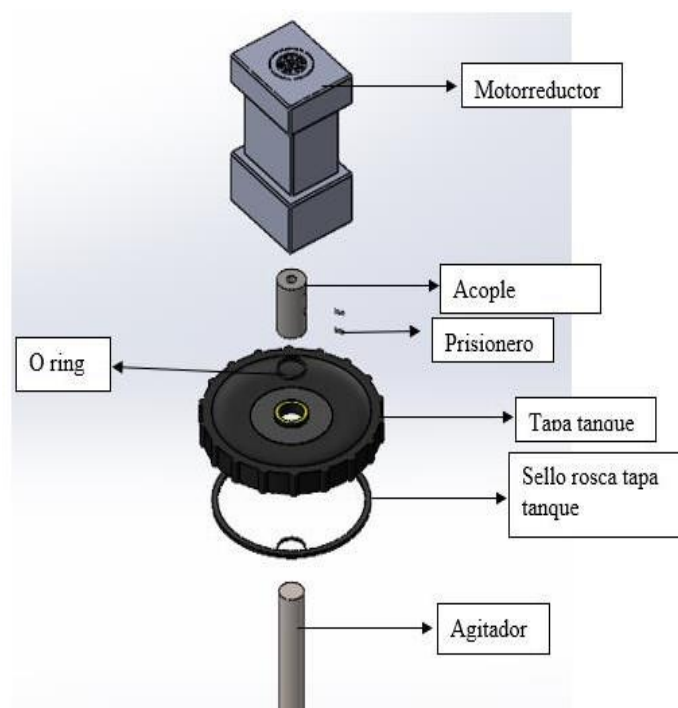
Nota. Fuente: Elaboración propia

La figura 16 representa el modelo diseñado en el software de SolidWorks de la forma en que se realizó la instalación del acople entre el motorreductor y el agitador de tal forma que la potencia y rotación de este no se viera afectada ni afectara el ambiente interno para la producción del biogás y el biol. En la sección 7.3 del documento se especificó el material a emplear en cada uno de los elementos que transmitirían potencia y la selección de algunos componentes. Ahora se resalta la implementación de 2 cauchos u o-rings que se colocan en la parte superior e inferior de la tapa del tanque para evitar la fuga del gas o el ingreso de aire que afecte la producción del mismo; esta tapa de igual forma se empleó como base del motor para lograr soportar el peso del agitador y cuenta con un sello hermético de caucho el cual impide el paso de cualquier tipo de

fluido al enroscar la totalidad de la tapa en el tanque. De esta forma se evidencia que el proceso de descomposición está totalmente aislado del medio ambiente, manteniendo así la mezcla en estado homogéneo en comparación a la forma tradicional de un biodigestor semicontinuo elaborado en lona y termosellado en fabrica.

### Figura 16.

Ensamblaje acople motorreductor - agitador

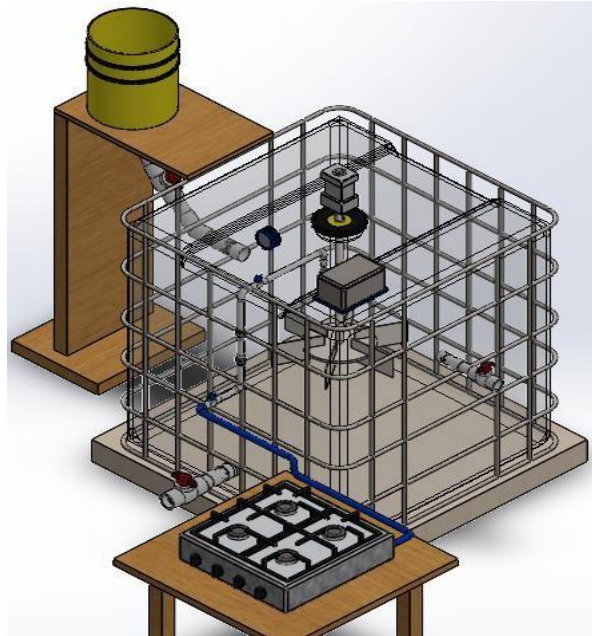


Nota. Fuente: Elaboración propia

En la figura 17 se evidencia el modelo general del sistema con todas sus conexiones incluida la estufa que se empleó para la realización de la prueba de que el biogás producido generara combustión al entrar en contacto con fuego. Este modelado sirvió como base para la realización de la construcción y obtención del ensamblaje final.

**Figura 17.**

Ensamble de la totalidad del sistema, elaborado en SolidWorks



Nota. Fuente: Elaboración propia

## 8. Construcción

En primer lugar, se llevó a cabo la conexión electrónica, que incluyó la instalación de los sensores y el tablero de monitoreo descrito en la sección 5.2. Posteriormente, se realizó la programación del algoritmo utilizando la aplicación de Arduino. Antes de continuar, los sensores fueron sometidos a pruebas para descartar errores de medición y altas variaciones en el registro de datos, además de ello se emplearon 2 sensores de nivel con el fin de que se garantizara una mayor precisión en los resultados obtenidos, descartando la posibilidad de algún fallo, daño o descalibración en alguno de los sensores teniendo en cuenta que al sellar el tanque digester, este no podría volver a ser abierto hasta finalizada la etapa de producción.

En segunda instancia se realizó el montaje del biodigestor en donde se adquirió el tanque IBC figura 18, se mandó a elaborar el agitador y se compró el motorreductor primeramente debido a que eran componentes que tomaban su tiempo en fabricación y entrega. A la vez se adquirieron los materiales de tubería PVC, válvulas de bola, soldadura PVC y demás materiales necesarios como silicona, caucho y alambre.

**Figura 18.**

Tanque digestor



Nota. Fuente: Elaboración propia

El fabricante del agitador, empleando las especificaciones técnicas entregadas al principio del proceso como lo son los planos, materiales y el motorreductor, entrego ensamblado la totalidad del sistema de transmisión de potencia.

En las figuras 19 y 20 se evidencia la tubería de carga, la tubería de salida del biol, la de salida de residuos y salida del biogás.

