

	<b>UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA</b>			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	<b>FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO</b>	<b>F-AC-DBL-007</b>	<b>08-07-2021</b>	<b>B</b>
Dependencia	Aprobado		Pág.	
<b>DIVISIÓN DE BIBLIOTECA</b>	<b>SUBDIRECTOR ACADEMICO</b>		<b>1(97)</b>	

## RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

<b>AUTOR</b>	Jorge Humberto Trujillo Santiago		
<b>FACULTAD</b>	De Ingenierías		
<b>PLAN DE ESTUDIOS</b>	Ingeniería Mecánica		
<b>DIRECTOR</b>	Malka Irina Cabellos Martínez		
<b>TÍTULO DE LA TESIS</b>	Diseño de un banco de pruebas como analizador de biogás para un biodigestor anaeróbico		
<b>TITULO EN INGLES</b>	Design of a test bench as a biogas analyzer for an anaerobic biodigester		
<b>RESUMEN</b> (70 palabras)			
<p>En la propuesta se plantea el diseño de un banco de pruebas como analizador de biogás para un biodigestor anaeróbico, en la generación de biogás que se logra gracias a un proceso digestivo que se lleva a cabo por medio de un grupo de bacterias en ausencia de oxígeno molecular dentro del reactor, en etapas que deben estar bien monitoreadas para así garantizar una producción de biogás y un óptimo funcionamiento del biodigestor, teniendo en cuenta parámetros como porcentaje de humedad (pH), temperatura y presión.</p>			
<b>RESUMEN EN INGLES</b>			
<p>The proposal proposes the design of a test bench as a biogas analyzer for an anaerobic biodigester, in the generation of biogas that is achieved thanks to a digestive process that is carried out by means of a group of bacteria in the absence of oxygen. molecular structure within the reactor, in stages that must be well monitored in order to guarantee biogas production and optimal functioning of the biodigester, taking into account parameters such as percentage of humidity (pH), temperature and pressure.</p>			
<b>PALABRAS CLAVES</b>	Biodigestor, Simulación, Biogás, Energía		
<b>PALABRAS CLAVES EN INGLES</b>	Biodigester, Simulation, Biogas, Energy		
<b>CARACTERÍSTICAS</b>			
PÁGINAS: 97	PLANOS:	ILUSTRACIONES: 22	CD-ROM:



**Diseño de un banco de pruebas como analizador de biogás para un biodigestor anaeróbico**

**Jorge Humberto Trujillo Santiago**

**Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña**

**Ingeniería Mecánica**

**Msc. Malka Irina Cabellos Martínez**

**08 Noviembre del 2021**

## Índice

<b>Capítulo 1. Diseño de un banco de pruebas como analizador de biogás para un biodigestor anaeróbico.....</b>	<b>13</b>
1.1 Planteamiento del problema.....	13
1.2 Formulación del problema .....	14
1.3 Objetivos .....	14
1.3.1 Objetivo general .....	14
1.3.2 Objetivos específicos.....	15
1.4 Justificación.....	15
1.5 Hipótesis.....	17
1.6 Delimitaciones.....	17
1.6.1 Delimitación Geográfica.....	17
1.6.2 Delimitación Temporal.....	17
1.6.3 Delimitación Conceptual .....	18
1.6.4 Delimitación Operativa.....	18
<b>Capítulo 2. Marco Referencial.....</b>	<b>19</b>
2.1 Marco histórico .....	19
2.1.1 Antecedentes a nivel internacional.....	19
2.1.2 Antecedentes a nivel nacional .....	19
2.1.3 Antecedentes a nivel regional.....	20
2.2 Marco contextual.....	21
2.3 Marco conceptual .....	21

2.3.1 Anaerobia .....	21
2.3.2 Aerobio .....	21
2.3.3 Bacterias anaeróbicas .....	22
2.3.4 Biogás .....	22
2.3.5 Biomasa .....	22
2.3.6 Digestor .....	22
2.3.7 Biodigestor .....	23
2.3.8 Digestión anaeróbica .....	23
2.3.9 Biodegradable .....	23
2.3.10 Hidrolisis .....	23
2.3.11 Ph .....	24
2.3.12 Ph metro .....	24
2.3.13 Poder calorífico .....	24
2.3.14 Reactor .....	24
2.3.15 Válvula de alivio .....	25
2.4 Marco teórico .....	25
2.4.1 Biomasa .....	25
2.4.2 Tipos de biomasa .....	26
2.4.3 Composición del biogás .....	26
2.4.4 Gestión de biogás, ganado y estiércol. ....	27
2.4.5 Características del biogás .....	28
2.4.6 Proceso de biodigestión .....	28
2.4.7 Digestión anaerobia .....	29

	4
2.4.8 Etapas de la digestión Anaerobia.....	29
2.4.8.1 Hidrólisis.....	29
2.4.8.2 Acidogénesis. ....	30
2.4.8.3 Acetogénesis.....	30
2.4.8.4 Metanogénesis.....	30
2.4.9 Aspectos técnicos de la producción de biogás.....	30
2.4.10 Contenido de Sólidos Sedimentables (S.S mL/L) .....	31
2.4.11 Rellenos sanitarios.....	32
2.4.12 Desarrollo y construcción de biodigestores anaeróbicos para la producción de biogás .....	32
2.4.13 Desarrollo de software para control y seguimiento .....	34
2.4.14 Temperatura (T °C) .....	36
2.5 Marco legal.....	36
<b>Capítulo 3. Diseño metodológico .....</b>	<b>40</b>
3.1 Tipo de investigación .....	40
3.2 Fases del proyecto de investigación.....	40
3.2.1 Fase I .....	41
3.2.2 Fase II.....	41
3.2.3 Fase III.....	41
3.3 Población.....	42
3.4 Muestra.....	44
3.5 Técnicas de recolección .....	45
3.5.1 Fuentes primarias.....	45

3.5.2 Fuentes Secundarias .....	45
3.6 Procesamiento y análisis de la información .....	45
3.6.1 Ansys .....	46
3.6.2 Solidwork. ....	46
<b>Capítulo 4. Presentación de resultados .....</b>	<b>48</b>
4.1 Identificación de los parámetros de funcionamiento del biodigestor anaeróbico .....	48
4.1.1 Parámetros de control de funcionamiento del biodigestor .....	48
4.1.2 Descripción de los rangos y parámetros de control para el funcionamiento del biodigestor .....	51
4.1.3 Descripción de los diferentes instrumentos de medición de cada parámetro de funcionamiento .....	56
4.2 Desarrollo de un instrumento virtual que permite la visualización para las variables identificadas y la adquisición de datos del sistema .....	60
4.2.1 Sensores para el registro de los parámetros de funcionamiento .....	61
4.2.2 Elementos necesarios para la medición de los parámetros del biodigestor, de acuerdo a los parámetros de funcionamiento .....	63
4.2.3 Diseño del instrumento virtual (VI) con los parámetros de funcionamiento a medir a partir de las variables identificadas en el biodigestor .....	72
4.3 Simulación en Ansys del funcionamiento del biodigestor anaeróbico .....	74
4.3.1 Diseño en SolidWorks del biodigestor a partir de las variables identificadas .....	75
4.3.2 Descripción de la mezcla que se realiza dentro del biodigestor .....	80
4.3.3 Parámetros de funcionamiento del biodigestor .....	85

4.3.4 Simulación a través de la herramienta computarizada ANSYS de acuerdo a los parámetros de funcionamiento.....	86
4.3.5 Aplicación del biodigestor como banco de pruebas para estrategia pedagógica en el desarrollo de asignaturas del programa ingeniería mecánica .....	88
<b>Capítulo 5. Conclusiones .....</b>	<b>90</b>
<b>Capítulo 6. Recomendaciones .....</b>	<b>92</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>93</b>

## Lista de Figuras

Figura 1 Esquema de ensamblaje.....	34
Figura 2 Biodigestor .....	35
Figura 3 Tasa de crecimiento relativo de microorganismos psicrófilicos, mesófilicos y termófilicos .....	57
Figura 4 Composición del biogás en función del pH de la mezcla de materias primas .....	59
Figura 5 Termocupla PT100 .....	64
Figura 6 Termómetro PCE-ST 1 .....	65
Figura 7 Termómetro PCE-IR 100 .....	66
Figura 8 InPro 4010 .....	67
Figura 9 HF405-DXK-S8 .....	68
Figura 10 InPro 4501VP .....	69
Figura 11 GD4200-USB .....	70
Figura 12 PR3860 .....	71
Figura 13 PCE-DMM 70 .....	71
Figura 14 Panel frontal desarrollado.....	73
Figura 15 Diagrama de bloques .....	74
Figura 16 Tapa del biodigestor .....	76
Figura 17 Aspas del biodigestor .....	77
Figura 18 Agitador con palas planas inclinadas .....	78
Figura 19 Cilindro del biodigestor.....	79
Figura 20 Esquema realizado en el software .....	80

Figura 21 Esquema de presión y velocidad en el tanque del biodigestor .....	87
Figura 22 Esquema de la transformación de la mezcla en gas .....	88

## Lista de Tablas

Tabla 1 Cuadro de actividades .....	42
Tabla 2 Población .....	43
Tabla 3 Población de la granja experimental .....	44
Tabla 4 Presupuesto .....	52
Tabla 5 Tiempo de retención .....	54
Tabla 6 Tiempo de retención .....	58
Tabla 7 Sensores de temperatura .....	61
Tabla 8 Sensores de pH.....	62
Tabla 9 Medidores de presión.....	62
Tabla 10 Temperatura .....	63
Tabla 11 Porcentaje de Humedad .....	66
Tabla 12 Presión .....	69
Tabla 14 Cuadro resumen de características del tanque del biodigestor .....	75
Tabla 14 Composición química del biogás.....	81
Tabla 15 Generación de energía por especie .....	83
Tabla 16 Generación de energía por especie .....	84
Tabla 17 Parámetros obtenidos .....	87

## Resumen

En la propuesta se plantea el diseño de un banco de pruebas como analizador de biogás para un biodigestor anaeróbico, en la generación de biogás que se logra gracias a un proceso digestivo que se lleva a cabo por medio de un grupo de bacterias en ausencia de oxígeno molecular dentro del reactor, en etapas que deben estar bien monitoreadas para así garantizar una producción de biogás y un óptimo funcionamiento del biodigestor, teniendo en cuenta parámetros como porcentaje de humedad (pH), temperatura y presión.