**Figura 19.**

Tubería de carga y salida del biol



Nota. Fuente: Elaboración propia

**Figura 20.**

Tubería de salida de biogás y salida de residuos



Nota. Fuente: Elaboración propia

Para el sistema de carga de igual forma se agregó una caneca de 5 galones a la cual se le realizó una perforación de 2 pulgadas de diámetro, las mismas medidas de la tubería de carga la cual se designó de esta medida para evitar un atascamiento al momento de ingresar la mezcla, figura 21, esta se colocó sobre una base de madera a una altura de 1.20 m con respecto al piso.

**Figura 21.**

Acople tanque de carga



Nota. Fuente: Elaboración propia

### 8.1 Ensamble

El biodigestor con todos sus componentes se puede observar en la figura 22. Donde se encuentran todas las tuberías, el tablero de monitoreo y los sensores instalados, el manómetro, el motorreductor y el agitador.

**Figura 22.**

Ensamble total del biodigestor



Nota. Fuente: Elaboración propia

## 8.2 Alimentación del sistema

Una vez lleno el tanque de entrada se procede a abrir la válvula para el ingreso de la mezcla al tanque digestor teniendo en cuenta que se debe dejar una pequeña cantidad de mezcla en dicho tanque alimentador evitando posibles entradas de aire al digestor.

Se monitoreó la temperatura y el nivel, dichos valores aparecían en el tablero, una vez transcurrido el tiempo de estabilización de medición establecido en 5 a 10 minutos aproximadamente como se evidencia en la figura 23.

### Figura 23.

Pantalla LCD que muestra los valores de temperatura y nivel



Nota. Fuente: Elaboración propia

## 9. Análisis de resultados


### 9.1 Biogás

Mediante la cromatografía de gases se obtuvieron los resultados y el análisis de la muestra de biogás empelando un equipo denominado cromatógrafo de gases modelo SRI 8610C que se encuentra en las instalaciones del CENTRO INTEGRADO DE LABORATORIOS DE INGENIERÍA QUÍMICA, ubicados en la Universidad Industrial de Santander. Este equipo cuenta

con una columna empacada HayeSep D de 6" x 1/8" y un detector de conductividad térmica (TCD), el cual permite la detección de gases inorgánicos como el sulfuro de hidrogeno (H<sub>2</sub>S) y otros gases como metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y bajo condiciones óptimas de operación proporciona un límite mínimo de detección de aproximadamente 100 ppm. La muestra se realizó por inyección de gas, se tomó una muestra del gas y se inyectó al cromatógrafo para su posterior análisis evidenciado en la figura 24. Además, de obtener un alto contenido de metano se observa que no hay presencia de sulfuro de hidrogeno (H<sub>2</sub>S) gracias a la instalación del filtro de lana de acero en la tubería de salida del biogás, el cual cumple como función atrapar impurezas o sulfuros del biogás, tal como se muestra en la figura 14, lo que hace que su porcentaje molar en los resultados finales sea cero.

### Figura 24.

Resultados muestra de biogás

	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	<b>TIPO DE ANÁLISIS:</b> Composición de biogás por cromatografía de gases <b>N° ANÁLISIS:</b> 2025016315
	<b>ESCUELA INGENIERÍA QUÍMICA</b>	<b>FECHA:</b> marzo de 2024

<b>CENTRO INTEGRADO DE LABORATORIOS DE INGENIERÍA QUÍMICA-CILIQ</b>	
<b>Cliente</b>	Andrés Romero
<b>#Factura</b>	2025016315
<b>Análisis</b>	Composición de biogás por cromatografía de gases
<b>Material y código</b>	-

#### 1. Determinación de composición de biogás por cromatografía de gases.

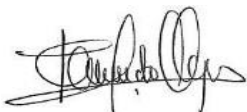
Se recibieron dos muestras (biogás 1 y biogás 2) para el análisis de composición de biogás por cromatografía de gases. Los resultados de los análisis se expresan en porcentaje molar de metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y sulfuro de hidrogeno (H<sub>2</sub>S) de la muestra analizada. Las composiciones se determinaron utilizando un cromatógrafo de gases SRI 8610C, equipado con una columna empacada HayeSep D de 6' x 1/8".

## 2. Resultados.


Se adjunta tabla con composición en porcentaje molar de metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y sulfuro de hidrogeno (H<sub>2</sub>S) para cada una de las muestras analizadas.

Muestra	Componente	Formula	Porcentaje (Molar)
Biogás 1	Metano	CH <sub>4</sub>	83,62
	Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	16,38
	Sulfuro de hidrogeno	H <sub>2</sub> S	0
Biogás 2	Metano	CH <sub>4</sub>	81,16
	Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	18,84
	Sulfuro de hidrogeno	H <sub>2</sub> S	0

**Tabla 1.** Composición de biogás por cromatografía de gases.



V<sup>B</sup>  
**Dr. FERNANDO VIEJO ABRANTE**  
 Director del CILIQ  
 M. profesional: PQ-3762



**Dr. LUIS JAVIER LÓPEZ GIRALDO**  
 Director de Escuela  
 Escuela de Ingeniería Química

Elaborado por:  
 Ing. María Jose Uribe Muñoz  
 Registro profesional No.32114

## 9.2 Biol


A continuación, se describe el procedimiento desarrollado por el laboratorio químico para consultas industriales de la Universidad Industrial de Santander.