## Introducción

La generación de biogás a partir de excremento animal y residuos sólidos, como la biomasa para el aprovechamiento energético de este recurso, que se encuentra de forma libre en el medio ambiente y que es una gran parte del volumen y tardan un tiempo en degradarse al suelo y así devolver los nutrientes que posee, siendo así una opción muy muy atractiva para reducir la contaminación para estos días de calentamiento global y la el consumo excesivo de energía por parte de las industrias y el ser humano, obligando a que las nuevas generaciones estén innovando y buscando alternativas para fuentes de energía limpias y renovables sustentables para la comunidad. Este tipo de proyectos nos lleva a recurrir a demostrarle a comunidad que no todo lo que desechan es basura.

El biogás como una fuente de energía renovable es aprovechado en gran parte por la zona rural donde la energía eléctrica y el gas natural o de cilindro no llega a estas áreas, de ahí el uso que se le va dando al biogás generado en el proceso de los biodigestores anaeróbico, en pocos casos para el calentamiento del agua en aquellas zonas de climas bajos. A la fecha no se le da el mejor uso y el aprovechamiento total que tiene el biogás para la generación de energía eléctrica.

Con la realización de este tipo de proyecto se espera generar e incentivar a todas las generaciones en especial a las nuevas a recurrir a energías que no contaminen el medio ambiente y a aprovechar todos los recursos que la naturaleza no provee para nuestro beneficio, logrando así reducir el impacto ambiental y sobrecalentamiento que se vive en la actualidad. Tomando las energías renovables como la mejor opción de progreso en las industrias.

Tomando en cuenta la mejora que se ofrece al monitorear los diferentes parámetros en el biodigestor, llevamos a que se haga actualizaciones en las diferentes industrial, demostrando que el uso de nuevos métodos y softwares podemos garantizar un óptimo funcionamiento y una mejor calidad en el producto que se ofrece en el proceso, siendo así el uso del software de LABVIEW una innovación en el proyecto, recomendando mejoras y mejor uso a los biodigestores que se encuentran en la universidad francisco de paula Santander Ocaña.

## **Capítulo 1. Diseño de un banco de pruebas como analizador de biogás para un biodigestor anaeróbico**

### **1.1 Planteamiento del problema**

Al día de hoy, uno de los mayores problemas que enfrentan muchos países, particularmente los países en desarrollo, es la disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU), principalmente por motivos ambientales, sociales y económicos problemas ocasionados por su mala gestión. Los costes relacionados con la recogida, el transporte y el tratamiento aún dificultar una adecuada gestión de los residuos, ya que su eliminación se realiza en zonas inadecuadas, tales como vertederos, zanjas y otros lugares desprovistos de infraestructura adecuada. Además de los problemas asociados con los RSU, la contaminación de los recursos hídricos y el acceso a fuentes de energía han representó desafíos para el crecimiento económico, la salud humana y la preservación del medio ambiente en todas partes el mundo. (Guerrero & Hogland, 2014)

La búsqueda de implementación de fuentes de energía renovable, permite mitigar la contaminación ambiental y la disminución de gases de efecto invernadero provenientes de la descomposición de desechos orgánicos hacen del biogás la alternativa para la sustitución de combustibles fósiles y para la valorización energética de residuos orgánicos en zonas urbanas, rurales y agroindustriales.

Los digestores de biogás se utilizan para producir gas metano y el tamaño de los digestores suele ser más grande. La gente que vive en condiciones no favorables y está familiarizado con los usos y las ventajas de usar gas metano quiere tener un digestor de biogás en su hogar para reemplazar el gas de cocción ya que el precio cada día es mayor del gas de cocción se suma a sus problemas. (Jyothilakshmi & Prakash, 2016)

Existe la necesidad de un eficiente método para abordar este problema. Puede resolverse con una salida de energía limpia residual en forma de biogás a través de un biodigestor portátil que se puede instalar y mover en cualquier lugar de cada casa con la ayuda de recursos mínimos. (Ministerio de energía, 2011). Es por ello importante para el programa de Ingeniería Mecánica contar en la unidad de laboratorios con un banco de pruebas como analizador de biogás para que estudiantes y docentes puedan realizar análisis orientados al uso de energías renovables.

## **1.2 Formulación del problema**

¿Es posible el diseño de un banco de pruebas como analizador de biogás para un biodigestor anaeróbico?

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo general***

Diseñar un banco de pruebas como analizador de biogás para un biodigestor anaeróbico.

### ***1.3.2 Objetivos específicos***

Identificar los parámetros de funcionamiento del biodigestor anaeróbico para el programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

Desarrollar un instrumento virtual que permita la visualización para las variables identificadas y la adquisición de datos del sistema.

Aplicar una herramienta de software para la simulación del funcionamiento del biodigestor anaeróbico para la Universidad Francisco de Paula Santander.

### **1.4 Justificación**

Actualmente se busca la implementación de energías renovables para así contribuir a la preservación del medio ambiente, debido a que las energías de origen fósil están generando gases de efecto invernadero. En muchos países en desarrollo se produce una gran cantidad de Residuos Sólidos Urbanos, mismos que podrían utilizarse para la generación de biogás. (Vera, 2017)

Colombia tiene una línea política de estímulo al uso racional y eficiente de la energía y de fomento del uso de energías alternativas, definida en la Ley 697 de 2001 y regulada por una serie de normativas, entre las que se encuentra el Decreto 2688 de 2008 (que modifica el Decreto 3683 de 2003), que establece la Comisión Intersectorial para el Uso Racional y Eficiente de la Energía y de las Fuentes No Convencionales de Energía, CIURE, como ente asesor y de apoyo al Ministerio de Minas y Energía. El propósito del Programa PROURE es el fomento del Uso

Racional y Eficiente de la Energía y otras Formas No Convencionales de Energía, que contribuya a asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad de la economía colombiana, la protección del consumidor y la promoción del uso de las energías no convencionales de manera sostenible con el medio ambiente y los recursos naturales.

La reciente Ley 1715 de 2014 promueve el uso de fuentes de energía renovables no convencionales "FNCER" (y no renovables), así como la promoción de la inversión, la investigación y el desarrollo de tecnologías no contaminantes para la generación de energía; la eficiencia energética y la respuesta a la demanda en el ámbito de la política energética nacional. En concreto, se enfoca en el desarrollo de: energía a partir de biomasa forestal; reforestación energética; biomasa agrícola; energía a partir de residuos; energía solar; energía eólica; energía geotérmica; pequeñas centrales hidroeléctricas; y energía oceánica (Congreso de Colombia, 2014)

En la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña se cuenta con la granja experimental que produce cantidad de materia prima suficiente para que sea suministrado a un biodigestor para realizar diferentes pruebas o experimentos en laboratorios del programa de Ingeniería Mecánica. Con todo esto es viable tener la participación y contribución al uso racional y a la generación de energía utilizando los residuos orgánicos provenientes de la granja experimental ubicada en la sede algodonal, de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, junto a ello la generación de subproductos que se restituyen a la tierra como los son el compostaje resultado del proceso anaeróbico realizado en el biodigestor.

## **1.5 Hipótesis**

Este estudio está propuesto para obtener el diseño de un banco de pruebas que permita al programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña contar con un analizador de biogás para un biodigestor anaeróbico, que permita la visualización de las variables identificadas y la adquisición de datos del sistema.

## **1.6 Delimitaciones**

Las siguientes son las cuatro delimitaciones formuladas para el desarrollo de la investigación propuesta.

### ***1.6.1 Delimitación Geográfica***

El proyecto se realizará en la ciudad de Ocaña Norte de Santander, para la Universidad Francisco de Paula Santander, seccional Ocaña, en la granja experimental ubicada en la sede el algodonal.

### ***1.6.2 Delimitación Temporal***

Este trabajo de investigación tendrá una durabilidad de aproximadamente 10 semanas a partir de la fecha de aprobación del anteproyecto, tal y como se indica en el cronograma de actividades.

### ***1.6.3 Delimitación Conceptual***

Los términos que marcan la definición del presente trabajo son los siguientes: anaerobio, bacterias anaerobias, biodigestor, biogás, demanda química de oxígeno (dco), digestión anaerobia, efluente, energía alternativa, estequiometría, excretas, hidrólisis, metanogénesis, pH, pH-metro, temperatura, termopar.

### ***1.6.4 Delimitación Operativa***

El proyecto se desarrollará con base a su estructura y parámetros del documento, si en el proceso investigativo existe algún cambio que modifique su contenido será consultado con el director del proyecto y las personas que cooperan en la investigación, con el fin de cumplir los objetivos.

## Capítulo 2. Marco Referencial

### 2.1 Marco histórico

Para llevar a cabo la investigación se tendrá en cuenta algunos trabajos previos que se han realizado de la temática a tratar, siendo estas en gran parte el producto final de investigaciones académicas, de los cuales se hará mención a continuación de algunos autores que direccionaron sus investigaciones hacia esta problemática.

#### *2.1.1 Antecedentes a nivel internacional*

Durante el desarrollo de este proyecto se encontraron publicaciones extranjeras donde podemos identificar proyectos tangibles y una variedad de artículos y documentos publicados a nivel científico.

#### *2.1.2 Antecedentes a nivel nacional*

Realizando investigación para compilar la información, se obtuvieron escasos resultados de artículos publicado en revista nacionales, tesis de pregrado de los cuales se obtuvo los siguientes:

Estudio de factibilidad técnica y financiera de utilización de biomasa para suplir necesidades energéticas en el edificio bienestar universitario, realizado por Nelson Andrés Rodríguez Miranda, Universidad industrial de Santander, Bucaramanga, 2010.

Fundamentos para el diseño de biodigestores, realizado por Yesón Olaya arboleda  
Universidad nacional de Colombia sede Palmira, 2009.

### ***2.1.3 Antecedentes a nivel regional***

Luego de revisar la documentación existente de la universidad se encuentra una tesis de pregrado. A continuación, se presenta una descripción del trabajo de investigación, este trabajo de investigación hizo parte de nuestra base para el desarrollo de la investigación: *Diseño y construcción de un biodigestor anaeróbico para el aprovechamiento energético de la biomasa y uso experimental para la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña*. (Arango, 2012).