En primer lugar, se determinó el pH mediante un potenciómetro, el cual se calibró y posterior a ello se introdujo un electrodo a la muestra, y para la conductividad eléctrica se empleó un conductímetro calibrado sumergido directamente en la muestra. Para determinar la densidad de la muestra, se empleó un recipiente, una gramera y la fórmula de densidad, en donde se restó al

peso del recipiente con la muestra, el peso del mismo y se dividió en el volumen del recipiente, obteniendo un resultado en unidades de g/ml. El siguiente compuesto que se analizó fue el carbono orgánico oxidable total, para el cual se pesó entre 0.5 y 5 g de muestra, en donde por ser muestra líquida se pesó el recipiente antes de añadir la muestra, la cual se secó en estufa a 70°C, se adiciona dicromato de potasio y ácido sulfúrico a la muestra dentro de una cabina de extracción, dejando reaccionar, enfriar y diluyendo con agua destilada para leer el resultado en un espectrofotómetro. En el caso del fósforo soluble en agua se filtra la muestra líquida para separar los sólidos suspendidos, luego se lavaron los residuos con agua destilada, completando así el volumen en un balón aforado, para ajustar el espectrofotómetro se toman alícuotas de estándares de fósforo preparando las soluciones de referencia, desarrollando el color con un reactivo acomplejante de vanadato – molibdato y se mide la absorbancia determinando la concentración de fósforo. El nitrógeno total, amoniacal y nítrico se analiza digiriendo la muestra con ácido sulfúrico, tetraborato de sodio y NaOH, diluyendo la muestra y acidificando con HCl, respectivamente para cada compuesto analizado y leyendo en el espectrofotómetro a 220 nm. A continuación, se filtra un volumen conocido de la muestra a través de un papel de filtro previamente pesado, para lograr un peso constante entre el papel y el residuo se calienta a 70 °C, se enfría en un desecador y se pesa, restando el peso del papel y dividiendo en el volumen de la muestra obteniendo la concentración de sólidos insolubles. Por último los metales solubles en agua con un porcentaje de la muestra se diluye a un volumen definido y se acidifica con HNO<sub>3</sub>, analizando los metales (Ca, Mg, Na, K, Cu, Mn, Fe, Zn) por espectrofotometría de absorción atómica (FLAA), para determinar el azufre, se toma una porción de la solución ácida, se diluye, se añade solución buffer de sulfatos y cloruro de bario, y se lee en el equipo (Espectrofotómetro de Absorción Atómica Agilent 240FS AA). Los resultados anteriormente descritos se evidencian en la figura 25.

Figura 25.

Resultados muestra de biol

 <b>LQCI</b> Laboratorio Químico de Consultas Industriales	Laboratorio Químico de Consultas Industriales	Código: <b>F-PA-02</b>
	Post - Analítico	Versión: <b>15</b>
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	Última modificación: <b>2024-01-15</b>

INFORME DE ENSAYO INF 25-0336			
Fecha de emisión	2025-04-11	Informe N.º	25-0336
Fecha de recepción	2025-03-27	Solicitud N.º	25-0336

1. INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR EL CLIENTE			
1.1 Información del cliente			
Cliente	Andres Fernando Romero Hurtado	Contacto	Andres Fernando Romero Hurtado
Dirección	Carrera 25 #6-10	Teléfono	3174502774
Correo	fernando7romerohj@gmail.com	C.C.	1.002.522.637
1.2 Información del muestreo			
Fecha	2025-03-23	Tipo	Puntual
Lugar	Sotaquirá - Boyacá	Muestreo	Realizado por el Cliente
Punto	Vereda Catoba - Finca Alasacia		

**Nota:** La identificación de la muestra también es información suministrada por el cliente.

2. INFORMACIÓN DE ENSAYOS			
Muestra No. 1 (25-0336)			
Abono Líquido			
Fecha inicial análisis	2025-04-07	Lugar de análisis	Edificio EDIC, Laboratorio 702
Fecha final análisis	2025-04-11		

Tabla 1. Resultados de ensayos			
Parámetro	Método	Resultado	Unidades
Análisis Físicoquímico			
pH <sup>1</sup>	Potenciométrico, P-DA-39 Determinación capacidad de retención de agua, pH y conductividad eléctrica	6,15	Und. pH
Conductividad Eléctrica	Conductivimétrico, P-DA-39 Determinación capacidad de retención de agua, pH y conductividad eléctrica	4,44	dS/m
Densidad	Gravimétrico, P-DA-36 Determinación densidad	1,0054	g/mL
Carbono Orgánico Oxidable Total	Espectrofotométrico, P-DA-34 Determinación carbono orgánico oxidable total	4,22	g C/L
Nitrógeno Total	Método Kjeldahl, P-DA-46 Determinación nitrógeno total, amoniacal y nítrico	1,073	g N/L
Nitrógeno Amoniacal	Método Kjeldahl, P-DA-46 Determinación nitrógeno total, amoniacal y nítrico	0,088	g N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /L
Nitrógeno Nítrico	Método Kjeldahl, P-DA-46 Determinación nitrógeno total, amoniacal y nítrico	0,426	g N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /L
Fósforo Soluble en Agua	Espectrofotométrico, NTC 234:1996	38,204	g P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /L
Calcio Soluble en Agua	Absorción Atómica, P-DA-45 Determinación metales en abonos	5,119	g CaO/L
Magnesio Soluble en Agua	Absorción Atómica, P-DA-45 Determinación metales en abonos	1,301	g MgO/L
Sodio Soluble en Agua	Absorción Atómica, P-DA-45 Determinación metales en abonos	0,269	g Na/L
Potasio Soluble en Agua	Absorción Atómica, P-DA-45 Determinación metales en abonos	1,507	g K <sub>2</sub> O/L
Azufre Soluble en Agua	Turbidimétrico, P-DA-45 Determinación metales en abonos	0,026	g S/L
Sólidos Insolubles en Agua	Gravimétrico, P-DA-40 Determinación contenido de sólidos insolubles	8,84	g/L
Cinc Soluble	Absorción Atómica, P-DA-45 Determinación metales en abonos	0,001	g Zn/L
Cobre Soluble	Absorción Atómica, P-DA-45 Determinación metales en abonos	<0,001	g Cu/L
Manganeso Soluble	Absorción Atómica, P-DA-45 Determinación metales en abonos	0,005	g Mn/L
Hierro Soluble	Absorción Atómica, P-DA-45 Determinación metales en abonos	0,002	g Fe/L

a) La información de muestreo es proporcionada por el cliente. Por lo tanto, no se realizará referencia alguna al plan y método de muestreo utilizado. Los resultados se aplican a la muestra como se recibió. b) Los resultados reportados en el presente informe están relacionados exclusivamente a los ítems que han sido sometidos a ensayo. c) Sin la aprobación del laboratorio no se debe reproducir el informe, excepto cuando se reproduce en su totalidad. d) El laboratorio no es responsable por la información identificada como suministrada por el cliente y su posible afectación en la validez de los resultados.

  
 Cobstantora de laboratorio  
 Qca. Esp. Bibiana Herrera  
 MP PQ-3003

  
 Directora de laboratorio  
 Qca. M.Sc. Yolanda Vargas  
 MP PQ-1144

### 9.3 Resultados de instrumentación

#### 9.3.1 Sensores de temperatura

**Tabla 11.**

Promedio diario, tabulación de temperatura

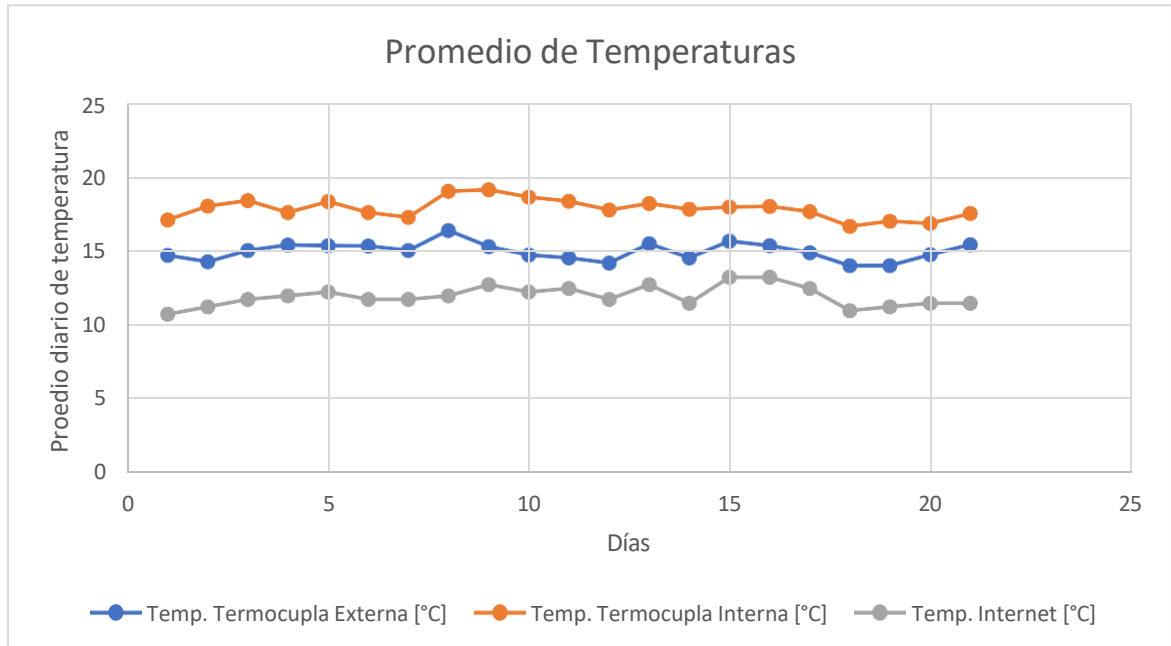
Promedio de Temperaturas							
Día	Temp. Termocupla Externa [°C]	Temp. Termocupla Interna [°C]	Temp. Internet [°C]	Día	Temp. Termocupla Externa [°C]	Temp. Termocupla Interna [°C]	Temp. Internet [°C]
1	14,75	17,125	10,75	12	14,225	17,8125	11,75
2	14,3125	18,0625	11,25	13	15,525	18,25	12,75
3	15,0625	18,4375	11,75	14	14,575	17,85	11,5
4	15,4375	17,625	12	15	15,6875	18	13,25
5	15,4	18,375	12,25	16	15,4	18,0375	13,25
6	15,375	17,625	11,75	17	14,9125	17,7	12,5
7	15,0625	17,3125	11,75	18	14,0375	16,7	11
8	16,425	19,0625	12	19	14,05	17,05	11,25
9	15,3375	19,175	12,75	20	14,775	16,9	11,5
10	14,7625	18,6875	12,25	21	15,45	17,5625	11,5
11	14,5625	18,3875	12,5				

Nota. Fuente: Elaboración propia

La figura 26, elaborada a base de la tabla 11 evidencia el promedio de temperaturas registradas por día durante los 21 días de carga del biodigestor. Se incluyen las gráficas de las temperaturas tomadas por las termocuplas en la parte interna del tanque de color naranja y al medio ambiente de color azul, así como la temperatura registrada por la aplicación del clima diseñada por Google de color gris.

**Figura 26.**

Promedio diario de temperaturas durante la carga



Nota. Fuente: Elaboración propia

Los resultados más altos de temperatura se registran dentro del tanque, debido a la radiación que incide sobre su superficie y a las propiedades del material, las cuales favorecen la concentración del calor e incrementan la temperatura interna. Referente a la temperatura tomada por la termocupla externa se presentaron variaciones de  $\pm 1$  a  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  con base a las mediciones tomadas en las diferentes horas del día y de  $\pm 1$  a  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  respecto a la temperatura del mismo día y hora entregada por aplicación. Empleando el porcentaje de error promedio ponderado, obtenido de la tabla 18 con un valor de 24.52%, calculado entre las medidas tomadas de manera experimental y las arrojadas por la aplicación se establece que la alta variación de valores es producida porque la termocupla externa se encuentra en un lugar fijo donde la sensación térmica y corrientes de viento son estables, permitiendo de esta forma obtener valores en tiempo real y más

precisos, en comparación de las condiciones presentes en las estaciones meteorológicas donde están los equipos empleados por Google que son zonas altas generalmente en donde se hace el respectivo promedio de temperaturas para cada región y municipio.