En el presente trabajo, la obtención de biogás a partir de desperdicios y residuos sólidos, como la biomasa en todas sus formas para el uso energético de este recurso, que son libres en la naturaleza y ocupan gran cantidad de volumen y tardan en degradarse al suelo y devolver los nutrientes que poseen, es muy atractivo para estos tiempos donde el calentamiento global y el consumo excesivo de energía por parte de la humanidad hacen que se innove y se busquen alternativas para mejorar las fuentes de energía limpias y renovables que sean sostenibles para la comunidad. Esta costumbre ha llevado a una serie de opciones de desarrollo para el uso óptimo de este recurso que parece tan insignificante pero que tiene grandes ventajas en su consecución.

## **2.2 Marco contextual**

El caso en estudio se llevará a cabo en las instalaciones de la Universidad Francisco de Paula Santander, seccional Ocaña, puntualizando la granja experimental ubicada en la sede el algodonal.

## **2.3 Marco conceptual**

### ***2.3.1 Anaerobia***

Es una fermentación en la cual una comunidad de microorganismos, que trabajan de forma sinérgica, se alimenta de materia orgánica y, en ausencia de oxígeno, es decir en condiciones anaeróbicas, generan biogás y bioabono como productos de su metabolismo. (Marchisio y BioEnergías Santa Fe, 2015)

### ***2.3.2 Aerobio***

Se denominan organismos aerobios o aeróbicos a los organismos que pueden vivir o desarrollarse en presencia de oxígeno diatómico. (Medline, 2018)

### **2.3.3 Bacterias anaeróbicas**

Organismos unicelulares que no necesitan de oxígeno en su metabolismo. (Medline, 2018)

### **2.3.4 Biogás**

Gas obtenido por la degradación anaerobia de residuos mediante bacterias, que se puede utilizar como combustible. (Soliva, 2011)

### **2.3.5 Biomasa**

Materia total de los seres vivos que viven en un lugar determinado, expresada en peso por unidad de área o volumen. Y es la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontaneo o provocado, utilizable como fuente de energía. (Leyva & Martínez, 2014)

### **2.3.6 Digestor**

Vasija fuerte de loza o metal, cerrada a tornillo, para separar en el baño de maría la gelatina de los huesos y el jugo de la carne o de otra sustancia. (Educalingo, 2019)

### **2.3.7 Biodigestor**

Es una cámara hermética donde se acumulan residuos orgánicos (vegetales o excremento de animales) mediante un proceso natural de bacterias (anaeróbicas) presentes en los excrementos que descomponen el material contenido en el metano y en fertilizante. (Ecured, 2019)

### **2.3.8 Digestión anaeróbica**

Proceso en el cual organismos unicelulares descomponen material biodegradable en ausencia de oxígeno. (Moeller & Tomasini, 2004)

### **2.3.9 Biodegradable**

Dicho de una sustancia: que puede ser degradada por acción biológica. (Comercialaviles, 2018)

### **2.3.10 Hidrolisis**

Descomposición de sustancias orgánicas e inorgánicas complejas. En otras más sencillas por acción del agua. (Ecured, 2014)

### **2.3.11 Ph**

Se refiere a la medida de la acidificación o de una solución. Se aproxima, pero nunca es igual a pH, el logaritmo negativo de la concentración molar de iones hidrógeno disueltos. Un bajo pH indica una alta concentración de iones hidrógenos, mientras que un pH indica una baja concentración. (Olmo, 2017)

### **2.3.12 Ph metro**

Aparato que consta de un electrodo que mide el diferencial de potencial dentro de una muestra y que se utiliza para medir la cantidad de iones hidrógenos de agua. (Gómez & Soria, 2002)

### **2.3.13 Poder calorífico**

Es la cantidad de energía que la unidad de masa de materia puede desprender al producirse una reacción química de oxidación. (Barrientos, Domínguez, & Guzmán, 2010)

### **2.3.14 Reactor**

Es un confinamiento donde se lleva a cabo la descomposición de forma anaeróbica de la biomasa, produciendo así el biogás. (Ministerio de energía, 2011)

### **2.3.15 Válvula de alivio**

Son válvulas diseñadas para liberar fluido cuando la presión intenta supera el umbral establecido. (Esacademic, 2011)

## **2.4 Marco teórico**

### **2.4.1 Biomasa**

La biomasa es la materia total de las especies que viven en determinado lugar dada en peso por unidad de área o volumen; en fines energéticos, es definida como la materia orgánica obtenida de un proceso biológico ya sea espontaneo o provocado utilizándose como fuente de energía. (Agudelo, Borge, & Perez, 2010)

Para seleccionar la biomasa se deben tener en cuenta los siguientes puntos.

- El contenido de sustancias orgánicas debe ser el apropiado para el tipo de fermentación elegido.
- El valor nutricional de la sustancia orgánica se relaciona directamente con el potencial de formación de biogás, por ende, se busca que sea lo más alto posible.
- El substrato debe estar libre de agentes patógenos que puedan inhibir el proceso de fermentación.
- El contenido de sustancias perjudiciales o toxicas debe ser controlado para permitir una tranquila evolución de la fermentación.

- Es importante que el resultado final del substrato (después de haber aprovechado la fermentación para generar biogás) sea un desecho utilizable como por ejemplo fertilizante. (Agudelo, Borge, & Pérez, 2010)

#### ***2.4.2 Tipos de biomasa***

La biomasa puede dividirse en residual, húmeda y seca. Dentro de la biomasa húmeda están todos los residuos derivados del tratamiento de agua residuales, el estiércol porcino y vacuno. La biomasa seca se clasifica según productivo que la expulsa, este tipo puede incluir residuos forestales, residuos agroindustriales, residuos de mataderos, lodos. Residuos sólidos urbanos y estiércol avícola. (Amézquita, Arango, & Camargo, 2012)

#### ***2.4.3 Composición del biogás***

La composición de Biogás se mide utilizando un aparato Geotech® modelo Gas Extraction Monitor 5000 (GEM5000) acoplado a una bomba peristáltica de ciclo dual, suministra un muestreo continuo para los valores de presión interna, dando resultados en porcentajes (%) por volumen de metano (CH<sub>4</sub>) dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), oxígeno (O<sub>2</sub>) y equilibrio (Bal) en partes por millón (ppm) de monóxido de carbono (CO) y sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S). Bal es un conjunto de gases que componen el biogás, que en su mayoría está compuesto por nitrógeno (N<sub>2</sub>), el principal componente del gas atmosférico. (Bustamante, 2007)

#### ***2.4.4 Gestión de biogás, ganado y estiércol***

La propiedad del ganado es un requisito previo para la participación en el PNB. En el pasado, el ganado también ha servido como fuente de riqueza, ahorros y trabajo animado para los hogares rurales. Sin embargo, con el pasar de los años, Camboya se ha alejado de una economía predominantemente agraria, con un rápido crecimiento de los empleos textiles que alejan a los jóvenes del trabajo agrícola. Además, los tractores para caminar de dos ruedas se han vuelto más disponibles. (Kooijman, 2015).

Estos factores han llevado a una disminución de la propiedad ganadera durante la última década. Los estudios de viabilidad realizados en 2004 estimaron que 0,5 millones de granjas podrían ser elegibles para biodigestores domésticos, es decir, granjas que poseen al menos dos vacas o cinco cerdos para producir suficiente estiércol para alimentar el proceso de biodigestión. (Cervi, 2011)

La gestión del estiércol también es un factor importante. Una evaluación de las posibles reducciones de emisiones de carbono de NBP encontró que los propietarios de ganado en las regiones seleccionadas valoraban el estiércol de cerdos y vacas y utilizaban mucho de lo que estaba disponible, ya sea en forma sólida o como bio-lodo, lo que indica que el manejo del estiércol para biodigestores no requeriría un gran cambio en sus prácticas estándar. La disminución de la propiedad de ganado podría reducir el mercado de NBP; sin embargo, se puede introducir y está en desarrollo un biodigestor más pequeño que requiera menos animales.

Una evaluación actualizada fi encuentra el mismo número de consumidores potenciales. (Pino & García, 2012)

#### ***2.4.5 Características del biogás***

Algunas de las características que deben ser tomadas en cuenta cuando se pretende suplir este energético por un convencional, ya que sus propiedades lo hacen únicos en su uso, debe tomarse en cuenta cambios a los quemadores y motores donde se realice la combustión. En cuento a los cambios se refiere se deben tener en cuenta también que el biogás es un gas equiválete y solo se puede remplazar comparativamente con el energético al remplazar. (Vera & Estrada, 2017)

#### ***2.4.6 Proceso de biodigestión***

El correcto manejo de los residuos orgánicos se logra a través de diferentes tratamientos que implican un reciclaje de estas materias orgánicas, transformándolas en productos con valor agregado. El reciclaje de materia orgánica ha recibido un fuerte impulso con el alto costo de los fertilizantes químicos, con la búsqueda de alternativas no tradicionales de energía, así como también, la necesidad de vías de descontaminación y eliminación de residuos. La población microbiana juega un importante papel en las transformaciones de estos residuos orgánicos especialmente si se considera que disponen de un amplio rango de respuestas frente a la molécula de oxígeno, componente universal de las células. Esto permite establecer bio-procesos

en función de la presencia o ausencia de oxígeno, con el objeto de tratar adecuadamente diversos residuos orgánicos. (Arango, 2012)

#### ***2.4.7 Digestión anaerobia***

La digestión anaeróbica es la degradación biológica u oxidación del material orgánico, donde interviene microorganismos específicos en ausencia de aire (oxígeno molecular). En este proceso el material a degradar se transforma en dos productos utilizables, el uno en un producto estable e inerte llamado biol y el otro en biogás con un alto contenido de metano, ambos productos de este proceso poseen cualidades energéticas. La degradación anaerobia interactúa diferentes grupos microbianos, haciendo un proceso complejo, pero de manera coordinada y secuencial para la degradación de la materia orgánica. (Reinaldo et al., 2010)

#### ***2.4.8 Etapas de la digestión Anaerobia***

Este ítem se detalla a continuación:

**2.4.8.1 Hidrólisis.** Esta es la etapa donde las proteínas, carbohidratos y grasas son transformados en compuestos solubles por acción de bacterias proteolíticas, celulíticas y lipolíticas, respectivamente. Esta etapa es fundamental para suministrar los compuestos orgánicos necesarios para la estabilización anaeróbica en forma que pueden ser utilizados por las bacterias responsables de las dos etapas siguientes. (Reinaldo et al., 2010)

**2.4.8.2 Acidogénesis.** Los compuestos solubles resultados de la primera etapa, son transformados por acción bacteriana en ácidos orgánicos simples volátiles, acetatos, amoniacos, hidrógeno y bióxido de carbono. Esta etapa la pueden llevar a cabo bacterias anaeróbicas o facultativas. (Reinaldo et al., 2010)

**2.4.8.3 Acetogénesis.** En esta etapa las bacterias acetogénicas interactúan con las Archaeas metanogénicas colaborando entre sí, a fin de transformar los ácidos grasos resultantes en los sustratos propios de la metanogénesis. (Reinaldo et al., 2010)

**2.4.8.4 Metanogénesis.** Finalmente, mediante la acción de las bacterias metanogénicas, el hidrogeno y parte de los acetatos, son transformados en metano y bióxido de carbono. El amoniacos se estabiliza en forma de sales de amonio, permaneciendo en esta forma todo el contenido original de nitrógeno de la materia orgánica, que está sometido al proceso de biodegradación anaeróbica. El metabolismo de estas bacterias es más lento, y son más sensibles a distintas condiciones ambientales. (Reinaldo et al., 2010)

#### ***2.4.9 Aspectos técnicos de la producción de biogás***

La digestión anaeróbica es un proceso microbiológico que ocurre naturalmente en el medio ambiente. En ausencia de oxígeno, la materia orgánica es degradada y convertida en metano por diferentes comunidades bacterianas a través de una serie de etapas metabólicas: hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis. En la primera etapa (hidrólisis), las moléculas complejas (p. ej. proteínas, carbohidratos y lípidos) se hidrolizan a compuestos solubles (p. ej.,

aminoácidos, azúcares, alcoholes y ácidos grasos de cadena larga) por bacterias hidrolíticas que utilizan enzimas extracelulares. En la segunda fase (acidogénesis), estos compuestos se transforman en ácidos grasos volátiles de cadena corta (p. Ej. gramo. ácido propiónico y butírico) y posteriormente en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. Finalmente, durante la última etapa (metanogénesis), las bacterias metalogénicas convierten el ácido acético en metano y dióxido de carbono. (Garfi, Castro, & Montero, 2018)

#### ***2.4.10 Contenido de Sólidos Sedimentables (S.S mL/L)***

Se observa que del 100 % de los S.S, el 80 % de los elementos precipitados lo constituyen sólidos biodegradables fermentables no degradados en su totalidad, provenientes de la materia fecal y el 20 % restante lo integran sólidos inertes como arcilla y arena procedentes de los escasos escurrimientos externos al sanitario. Esta composición es característica del agua cruda proveniente del sanitario de prueba, dicho influente se inyecta en un volumen aproximado de 0.02013 m<sup>3</sup>/día en C-1, su ingreso es por caída libre en forma intermitente originando una sedimentación inicial, lo que facilita la acumulación de sólidos, así como el aumento de lodos dentro del reactor, esto evita la pérdida de sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos suspendidos volátiles (SSV). (Sanchez, 2016)

#### ***2.4.11 Rellenos sanitarios***

En el caso de la evaluación de los Rellenos Sanitarios se observa que es más rentable, por tener una mayor producción de biogás, es el escenario óptimo. Sin embargo, esto no quiere decir que sea una alternativa económicamente atractiva, ya que el análisis del TRI muestra tiempos que rondan entre los diez y doce años, incluso cuando se consideran los BC. A su vez, para que los proyectos en general fueran técnica y económicamente más factibles, se propusieron Rellenos Sanitarios que concentraran más de una región y así obtener costos de inversión más bajos para reducir los TRI. (Vera & Estrada, 2017)

#### ***2.4.12 Desarrollo y construcción de biodigestores anaeróbicos para la producción de biogás***

Luego de optimizar las proporciones realizadas en botellas de penicilina, se iniciaron experimentos en biodigestores anaeróbicos.

Tendiendo a utilizar materiales simples, en primer lugar, se concibe el biorreactor y se fabricó un recipiente de vidrio con geometría cilíndrica, envuelto en acrílico con un volumen total de 7 L, cerrado herméticamente con un tapón de poliuretano. (Magaña & Rubio, 2011)

En este tapón se realizaron siete orificios, con un orificio central para el paso de la varilla agitadora y los otros para: salida de biogás, alojamiento de sensores de temperatura, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, pH, entrada y salida de material, y el resto cerrado y reservado para aplicación futura.

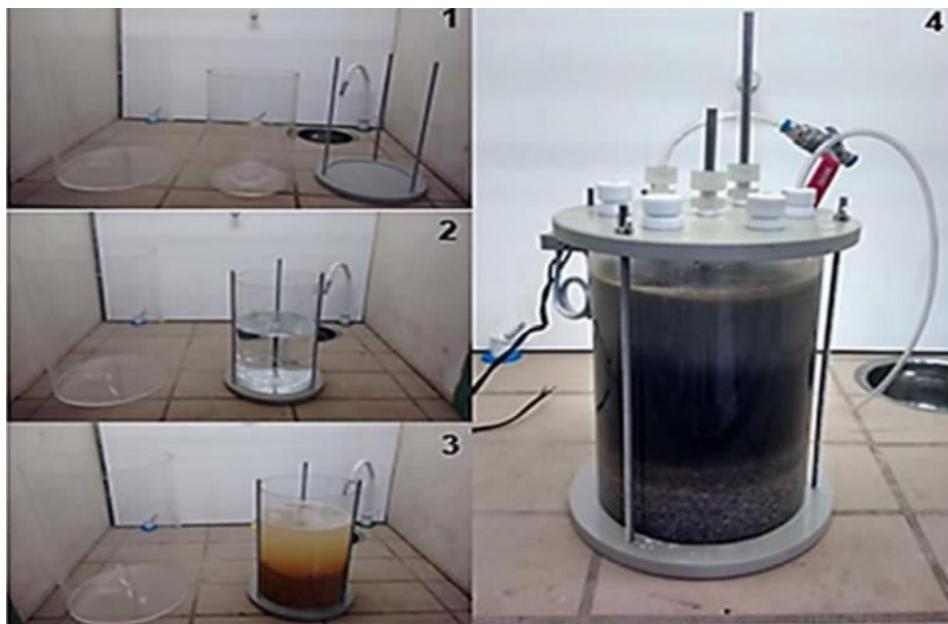
El sistema de calentamiento se basaba en un baño termostático, compuesto por un recipiente fabricado en acrílico y dimensionado para que pudiera albergar el biorreactor y el líquido del baño, una resistencia eléctrica vulgarmente conocida como “calentador corporal” y una bomba de agua, utilizada en el automóvil. boquilla de limpiaparabrisas, para la circulación del líquido del baño. (Magaña & Rubio, 2011)

El sistema de agitación se desarrolló utilizando un motor, comúnmente utilizado para hacer girar placas de microondas. Se eligió este tipo de motor por su bajo costo y su funcionamiento en baja rotación, lo que es preferible cuando se trata de biodigestores anaeróbicos. Se adjuntó al motor una varilla de agitación especialmente desarrollada para estos biodigestores.

El esquema de ensamblaje y la adición de materiales usados en los experimentos se muestran en la Figura 1; después de eso, se ajustó el pH antes de sellar para bloquear la entrada de oxígeno. (Magaña & Rubio, 2011)

**Figura 1**

*Esquema del ensamblaje y materiales de adición*



### ***2.4.13 Desarrollo de software para control y seguimiento***

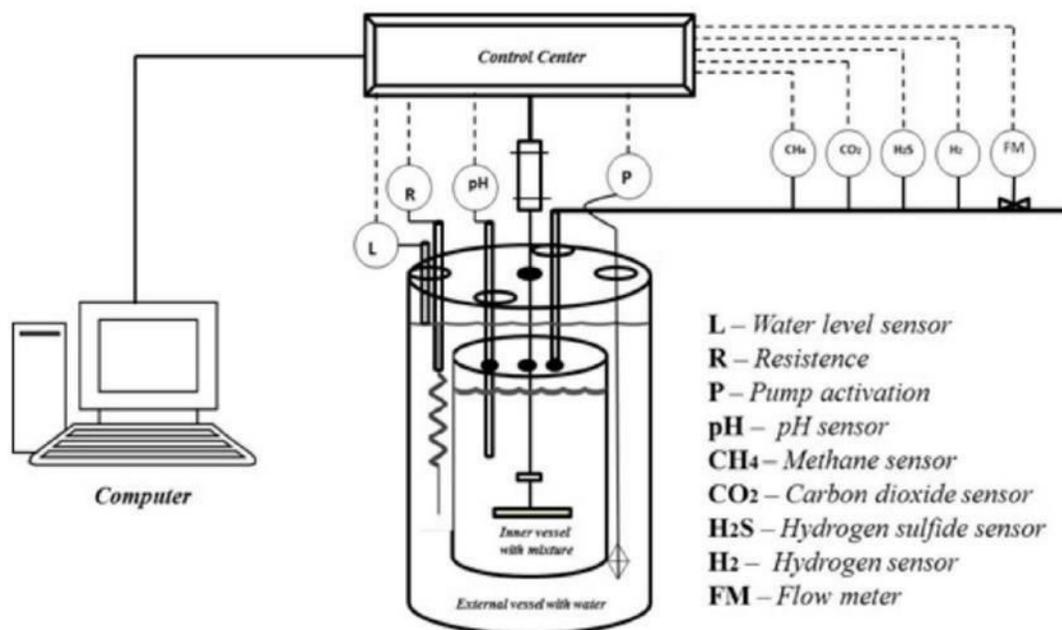
La unidad de control y automatización desarrollada consiste en un sistema provisto de control y controlador lógico programable (PLC), que se comunica con un software de supervisión. Este sistema fue completamente desarrollado: hardware de supervisión, firmware y software.