Por otro lado, la termocupla tipo K tiene un margen de error característico que puede estar entre  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$  y  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  dependiendo de la calidad del sensor y del sistema de lectura, adicionalmente el módulo MAX 7675 también tiene un margen de error adicional, cercano a  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . En conjunto, esto puede explicar diferencias totales de  $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ . Por último, este porcentaje de error, tabla 12, fue alto debido a que la termocupla externa estaba instalada sobre la superficie del tanque y expuesta a las condiciones ambientales y climáticas, por lo anterior el sistema electrónico comprendido como Arduino, pantalla LCD, termocupla, baquelita, leds, buzzer, y sistema de cableado, se protegió de dichas condiciones con un recipiente plástico, por tal motivo la termocupla pudo haber registrado valores superiores a los consultados mediante la aplicación.

**Tabla 12.**

Porcentaje de error entre medidas de la termocupla y de Google

Fecha	% de error	Fecha	% de error
16/12/2024	37.21	26/12/2024	16.50
17/12/2024	27.22	27/12/2024	21.06
18/12/2024	28.19	28/12/2024	21.76
19/12/2024	28.65	29/12/2024	26.74
20/12/2024	26.02	30/12/2024	18.40
21/12/2024	30.85	31/12/2024	16.23
22/12/2024	28.19	01/01/2025	19.30
23/12/2024	36.88	02/01/2025	27.61
24/12/2024	20.29	03/01/2025	24.89
25/12/2024	20.51	04/01/2025	28.48
		05/01/2025	34.35

Nota. Fuente: Elaboración propia

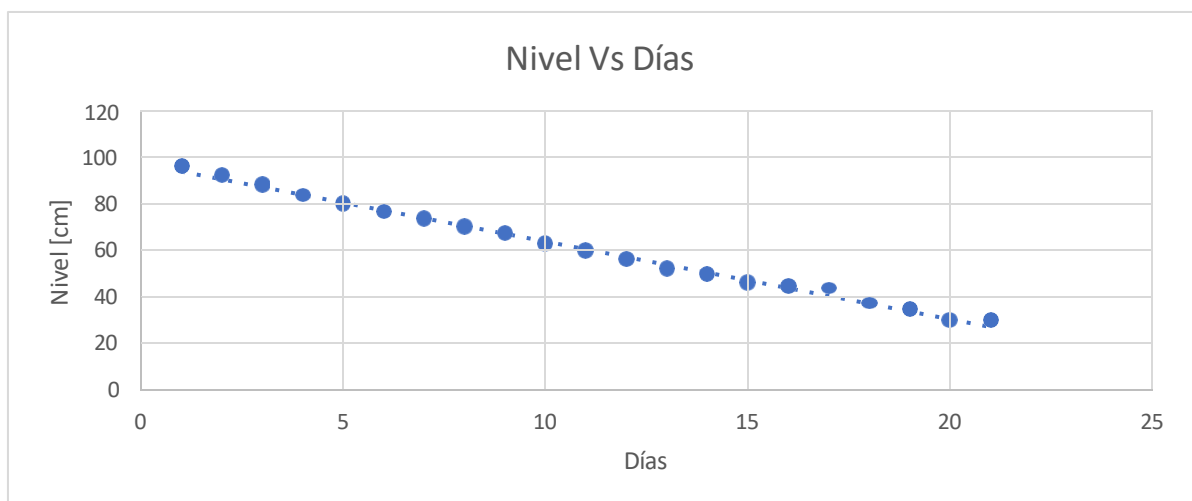
Del promedio general de temperaturas al interior, exterior y de la aplicación se logra afirmar que la temperatura interna siempre es mayor que la del ambiente tal como se evidencia en la tabla 11, en donde se muestra que la diferencia es de 3°C promedio a favor del valor medido por la termocupla interna, demostrando así que la incidencia de los rayos del sol y algunas corrientes de viento contribuyen a la mejora de las condiciones para la producción de biogás y biol en el proceso anaeróbico reduciendo el tiempo estimado del proceso.

### 9.3.2 Sensores de nivel

Por último, en la figura 27 encontramos el comportamiento del nivel del tanque digestor, se observa una gráfica lineal descendente debido a la toma de datos, pues el sensor está instalado en la parte de arriba del tanque midiendo la distancia entre su ubicación y la superficie de la mezcla dentro del tanque. El día 21, el nivel del tanque alcanzó una altura superior a la de la tubería de entrada del biodigestor. Esta condición impidió que la mezcla pudiera fluir hacia el interior del sistema. Como resultado, durante este último día, el nivel del biodigestor solo aumentó 1 cm.

#### Figura 27.

Nivel de vacío en el biodigestor durante la carga



Nota. Fuente: Elaboración propia

### 9.3.3 Sensor de presión

**Tabla 13.**

Tabulación datos de presión

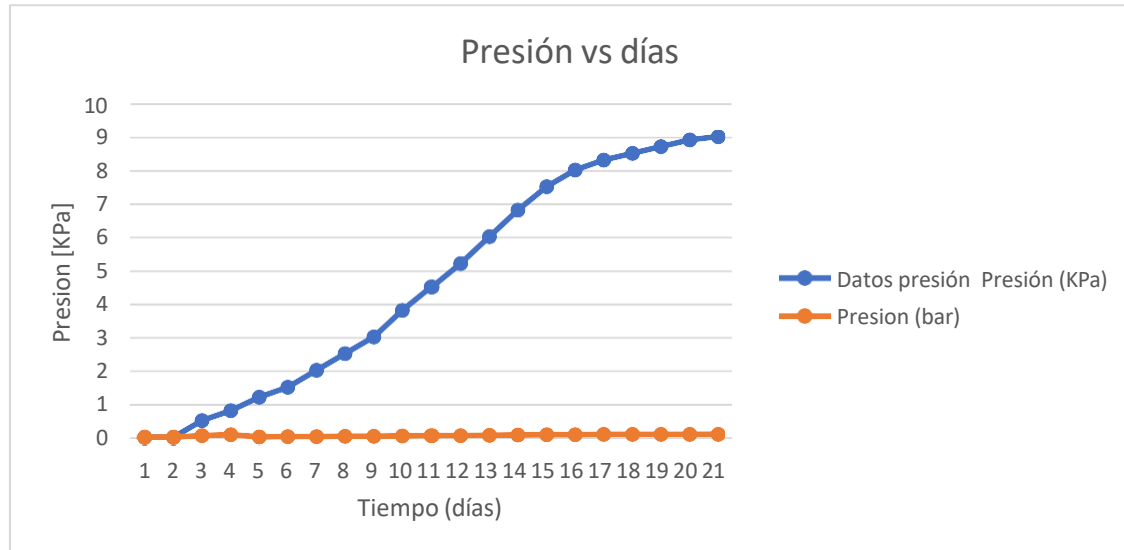
Datos presión					
Día	Presión (KPa)	Presión (bar)	Día	Presión (KPa)	Presión (bar)
1	0	0	11	4.5	0.045
2	0	0	12	5.2	0.052
3	0.5	0.05	13	6	0.06
4	0.8	0.08	14	6.8	0.068
5	1.2	0.012	15	7.5	0.075
6	1.5	0.015	16	8	0.08
7	2	0.02	17	8.3	0.083
8	2.5	0.025	18	8.5	0.085
9	3	0.03	19	8.7	0.087
10	3.8	0.038	20	8.9	0.089