El hardware proyectado se puede dividir en las siguientes partes principales: microcontrolador para la Unidad Central de Procesamiento (CPU), comunicación entre microordenador-microcontrolador, módulos de potencia y módulos de acondicionamiento de señal de sensores destinados a cubrir las necesidades del sistema, convertidores digital-analógico (DAC) para los sensores, actuadores de alta potencia, motor de agitación y sistema de

comunicación con el microordenador. El software de control y automatización fue desarrollado a través de Microsoft Visual Studio 2012 utilizando programación orientada a objetos y lenguaje Visual Basic, teniendo como requisitos, definidos en su concepción, monitoreo de pH en línea, temperatura, control de activación de bomba de agua, motor de agitación, control de temperatura PID, recolectado almacenamiento de datos y análisis y visualización de parámetros monitoreados por acceso remoto. El esquema completo de funcionamiento del biodigestor se muestra en la Figura 2. (Bueno, 2010)

## Figura 2

*Sistema de control y automatización de un biodigestor*



#### **2.4.14 Temperatura ( $T^{\circ}\text{C}$ )**

La carga del biodigestor, se realiza durante varios meses. Las condiciones ambientales y la ausencia de dispositivos reguladores de temperatura en el sistema, pueden propiciar variaciones térmicas que afecten los mecanismos cinéticos del proceso, así como el rendimiento del sistema, considerando la estrecha dependencia de esta variable en los parámetros cinéticos. (Donoso, Ladera, & Martén, 2009)

En el transcurso del llenado del biodigestor se establece un rango específico de temperatura el cual favorece la presencia de poblaciones bacterianas específicas de bajas temperaturas, mismas que pueden verse afectadas ante cambios severos de la variable, modificando sus rutas de proceso, así como la reducción en la absorción y la biodegradación de los micro contaminantes. (Sánchez & Peón, 2016)

### **2.5 Marco legal**

Los fundamentos legales que soporta este proyecto van contemplados con la constitución política de Colombia, en la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña y normas internacionales.

**Constitución política de Colombia: Artículo 71.** La búsqueda del conocimiento y la expresión artística son libres. Los planes de desarrollo económico y social incluirán el fomento a las ciencias y, en general, a la cultura. El Estado creará incentivos para personas e instituciones

que desarrollen y fomenten la ciencia y tecnología y las demás manifestaciones culturales y ofrecerá estímulos especiales a personas e instituciones que ejerzan estas actividades.

**Universidad Francisco de Paula Santander: Acuerdo 065 de 1996.** El cual establece el estatuto estudiantil que es el regente actual en la institución.

**Artículo 140.** El estudiante podrá optar por una de las siguientes modalidades del trabajo de grado:

- a) Proyecto de Investigación.
  - ✓ Monografía.
  - ✓ Trabajo de Investigación: Generación o aplicación de conocimientos
  - ✓ Sistematización del conocimiento.
  
- b) Proyecto de Extensión.
  - ✓ Trabajo social
  - ✓ Labor de consultoría en aquellos proyectos en los cuales participe la Universidad.
  - ✓ Pasantía
  - ✓ Trabajo dirigido

**Parágrafo 1º.** El estudiante podrá optar como componente alterna al proyecto de grado, créditos especiales como cursos de profundización académica o exámenes preparatorios.

**Parágrafo 2º.** Para algunos Planes de Estudio y de acuerdo a sus características el Consejo Académico podrá obviar la presentación del trabajo de grado.

**Artículo 141.** El proyecto de grado incluye las siguientes etapas:

- a) Presentación del anteproyecto o plan de trabajo según corresponda a la modalidad del proyecto seleccionado.
- b) Desarrollo de la investigación o ejecución física del proyecto.
- c) Sustentación de la investigación y/o verificación o aval de la realización del proyecto.

**Parágrafo 3º.** Para todas las modalidades de proyecto de grado, el estudiante deberá presentar un informe final avalado por su director.

**Artículo 142.** Las condiciones y procedimientos para la presentación, desarrollo y evaluación de cada una de las modalidades de trabajo de grado, o sus componentes alternas, harán parte de la reglamentación específica de cada facultad, para cada plan de estudios.

**Parágrafo 4º.** La Universidad incorporará los trabajos de grado, como componente básico de su hacer y creará bancos de proyectos en los Departamentos Académicos y en la Vicerrectoría Asistente de Investigación y Extensión.

**Normas internacionales.** Protocolo De Kioto. El Protocolo de Kioto establece, reducir el total de sus emisiones de GEI (Gases Efecto Invernadero) a un nivel inferior en no menos de 5% al de 1990 en el período de compromiso, comprendido entre el año 2008 y el 2012. Para cumplir con el mismo se establecieron además de las reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero en Cada país, y del comercio de emisiones, otros mecanismos como la Aplicación Conjunta (AC) y el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).

Tras la ratificación por parte de Rusia en septiembre de 2004 el Protocolo de Kioto se convierte en Ley internacional. Este mecanismo ofrece a los gobiernos y a las empresas privadas de los países industrializados la posibilidad de transferir tecnologías limpias a países en desarrollo, mediante inversiones en proyectos de reducción de emisiones o sumideros, recibiendo de esta forma certificados de emisión que servirán como suplemento a sus reducciones internas.

Un proyecto en el marco del Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL o CDM en inglés) es un proyecto de reducción de emisiones o secuestro de carbono que se lleva a cabo en un país en desarrollo.

## **Capítulo 3. Diseño metodológico**

### **3.1 Tipo de investigación**

La presente investigación se desarrolla con un tipo de investigación cuantitativa con un enfoque descriptivo y tecnológico debido a que las actividades se realizan a través de la aplicación del método científico, está encaminada a descubrir nuevos conocimientos, a la que posteriormente se le buscan aplicaciones prácticas para el diseño o mejoramiento de un producto, proceso industrial o maquinaria y equipo.

Al concretar el tipo de energía apto para realizar la investigación, se debe evaluar que sea competitiva y económica. Esta proporción debe ser más grande que la proporción de una actual fuente de energía; ya que el sector energético es uno de los más importantes para la economía pues genera factores esenciales para todas las actividades productivas y bienes de consumo fundamentales para los hogares. Además, la agenda de desarrollo sustentable, ahora actualizada con la de economía verde y con la del cambio climático, sugiere la promoción de las energías renovables como una de sus estrategias cruciales. (Hernández, Tobón, & Vázquez, 2014)

### **3.2 Fases del proyecto de investigación**

Para el desarrollo de la presente investigación se establece las siguientes etapas para dar cumplimiento a los objetivos propuestos. De esta manera se describen a continuación las fases y actividades para la ejecución del proyecto:

### ***3.2.1 Fase I***

Identificar los parámetros de funcionamiento del biodigestor anaeróbico para la universidad Francisco de Paula Santander Ocaña. En esta fase se cumple con el primer objetivo específico para reconocer los conceptos teóricos para el funcionamiento del biodigestor.

### ***3.2.2 Fase II***

Desarrollar un instrumento virtual que permita la visualización para las variables identificadas y la adquisición de datos del sistema. En esta fase se cumple con el segundo objetivo específico para realizar el desarrollo de un V.I. para llevar el control del funcionamiento del biodigestor.

### ***3.2.3 Fase III***

Realizar la simulación en ANSYS del funcionamiento del biodigestor anaeróbico para el programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Francisco de Paula Santander. En esta fase se cumple con el tercer objetivo para mostrar el funcionamiento del biodigestor en ANSYS y SOLIDWORKS.

A continuación, se presenta la Tabla 1 denominada cuadro de actividades con el fin de describir cada una de las acciones implementadas para el desarrollo del proyecto de investigación.

**Tabla 1***Cuadro de actividades*

Actividades	M1	M2	M3	M4
<b>Fase I</b>				
Investigar los parámetros de control de funcionamiento del biodigestor.				
Describir los rangos y los diferentes parámetros de control para el funcionamiento del biodigestor.				
Describir los diferentes instrumentos de medición de cada parámetro de funcionamiento.				
<b>Fase II</b>				
Identificar los diferentes sensores para el registro de los parámetros de funcionamiento.				
Determinar los elementos necesarios para la medición de los parámetros del biodigestor, de acuerdo a los parámetros de funcionamiento.				
Diseñar el instrumento virtual (VI) con los parámetros de funcionamiento a medir a partir de las variables identificadas en el biodigestor.				
<b>Fase III</b>				
Realizar el diseño en SolidWorks del biodigestor a partir de las variables identificadas.				
Describir la mezcla que se realiza dentro del biodigestor.				
Determinar los parámetros de funcionamiento del biodigestor.				
Realizar la simulación a través de la herramienta computarizada ANSYS de acuerdo a los parámetros de funcionamiento del biodigestor.				
Describir la aplicación del biodigestor como banco de pruebas como estrategia pedagógica en el desarrollo de asignaturas del programa ingeniería mecánica.				

*Nota.* En la tabla se detalla cada una de las fases con sus correspondientes tiempos de ejecución.

### 3.3 Población

Realizando análisis de estudios anteriores se logra apreciar que la materia prima más utilizada en los biodigestores es el estiércol del ganado vacuno y del ganado porcino. La producción de biogás mediante digestión anaeróbica (DA) de estiércol y purines animales, así como de una amplia gama de desechos orgánicos digestibles, convierte estos sustratos en energía renovable y ofrece un fertilizante natural para la agricultura. Al mismo tiempo, elimina la fracción orgánica de las corrientes de residuos totales, aumentando así la eficiencia de la

conversión de energía mediante la incineración de los residuos restantes y la estabilidad bioquímica de los vertederos. (Jyothilakshmi & Prakash, 2016).

La población referida para el desarrollo del proyecto es la granja experimental de la universidad Francisco de Paula Santander seccional Ocaña, que cuenta con diferentes proyectos productivos definidos en la Tabla 2, en donde se describen los siguientes.

**Tabla 2**

*Población*

GANADO	HEMBRAS		MACHOS	
	CANTIDAD	PESO PROMEDIO(Kg)	CANTIDAD	PESO PROMEDIO(Kg)
VACUNO DE LECHE	24(ADULTAS)	500		
	8(NOVILLAS)	300		
	12(TERNERAS)	27		
PORCINO	21(CRIA)	80	1(REPRODUCTOR)	150
	8(LECHONES)	15	5(LECHONES)	15
			9(CEBA)	50
AVICOLA	1300(PONEDORA)	2		
	3000(POLLITA)	1.5		
CAPRINO	46(MAYORES A 1 AÑO)	100	4(REPRODUCTOR)	110
	16(MENORES A UN AÑO)	15	4(MENORES A UN AÑO)	15
			2(MAYORES A UN AÑO)	100

*Nota.* En la tabla se detalla la población a analizar.