Nota. Fuente: Elaboración propia

En la tabla 13 se evidencia el registro de los valores arrojados por el sensor de presión a lo largo de los 21 días de carga, en donde los 2 primeros días se registra un valor de cero debido a que aún no hay producción de gas al interior del digestor, al tercer día se presentó un leve incremento. Este incremento se presentó de manera constante en los días siguientes hasta llegar al día 15 en donde los valores empezaron a estabilizarse en un valor entre 8 y 9 [KPa], valor que permanecerá contante durante los días siguientes de producción.

**Figura 28.**

Presiones registradas durante el proceso de producción



Nota. Fuente: Elaboración propia

Con base a la información tabulada en la tabla 13, se realizó la figura 28 de la cual se comprueba que la presión producida por el biogás en un biodigestor es baja, lo que permite emplear tuberías y accesorios de PVC, en comparación a la extracción de gas natural del subsuelo que alcanza presiones de entre 20 y 50 [Mpa]<sup>9</sup>, para las cuales es necesario el uso de tuberías y accesorios hechos en acero al carbono, y cobre. De esta manera se realizó la comparación con las presiones que generalmente tiene un biodigestor las cuales están entre los 0.5[KPa] para biodigestores de bajo costo como lo es el elaborado en este proyecto y 100[KPa] para biodigestores industriales de alta presión<sup>10</sup>.

<sup>9</sup> Tarek, A. (2016). *Reservoir Engineering Handbook* (5th ed.). Gulf Professional Publishing.

<sup>10</sup> L. Sasse, *Biogas Plants*, GTZ, 1988. <https://www.susana.org/en/knowledge-hub/resources-and-publications/library/details/1117>

## 10. Presupuesto

**Tabla 14.** Presupuesto elaboración del proyecto

Concepto	Unidad	Precio Unitario	Cantidad	Precio total (COP)
Cromatografía de gases (biogás)	Cantidad	\$ 146,520.00	1	\$ 146,520.00
Análisis fisicoquímico de biol	Cantidad	\$ 270,000.00	1	\$ 270,000.00
Tanque IBC	Cantidad	\$ 350,000.00	1	\$ 350,000.00
Tanque de almacenamiento biol	Cantidad	\$ 100,000.00	1	\$ 100,000.00
Tanque de carga	Cantidad	\$ 25,000.00	2	\$ 50,000.00
Manómetro analogico	Cantidad	\$ 15,000.00	1	\$ 15,000.00
Sensor termocupla tipo K	Cantidad	\$ 18,000.00	2	\$ 36,000.00
Sensor ultrasonico sin contacto	Cantidad	\$ 8,000.00	2	\$ 16,000.00
Pantalla LCD 20x4	Cantidad	\$ 35,000.00	1	\$ 35,000.00
Baquelita	Cantidad	\$ 8,000.00	1	\$ 8,000.00
Valvulas PVC 2"	Cantidad	\$ 20,000.00	2	\$ 40,000.00
Valvula PVC 1 1/2"	Cantidad	\$ 18,000.00	1	\$ 18,000.00
Valvula PVC 1/2"	Cantidad	\$ 3,000.00	2	\$ 6,000.00
Acoples PVC	Cantidad	\$ 15,000.00	3	\$ 45,000.00
Accesorios (codos, semicodos, uniones universales)PVC	Cantidad	\$ 32,000.00	1	\$ 32,000.00
Limpiador PVC	Cantidad	\$ 8,000.00	1	\$ 8,000.00
Pegante PVC	Cantidad	\$ 13,000.00	1	\$ 13,000.00
Motorreductor	Cantidad	\$ 450,000.00	1	\$ 450,000.00
Agitador	Cantidad	\$ 400,000.00	1	\$ 400,000.00
			<b>Subtotal</b>	<b>\$ 2,038,520.00</b>
<b>Gastos Variables</b>				
Tubería PVC 2"	Metros	\$ 16,500.00	2	\$ 33,000.00
Tuberia PVC 1/2	Metros	\$ 4,800.00	2	\$ 9,600.00
Tubería PVC 1 1/2"	Metros	\$ 13,000.00	1	\$ 13,000.00
			<b>Subtotal</b>	<b>\$ 55,600.00</b>
<b>Otros</b>				
Caja plastica	Cantidad	\$ 7,000.00	1	\$ 7,000.00
Silicona	Cantidad	\$ 10,000.00	4	\$ 40,000.00
Estopa	Cantidad	\$ 4,000.00	1	\$ 4,000.00
Transporte	Viaje	\$ 24,000.00	24	\$ 576,000.00
Alambre	Kilos	\$ 11,000.00	2	\$ 22,000.00
Empaques	Cantidad	\$ 1,000.00	6	\$ 6,000.00
Bolsa de suero	Cantidad	\$ 5,000.00	1	\$ 5,000.00
			<b>Subtotal</b>	<b>\$ 660,000.00</b>
			<b>Total sin imprevistos</b>	<b>\$ 2,754,120.00</b>
			<b>Imprevistos 10%</b>	<b>\$ 275,412.00</b>
			<b>Total</b>	<b>\$ 3,029,532.00</b>