### 3.4 Muestra

De acuerdo a la población de la granja experimental de la universidad Francisco de paula Santander seccional Ocaña, definida desde los proyectos porcino, vacuno de carne, vacuno de leche y caprino, se ha seleccionado para el desarrollo de la etapa III y funcionamiento del biodigestor las especies de ganado vacuno de leche y porcino. Considerando la muestra seleccionada se describe en la Tabla 3 el peso promedio y cantidades equivalentes a las especies pertenecientes a la granja experimental de la Universidad Francisco de paula Santander seccional Ocaña.

**Tabla 3**

*Población de la granja experimental*

GANADO	HEMBRAS		MACHOS	
	CANTIDAD	PESO PROMEDIO(Kg)	CANTIDAD	PESO PROMEDIO(Kg)
VACUNO DE LECHE	24(ADULTAS)	500		
	8(NOVILLAS)	300		
	12(TERNERAS)	27		
	21(CRIA)	80	1(REPRODUCTOR)	150
PORCINO	8(LECHONES)	15	5(LECHONES)	15
			9(CEBA)	50

*Nota.* La tabla muestra la población especie perteneciente a la granja experimental.

### **3.5 Técnicas de recolección**

#### ***3.5.1 Fuentes primarias***

Para la recolección de información necesaria para la etapa III del presente proyecto de investigación se aplican instrumentos como la entrevista a funcionarios encargados de los proyectos productivos de la granja experimental de la Universidad Francisco de Paula Santander seccional Ocaña. Lo anterior con el fin de organizar la información de la mezcla a utilizar a través del funcionamiento del biodigestor para que con dicha información se desarrolle la simulación a través de herramientas de cómputo.

#### ***3.5.2 Fuentes Secundarias***

La recolección de información secundaria se realiza a través de la revisión documental relacionada al tema de investigación, la cual se obtiene de las bases de datos suscritas de la Universidad Francisco de Paula Santander seccional Ocaña.

### **3.6 Procesamiento y análisis de la información**

Una vez obtenidos los datos necesarios para la elaboración del diseño, se procede a la programación y simulación a través softwares especializados, entre los cuales están: ANSYS y SolidWorks. Los cuales permiten un diseño optimo y seguro del biodigestor para dar cumplimiento a los objetivos planteados en la presente investigación.

### **3.6.1 Ansys**

ANSYS, Inc. Fue fundada en 1970 (Swanson Analysis Systems, Inc.) utilizando aproximadamente 1700 empleados. La mayoría con experiencia en elemento finito y dinámica de fluido computacional.

ANSYS desarrolla, comercializa y presta soporte a la ingeniería a través de software de simulación para predecir cómo funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno real. ANSYS continuamente desarrolla tecnología enfocada en la simulación y a través del tiempo ha adquirido otros softwares para ofrecer un paquete de aplicaciones que pueden ser unificadas para los problemas más complejos. Además, presta soporte a la industria.

ANSYS, Inc. es un software de simulación ingenieril. Está desarrollado para funcionar bajo la teoría de elemento finito para estructuras y volúmenes finitos para fluidos.

Para el desarrollo del proyecto se emplea la herramienta computarizada para el modelamiento con el fin de lograr la simulación del comportamiento de los parámetros de la mezcla en el biodigestor.

### **3.6.2 Solidwork**

SolidWorks es un software CAD (diseño asistido por computadora) para modelado mecánico en 2D y 3D, desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp., una filial de Dassault

Systemes (Suresnes, Francia), para el sistema operativo Microsoft Windows. Su primera versión fue lanzada al mercado en 1995 con el propósito de hacer la tecnología CAD más accesible.

El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. El proceso consiste en traspasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto. Posteriormente todas las extracciones (planos y ficheros de intercambio) se realizan de manera bastante automatizada.

## Capítulo 4. Presentación de resultados

A continuación, se presenta los resultados de cada una de las etapas realizadas para dar cumplimiento a los objetivos propuestos para el desarrollo del proyecto.

### 4.1 Identificación de los parámetros de funcionamiento del biodigestor anaeróbico

En esta fase se cumple con el primer objetivo específico para reconocer los conceptos teóricos para el funcionamiento del biodigestor. Es así como se hace el nexo de los conceptos teóricos y científicos correspondientes al problema planteado.

#### *4.1.1 Parámetros de control de funcionamiento del biodigestor*

El biodigestor anaerobio es un sistema de producción de biogás a partir de materia orgánica. Se desarrolla para instalarse en todas las comunidades que desea tener un biodigestor en sus hogares, con el fin de producir biogás para la cocción de sus alimentos. (Jiménez, 2012)

Dados los textos de investigación que se han estudiado se llega a determinar que los parámetros a tener en cuenta para monitorear y tener una mejor mezcla del biodigestor son: temperatura, presión y porcentaje de humedad (pH). (Jiménez, 2012)

De acuerdo a la investigación realizada se describe a continuación los parámetros a tener en cuenta al momento de diseñar un biodigestor. Al ver la evaluación de la mayoría de los

diseños existentes, se extrajo la información y se analizó qué es necesario tener en cuenta para diseñar un biodigestor y para su instalación. Existen tres factores principales que se deben tener en cuenta al realizar la estimación económica de la implementación de esta tecnología:

- ✓ Recolección de las materias primas, transporte y acondicionamiento.
- ✓ Almacenamiento del biogás, transporte y uso.
- ✓ Almacenamiento del efluente, transporte y uso.

Una vez definidos los parámetros de diseño se analiza la elección de la locación donde se ubicará el biodigestor es de gran importancia pues incidirá en el éxito o fracaso de la operación del sistema. Debe estar cerca del lugar donde se consumirá el gas, porque las presiones obtenibles dificultan el transporte a distancias mayores de 30 metros (dependiendo del biodigestor). Se debe encontrar cerca del lugar donde se genera la materia prima para evitar el transporte que tarde o temprano atentará contra una operación correcta del biodigestor, el implicará mayores costos. (Jiménez, 2012)

Debe estar en un lugar cercano al de almacenamiento del efluente digerido y con una pendiente adecuada para facilitar el transporte y salida del mismo. Debe ubicarse preferentemente protegido de vientos fríos y donde se mantenga relativamente estable la temperatura, tratando de que reciba el máximo de energía solar (sobre todo en invierno). Si el digestor es de material y está enterrado debe estar a por lo menos 10 – 15 metros de cualquier fuente de agua para evitar posibles contaminaciones. (Jiménez, 2012)

En lo referente a las características técnicas, los rangos óptimos de temperatura de trabajo son entre 20 y 60 °C, (Lockett, 1997) obteniendo un máximo de producción en el rango mesofílico de trabajo de las bacterias, que se encuentra entre los 30 y 50 °C. Como precaución se opta trabajar entre los 40 y 45 °C para obtener una elevada producción de biogás y a la vez evitar trabajar en temperaturas superiores donde se encuentra el límite tolerable de las bacterias. (Reuni & Vol, 2019)

Otros de los parámetros según (Reuni & Vol, 2019) necesarios para optimizar la producción de biogás son:

- ✓ pH alrededor de 7.
- ✓ Ausencia de oxígeno.
- ✓ Gran nivel de humedad mezcla composición de sustrato en 50% materia seca y 50% agua.
- ✓ Removedor interno.
- ✓ Alimentación constante.
- ✓ Ausencia de inhibidores de la acción bacteriana (por ejemplo, cobre). (Reuni & Vol, 2019)

El intervalo de pH óptimo para el crecimiento de los metanógenos es de 6.8 a 7.5, el cual tiene influencia en la actividad enzimática. El intervalo óptimo del potencial de óxido-reducción es inferior de 350 mV.

Para el caso del sustrato se debe tener en cuenta la disponibilidad. La C/N que se recomienda es de 25 a 30:1, aunque ha habido una gran contradicción por los diferentes sustratos que se pueden utilizar. El contenido máximo de sólidos volátiles es de 8 % y el TRH, para el caso de biodigestores tipo discontinuo, de 8 semanas. (Jiménez, 2012)

#### ***4.1.2 Descripción de los rangos y parámetros de control para el funcionamiento del biodigestor***

Entre los factores de funcionamiento del biodigestor, se describen los parámetros importantes como los descritos a continuación:

**Temperatura.** Según (Madigan et al, 2004), “la temperatura en el interior y el exterior del biodigestor, es uno de los factores más importantes que afectan el crecimiento y la supervivencia de los microorganismos, ya que a temperaturas muy altas o muy bajas no crecerán. Pero los valores absolutos de estas temperaturas mínimas o máximas varían según los diferentes tipos de microorganismos y de los hábitats a los cuales pertenecen”.

Es de señalar que en el intervalo de 15 a 40°C las bacterias mesófilas completan su ciclo biológico, con una temperatura ideal de 35°C. Para las bacterias termófilas el intervalo es de 35 a 60°C, con una temperatura ideal de 55°C. Por lo tanto, la temperatura dentro del reactor debe estar en el intervalo soportado por los distintos microorganismos (20-55°C).

Específicamente las bacterias metanogénicas, son más sensibles a los cambios de temperatura que los otros microorganismos del digestor, debido a que la velocidad de crecimiento de los otros grupos bacterianos es mayor que la de las metanobacterias. Todos los microorganismos presentes en el biodigestor pueden resistir cambios variables de temperatura hasta un lapso de dos horas aproximadamente, y pueden retornar rápidamente a los ritmos normales de producción de gas cuando la temperatura se restablece (Watson, 2010)

**El pH.** Cada organismo tiene un rango de pH dentro del cual es posible el crecimiento y normalmente posee un pH óptimo bien definido. La mayoría crecen en un margen de pH de 2-3 unidades. Generalmente los ambientes naturales tienen un valor de pH entre 5 y 9, y los organismos con pH óptimos de este orden son los más comunes. Sólo unas cuantas especies pueden crecer por debajo de 2 o por encima de 10 (Madigan et al, 2004).

La Tabla 4 describe las variables del pH en la producción del biogás y sus efectos de acuerdo a los rangos de variación en los que interactúa el PH.

**Tabla 4**

*Presupuesto*

<b>EFFECTOS DEL pH EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGAS</b>	
<b>Valor de pH</b>	<b>Efecto</b>
7.0-7.2	Optimo
$\geq 6.2$	Retarda la acidificación
$\leq 7.6$	Retarda la armonización

*Nota.* La tabla detalla los rangos en los que interactúa el pH. Fuente: (Madigan et al, 2004).