Nota. Fuente: Elaboración propia

## 11. Conclusiones

. Con base en el objetivo general y los resultados obtenidos del montaje y operación del sistema, se puede concluir que el diseño implementado en un tanque IBC fue efectivo para el procesamiento de estiércol, bajo condiciones climáticas promedio de 15 °C y a una altitud de 2800 m.s.n.m. La relación establecida permitió una adecuada dilución del sustrato, favoreciendo la actividad microbiana y la producción de biogás, alcanzando una concentración del 83% de metano, la cual es alta respecto a otros tipos de biogases producidos, ya que estos tienen entre un 50% y un 70% de concentración de metano, y cercana a la del gas natural empleado con una concentración superior al 90%, haciendo este biogás apto y funcional para usos domésticos. Esto gracias a la implementación del agitador el cual permitió una mejor distribución de los microorganismos en la mezcla favoreciendo el proceso de digestión anaerobia, además la buena radiación solar durante el día y la protección en la noche con un plástico de invernadero, permitió que no hubiese un cambio drástico de temperatura. Adicionalmente, se logró obtener biol como subproducto, con potencial para ser empleado como fertilizante orgánico en diversos cultivos. En conjunto, estos resultados demuestran la viabilidad técnica del sistema propuesto para el aprovechamiento de residuos orgánicos en zonas rurales con climas fríos, generando beneficios energéticos y agrícolas sostenibles.

A partir del objetivo de implementar un sistema de monitoreo de variables clave en el funcionamiento del biodigestor, se logró integrar exitosamente sensores que permitieron un seguimiento continuo y confiable de las condiciones internas y externas del sistema, permitiendo registrar temperaturas estables durante el periodo de operación, con un promedio de 18 °C en el interior del tanque y 15 °C en el ambiente, valores adecuados para mantener la actividad microbiana. La incorporación de los sensores de nivel permitió verificar el nivel libre de

biomasa en el tanque, registrando un valor de 29 cm una vez cargado el tanque finalizado el tiempo de carga establecido. Asimismo, el manómetro analógico instalado permitió monitorear la presión interna, registrando un valor máximo de 0.09 bares, lo que indica una producción constante y segura de biogás dentro de los rangos operativos del sistema. En conjunto, el sistema de instrumentación implementado no solo facilitó el monitoreo en tiempo real de las condiciones del biodigestor, mejorar la seguridad del proceso y generar información clave para futuras mejoras.

El análisis fisicoquímico del abono líquido obtenido en el proceso de biodigestión, permitió evidenciar que el material residual cuenta con características adecuadas para su aprovechamiento agrícola. resaltando macronutrientes esenciales como el nitrógeno con una concentración de 2.93 g/L, fosforo soluble en agua con 0.387 g/L y potasio soluble en agua con una composición de 1.507 g/L, por último, se obtuvo un pH de 6.15 ideal para la mayoría de cultivos andinos y tropicales; demostrando así que el biol tiene potencial como biofertilizante, aportando macronutrientes esenciales para el crecimiento vegetal. Asimismo, las concentraciones de micronutrientes como magnesio, calcio y azufre, aunque presentes en menor proporción, refuerzan su valor nutritivo para el suelo. En cuanto a la calidad del biogás producido, se obtuvo una composición del 83.62% de metano ( $\text{CH}_4$ ), lo que indica un poder calorífico elevado, apto para aplicaciones energéticas domésticas o agrícolas. La ausencia de sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y la baja concentración de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ , 16.38%) confirman que el biogás es limpio y seguro para su uso, sin efectos corrosivos ni riesgos para la salud.

### Bibliografía

- (S/f). Fao.org. Recuperado el 20 de marzo de 2024, de <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- Sogari, N., Reuss, M., & Busso, A. (2000). DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA OBTENER METANO UTILIZANDO EXCREMENTO DE VACAS Y CERDOS EN LA ESCUELA AGROTECNICA DE LA UNNE. *Ene*, 868(5205), 0.
- Cortés Ramírez, D. S. (2019). Diseño de biodigestor de estiércol bovino.
- Koopmans, A. Energía de la biomasa, contaminación atmosférica interior y salud.
- LA COMBUSTIÓN, C. D. A. P., & LEÑA, D. El uso doméstico de leña en los países en desarrollo y sus repercusiones en la salud.
- Pinos-Rodríguez, J. M., García-López, J. C., Peña-Avelino, L. Y., Rendón-Huerta, J. A., González-González, C., & Tristán-Patiño, F. (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. *Agrociencia*, 46(4), 359-370.
- Rodríguez, E. J. A., Ocampo, J. W. M., & Ortega, C. A. S. (2007). Medición de temperatura: sensores termoeléctricos. *Scientia et technica*, 1(34).
- Gómez, C. R. B., & Hernández, M. A. D. (2010). Instrumentación de un biodigestor de estiércol animal para analizar su comportamiento dinámico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- De La Merced Jiménez, D. (2012). Evaluación de los parámetros de un biodigestor anaerobio tipo continuo.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (1991). Operaciones unitarias en ingeniería química (4.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.

IDAE. (s.f.). *Biogás: Uso térmico*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.

Recuperado el 10 de febrero de 2025 de <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/biogas>

Ferrovial. (s.f.). Biogás: qué es y para qué sirve. Recuperado el 10 de febrero de 2025 de

<https://www.ferrovial.com/es/recursos/biogas/>

Sacome. (s.f.). Importancia del acondicionamiento del biogás. Recuperado el 10 de febrero de

2025 de <https://www.sacome.com/importancia-acondicionamiento-biogas/>

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). (s.f.). Repositorio Institucional

UPTC. Recuperado el 10 de febrero de 2025 de <https://repositorio.uptc.edu.co/>

Wikipedia. (s.f.). Biogás – Biometano. Recuperado el 10 de febrero de 2025 de

<https://es.wikipedia.org/wiki/Biog%C3%A1s#Biometano>

Biogás Metano Latam. (s.f.). Tipos de biodigestores. Recuperado el 10 de febrero de 2025 de

<https://biogasmetano-latam.com/tipos-de-biodigestores/>

Distriladam. (s.f.). Biodigestor tubular. Recuperado el 10 de febrero de 2025 de

<https://distriladam.com/biogestor-tubular/>

Exhibir Equipos. (s.f.). Motorreductor 30W 30RPM. Recuperado el 10 de febrero de 2025 de

<https://exhibirequipos.com/producto/motorreductor-30w-30rpm/>

Rexnord. (s.f.). Catálogo de productos: Factores de servicio según la naturaleza de la carga y el tiempo de funcionamiento (p. 41). Recuperado el 10 de febrero de 2025 de

[https://es.rexnord.com/contentitems/techlibrary/documents/421-110\\_catalog?lang=es-mx](https://es.rexnord.com/contentitems/techlibrary/documents/421-110_catalog?lang=es-mx)

Tarek, A. (2016). *Reservoir Engineering Handbook* (5th ed.). Gulf Professional Publishing.

Preciogas. (s.f.). *Composición del gas natural*. Recuperado de

<https://preciogas.com/instalaciones/gas-natural/composicion>

Apéndices

Anexo A. Tabulación de temperaturas y nivel

Tabulación de temperatura y nivel biodigestor													
Día	Fecha	Hora	Nivel [cm]	Temp. Ext. Termocup. [°C]	Temp. Int. Termocup. [°C]	Temp. Internet	Día	Fecha	Hora	Nivel [cm]	Temp. Ext. Termocup. [°C]	Temp. Int. Termocup. [°C]	Temp. Internet
1	16/12/2024	9:00 a. m.	96	12	15	10	12	27/12/2024	9:00 a. m.	56	13,7	15,25	11
		12:00 m		20	22,5	14			12:00 m		16,5	22,5	14
		4:00 p. m.		19	21,75	12			4:00 p. m.		15,2	21,2	13
		9:00 p. m.		8	9,25	7			9:00 p. m.		11,5	12,3	9
2	17/12/2024	9:00 a. m.	92	15,75	19,75	12	13	28/12/2024	9:00 a. m.	52	14,8	18,3	12
		12:00 m		15	20	13			12:00 m		18,6	21,25	15
		4:00 p. m.		14	21	12			4:00 p. m.		16,5	19,75	14
		9:00 p. m.		12,5	11,5	8			9:00 p. m.		12,2	13,7	10
3	18/12/2024	9:00 a. m.	88	14,5	18,75	11	14	29/12/2024	9:00 a. m.	49	14,5	18,25	11
		12:00 m		16,5	20,75	14			12:00 m		16	20,25	13
		4:00 p. m.		16,75	21	13			4:00 p. m.		15,3	18,6	12
		9:00 p. m.		12,5	13,25	9			9:00 p. m.		12,5	14,3	10
4	19/12/2024	9:00 a. m.	83	16,5	19	12	15	30/12/2024	9:00 a. m.	46	14,8	17,5	12
		12:00 m		19	22,5	14			12:00 m		16,25	18,3	15
		4:00 p. m.		16,75	17,5	12			4:00 p. m.		18,5	21,7	14
		9:00 p. m.		9,5	11,5	10			9:00 p. m.		13,2	14,5	12
5	20/12/2024	9:00 a. m.	80	14,5	18	12	16	31/12/2024	9:00 a. m.	44	14	16,25	13
		12:00 m		19	22,25	15			12:00 m		17,3	20,5	15
		4:00 p. m.		17,25	20,75	13			4:00 p. m.		17,7	21,6	14
		9:00 p. m.		11	12,5	9			9:00 p. m.		12,6	13,8	11
6	21/12/2024	9:00 a. m.	77	16,25	18,5	13	17	1/01/2025	9:00 a. m.	42	15,25	17,8	12
		12:00 m		17,75	21,25	14			12:00 m		18,2	22,5	15
		4:00 p. m.		16,25	18,5	12			4:00 p. m.		16	19,5	14
		9:00 p. m.		11,25	12,25	8			9:00 p. m.		10,2	11	9
7	22/12/2024	9:00 a. m.	73	15,25	18,25	13	18	2/01/2025	9:00 a. m.	38	14,5	16,8	10
		12:00 m		16,5	19,7	13			12:00 m		15,25	19,7	13
		4:00 p. m.		16,2	18	12			4:00 p. m.		16,2	18,8	12
		9:00 p. m.		12,3	13,3	9			9:00 p. m.		10,2	11,5	9
8	23/12/2024	9:00 a. m.	70	18,5	20,25	11	19	3/01/2025	9:00 a. m.	34	14,25	18,7	12
		12:00 m		18,7	21,5	13			12:00 m		17,7	20,2	13
		4:00 p. m.		17	22,2	15			4:00 p. m.		15	18,8	12
		9:00 p. m.		11,5	12,3	9			9:00 p. m.		9,25	10,5	8
9	24/12/2024	9:00 a. m.	67	15,6	19,5	12	20	4/01/2025	9:00 a. m.	30	15,5	16,8	13
		12:00 m		17,5	23	15			12:00 m		15,8	18,3	12
		4:00 p. m.		16	20,7	14			4:00 p. m.		16,3	20,5	12
		9:00 p. m.		12,25	13,5	10			9:00 p. m.		11,5	12	9
10	25/12/2024	9:00 a. m.	63	14,3	19,5	12	21	5/01/2025	9:00 a. m.		15,6	18,5	10
		12:00 m		16,5	20,7	15			12:00 m		18,3	19,5	14
		4:00 p. m.		18,25	22,3	14			4:00 p. m.		16,2	19	12
		9:00 p. m.		10	12,25	8			9:00 p. m.		11,7	13,25	10
11	26/12/2024	9:00 a. m.	60	16,5	18,35	13			9:00 a. m.		16,5	18,35	13
		12:00 m		17	22,2	15			12:00 m		17	22,2	15
		4:00 p. m.		14,25	20,3	13			4:00 p. m.		14,25	20,3	13
		9:00 p. m.		10,5	12,7	9			9:00 p. m.		10,5	12,7	9