**El Tiempo de Retención.** Este se define según Soria et al., (2001) como el tiempo promedio que tarda la materia orgánica en ser degradada por los microorganismos. Debido a que el proceso de producción de gas es lento, mientras más tiempo estén las sustancias descargadas en el biodigestor, mayor será la producción de gas en términos absolutos por unidad de sustrato. Hay dos índices para identificar la retención de las sustancias en el digestor. (Domínguez & Ly, 2005).

El tiempo de retención de los sólidos biológicos (TRS) se determina al dividir el monto de materia orgánica (MO) o de sólidos volátiles (SV) cargados en el digestor, entre la cantidad de MO que sale del sistema diariamente. Se asume que el TRS representa el tiempo de retención promedio de los microorganismos en el digestor. El tiempo de retención hidráulico (TRH) es la proporción entre el volumen del reactor o digestor, dividido por la carga diaria. Estos índices son importantes en los digestores de última generación (Domínguez & Ly, 2005).

Según Hilbert (2002), el tiempo de permanencia de la biomasa dentro del digestor estará dado por el cociente entre el volumen de la cámara de digestión y el de la carga diaria. Dicho valor no es exacto debido a que la parte del material introducido puede salir en un período más corto. De igual forma, dependen del tipo de sustrato, de la temperatura de operación, y de los parámetros físicos del biodigestor (volumen), aparte presentan una relación directa con la estabilización del sistema y con la carga contaminante a remover (Osorio et al., 2007).

De manera complementaria se anexa la Tabla 5, en donde se describe los tiempos de retención y sus características.

**Tabla 5***Tiempo de retención*

<b>Tiempo de Retención Hidráulico</b>	<b>Características</b>
30 – 40 días	Clima tropical con regiones planas. Ej: indonesia, Venezuela, América central
40 – 60 días	Regiones cálidas con inviernos fríos cortos. Ej: India, Filipinas, Etiopía.
60 – 90 días	Climas templados con inviernos fríos. Ej: China, Corea, Turquía.

*Nota:* La tabla detalla los rangos de retención en relación a los climas. Fuente: (Osorio et al., 2007).

**La Demanda Química de Oxígeno (DQO).** El DQO se expresa como la cantidad de oxígeno total consumido por la oxidación química de la porción de materia orgánica en el agua que se puede oxidar por un oxidante químico fuerte como el dicromato de potasio (Okafor, 2007). Este parámetro se usa para medir el potencial contaminante de las aguas residuales, ya que se basa en la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica degradable, así como también los restos de materiales fibrosos, ligninas y otros. (Soria et al., 2001),

Por lo tanto, la presencia de DQO altos indica que existe una carga importante de componentes orgánicos que no son degradados biológicamente, por lo cual la persistencia de estos componentes en el ambiente será mayor. Contrariamente a lo anterior, las DQO bajas implican que la actividad de los microorganismos, así como las condiciones del ambiente anaerobio, fueron responsables de la degradación, reduciendo su actividad y con ellos el consumo de oxígeno (Soria et al., 2001), representando aguas poco contaminadas.

**La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).** Esta técnica de acuerdo con Okafor (2007), representa la cantidad requerida de oxígeno, en mg/l, para estabilizar o descomponer la materia orgánica contenida en el agua residual, por medio de microbios aeróbicos durante un período de cinco días a 20°C. Además, este método fue desarrollado debido a la complejidad de los materiales orgánicos introducidos en el agua y también por el papel dominante que juega el oxígeno en el apoyo de las bacterias aerobias que degradan la materia orgánica.

**El Material de Carga.** Es toda aquella materia que se utiliza para la fermentación, principalmente los desechos orgánicos que se introducen dentro de un biodigestor para su degradación. También se pueden usar aguas residuales, las cuales se muestrean y se analizan para determinar la eficiencia del funcionamiento del sistema de tratamiento (Okafor, 2007). Es muy indispensable que la relación óptima de carbono/nitrógeno (C/N) sea de 30:1, ya que las pérdidas de nitrógeno asimilable, pueden reducir la calidad del material digerido. Por el contrario, si la relación es muy amplia por ejemplo 40:1, se inhibe el crecimiento debido a falta de nitrógeno. El porcentaje óptimo de sólidos en la mezcla a digerir es de 7 a 9 y se consigue al diluir el material orgánico con agua (Soria et al., 2001).

Otro factor importante para determinar la cantidad de materia orgánica que se encuentra dentro del biodigestor son los sólidos totales, que se refieren a la materia suspendida o disuelta en agua o aguas residuales, y se relacionan con la conductancia específica y la turbiedad. Los sólidos totales (también llamados residuo total) son el término usado para describir a la materia después de la evaporación y de la sequedad de una muestra de agua. En estos se incluyen ambos sólidos suspendidos totales, los cuales son la porción de agua que pasa a través de un filtro de

fibra de vidrio menor de 6 micrómetros. Otro factor significativo son los sólidos suspendidos volátiles (SSV), los cuales son los sólidos (mg/l) que se pueden oxidar para proveer gas a 550°C. La mayoría de los compuestos orgánicos se oxidan a CO<sub>2</sub> y a H<sub>2</sub>O en esa temperatura y los compuestos inorgánicos permanecen como ceniza (Okafor, 2007). Según Osorio y colaboradores (2007) los SSV constituyen el 80% de los sólidos totales, y están conformados principalmente por un 30% de compuestos de C, 5% de N, y un 65% de H, O, S.(Watson, 2010)

#### ***4.1.3 Descripción de los diferentes instrumentos de medición de cada parámetro de funcionamiento***

En la biodigestión anaerobia del material de carga requiere de condiciones para la generación de biogás, a su vez también se deben monitorear y vigilar que los parámetros estén en los rangos óptimos para el funcionamiento de este.

Los factores que intervienen en la producción de biogás en cada una de las etapas del ciclo metabólico que involucran el grupo de bacterias que responden a cambios y retrasos en el proceso se deben controlar para tener una producción de biogás de forma precisa.

**Medidores de Temperatura.** Los procesos anaeróbicos, al igual que muchos otros sistemas biológicos, son fuertemente dependientes de la temperatura. La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que, a su vez, dependen de la temperatura.

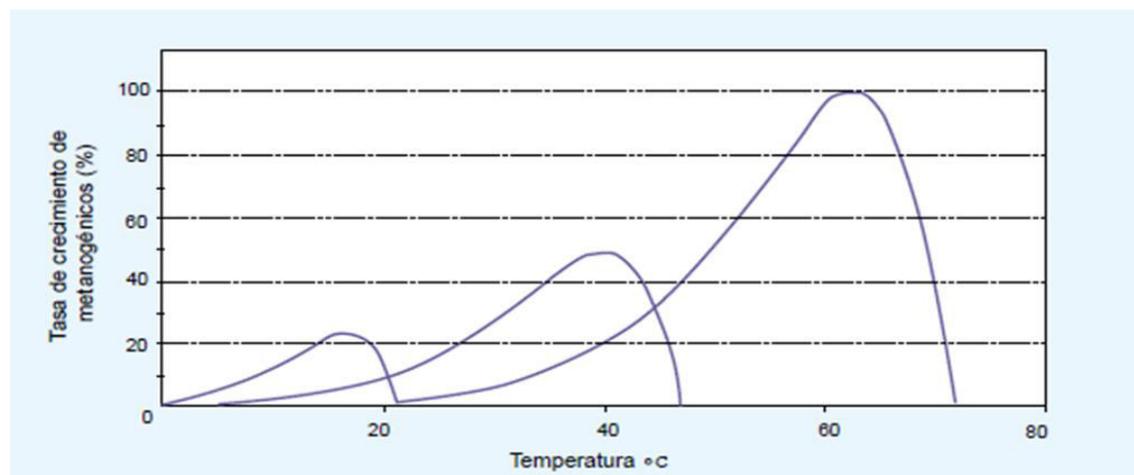
A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás.

Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos: psicrófilos (por debajo de 25°C), mesófilos (entre 25 y 45°C) y termófilos (entre 45 y 65°C), siendo la velocidad máxima específica de crecimiento ( $\mu_{max}$ ) mayor, conforme aumenta el rango de temperatura.

Dentro de cada rango de temperatura, existe un intervalo para el cual dicho parámetro se hace máximo, como se muestra en la Figura 3, determinando así la temperatura de trabajo óptima en cada uno de los rangos posibles de operación. En la figura 3, se puede observar (FAO et al., 2011)

### Figura 3

*Tasa de crecimiento relativo de microorganismos psicrófilicos, mesofílicos y termofílicos*



*Nota.* Datos tomados de (FAO et al., 2011).

Y en la Tabla 6, se detalla los rangos y demás características presentadas, para los tiempos de retención relacionados con la fermentación de la mezcla.

**Tabla 6**

*Tiempo de retención*

<b>FERMENTACION</b>	<b>MINIMO</b>	<b>OPTIMO</b>	<b>MAXIMO</b>	<b>TIEMPO DE FERMENTACION</b>
<b>Psycrophilica</b>	4 - 10 °C	15 - 18 °C	20 - 25 °C	Sobre 100 días
<b>Mesophilica</b>	15 - 20 °C	25 - 35 °C	35 - 45 °C	30 – 60 días
<b>Thermophilica</b>	25 - 45 °C	50 - 60 °C	75 - 80 °C	10 – 15 días

*Nota:* En la tabla se detalla los datos relacionados a la fermentación. Fuente: (FAO et al., 2011)

Para monitorear la temperatura se describe para el proyecto el uso de medidores de temperatura como los citados a continuación:

- ✓ Termocupla PT100
- ✓ Termómetro PCE-ST 1
- ✓ Termómetro PCE-IR 100

**Medidores de Ph.** El proceso anaeróbico es afectado adversamente con pequeños cambios en los niveles de pH (que se encuentran fuera del rango óptimo). Los microorganismos metanogénicos son más susceptibles a las variaciones de pH que los otros microorganismos de la comunidad microbiana anaeróbica. (Jiménez, 2012)

Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso de digestión anaeróbica presentan unos niveles de actividad óptimos en torno a la neutralidad. El óptimo es entre 5.5 y

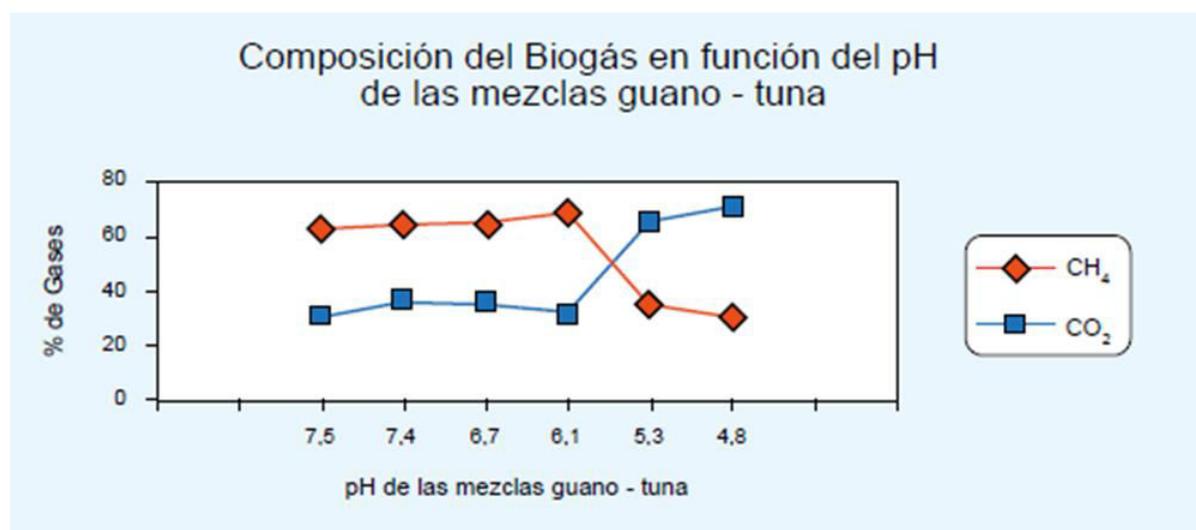
6.5 para acidogénicos y entre 7.8 y 8.2 para metanogénicos. El pH óptimo para cultivos mixtos se encuentra en el rango entre 6.8 y 7.4, siendo el pH neutro el ideal. (Jiménez, 2012)

Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6.0 ni subir de 8.0. El valor del pH en el digestor no sólo determina la producción de biogás sino también su composición (Figura 4). Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas.

Debido a que la metanogénesis se considera la etapa limitante del proceso, es necesario mantener el pH del sistema cercano a la neutralidad. Los acidogénicos son significativamente menos sensibles a valores más extremos de pH. (FAO et al., 2011)

#### Figura 4

*Composición del biogás en función del pH de la mezcla de materias primas*



*Nota.* Datos tomados de (FAO et al., 2011).

**Presión.** Es la fuerza que ejerce un fluido por unidad de área. La presión solo se emplea cuando se trata de un gas o un líquido. La contraparte de la presión en los sólidos es el esfuerzo.

Para seleccionar el espesor de la membrana, es necesario conocer el valor de la presión interna que ejerce sobre las paredes de biodigestor, tomando en cuenta que un 75% aloja la parte líquida y el 25% de la parte gaseosa.

**Medidores de presión.** Los medidores de presión que se pueden utilizar en el funcionamiento del biodigestor son:

- ✓ PCE-DMM 70
- ✓ GD4200-USB
- ✓ PR3860

#### **4.2 Desarrollo de un instrumento virtual que permite la visualización para las variables identificadas y la adquisición de datos del sistema**

En esta fase se crea un V.I. para llevar el control del funcionamiento del biodigestor. Es así como en este segundo propósito del proyecto se realiza el diseño y desarrollo de la estrategia de control PID que controla el nivel de líquido del sistema de almacenamiento.

### 4.2.1 Sensores para el registro de los parámetros de funcionamiento

En esta primera actividad de la segunda fase vamos a determinar los sensores y elementos para la toma de datos del biodigestor.

**Temperatura.** Para la toma de temperatura debemos tener en cuenta la temperatura máxima y mínima del biodigestor, y así poder seleccionar los sensores adecuados, las cuales se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7**

*Sensores de temperatura*

SENSOR	TIPO	TEMPERATURA	TEMPERATURA
		MAXIMA	MINIMA
<b>Termocupla PT100</b>	Class A	400 °C	-50 °C
<b>Termómetro PCE-ST 1</b>	IP65	250 °C	-40 °C
<b>Termómetro PCE-IR 100</b>	Tipo K	220 °C	-33 °C

*Nota.* En la tabla se detalla la información de los sensores.

**pH (Porcentaje de Humedad).** En la toma de porcentaje de humedad tomaremos en cuenta el proceso para el que se a utilizar, ya que hay sensores que el tiempo de respuesta no es el esperado.

Un pH metro o medidor de pH es un instrumento científico que mide la actividad del ion hidrógeno en soluciones acuosas, indicando su grado de acidez o alcalinidad expresada como pH. El medidor de pH mide la diferencia de potencial eléctrico entre un electrodo de pH y un electrodo de referencia.

Esta diferencia de potencial eléctrico se relaciona con la acidez o el pH de la solución. El medidor de pH se utiliza en muchas aplicaciones que van desde la experimentación de laboratorio hasta control de calidad, reflejando los detalles en la Tabla 8.

**Tabla 8**

*Sensores de pH*

Sensor	Numero de diafragma	Rango	Resistencia a la presión (psi)
InPro 4010	2	2 - 12	29 psi/140 °F
HF405-DXK-S8	2	2 - 14	232 psi/77 °F; 87 psi/212 °F
InPro 4501VP	unión anular abierta	1 - 14	0...100 psi hasta 150 °F, 50 psi a 212 °F

*Nota:* En la tabla se detalla la información de los sensores de pH.

**Presión.** Para la selección del sensor en la toma de presión tendremos en cuenta el rango de presión, como se reflejan en la Tabla 9.

**Tabla 9**

*Medidores de presión*

Sensor	Rango de Presión
GD4200-USB	5,000 br
PR3860	400 br
PCE-DMM 70	1250 br

*Nota.* En la tabla se detalla la información de los medidores.

#### ***4.2.2 Elementos necesarios para la medición de los parámetros del biodigestor, de acuerdo a los parámetros de funcionamiento***

En esta actividad para determinar los elementos necesarios de medición de cada parámetro debemos revisar entre los sensores que enumeramos en la actividad uno (5.2.1), cual es el más factible tanto en costo como optimo en el trabajo que prestara. En la Tabla 10 se desglosa los tipos de sensores.

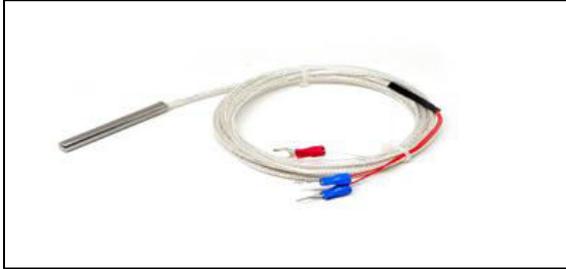
**Tabla 10**

*Temperatura*

<b>SENSOR</b>	<b>TIPO</b>	<b>TEMPERATURA MAXIMA</b>	<b>TEMPERATURA MINIMA</b>
<b>Termocupla PT100</b>	Class A	400 °C	-50 °C
<b>Termómetro PCE-ST 1</b>	IP65	250 °C	-40 °C
<b>Termómetro PCE-IR 100</b>	Tipo K	220 °C	-33 °C

*Nota:* En la tabla se detalla la información de los medidores de temperatura.

**Termocupla PT100.** La PT100 es un sensor de temperatura particular RTD (dispositivo termo-resistivo). Este sensor consta de un alambre de platino que a 0°C tiene 100 ohms y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. Este se muestra en la Figura 5.

**Figura 5***Termocupla PT100*

*Nota.* Datos tomados de (Mettler Toledo, 2018).

El incremento de la resistencia no es lineal, pero si creciente y característico del platino. Puede tomar muestras de temperatura de hasta 400°C.

**Termómetro PCE-ST 1.** El termómetro de contacto PCE-ST 1 es un termómetro digital de mano para medir en el sector alimenticio, por ejemplo, carne, embutidos, quesos, tomate, etc., pues está equipado con una sonda de acero inoxidable de 120 mm. Este termómetro, mostrado en la Figura 6, es de contacto, por ello destaca por su manejo sencillo, las dimensiones reducidas y su breve tiempo de respuesta.

**Figura 6***Termómetro PCE-ST 1*

Nota. Datos tomados de (Mettler Toledo, 2018).

**Termómetro PCE-IR 100.** El termómetro de aguja de la Figura 7, utilizado para alimentos combina la velocidad, el manejo confortable y la precisión a la hora de medir la temperatura superficial sin contacto con un termómetro de aguja de hincado que se utiliza para determinar la temperatura nuclear.

El termómetro de aguja para alimentos PCE-IR 100 permite un control rápido y preciso de la temperatura superficial sin riesgo de contaminaciones y ofrece la posibilidad adicional de determinar la temperatura interna de los alimentos.

**Figura 7***Termómetro PCE-IR 100*

*Nota.* Datos tomados de (Mettler Toledo, 2018).

Al analizar cada uno de los diferentes sensores de temperatura se llega a la conclusión de usar la termocupla PT100 ya que es de menor costo y maneja rangos de temperatura altos. En la Tabla 11 se aprecia los porcentajes de humedad en relación a los sensores.

**Tabla 11***Porcentaje de Humedad*

<b>Sensor</b>	<b>Numero de diafragma</b>	<b>Rango</b>	<b>Resistencia a la presión (psi)</b>
InPro 4010	2	2 - 12	29 psi/140 °F
HF405-DXK-S8	2	2 - 14	232 psi/77 °F; 87 psi/212 °F
InPro 4501VP	unión anular abierta	1 - 14	0...100 psi hasta 150 °F, 50 psi a 212 °F

*Nota.* En la tabla se detalla la información de los sensores.

**InPro 4010.** El sensor de pH InPro4010 económico y de mantenimiento mínimo, se usa dentro de los procesos estándares como en las empresas de tratamiento de agua residual. En la Figura 8 se muestra un modelo de ello.

### Figura 8

*InPro 4010*



*Nota.* Datos tomados de (Mettler Toledo, 2018).

**HF405-DXK-S8.** Es un electrodo de pH resistente a la presión y de mantenimiento mínimo, diseñado especialmente para mediciones más eficaces en medios con contenido de HF. Un modelo de lo anterior se muestra en la Figura 9.

**Figura 9***HF405-DXK-S8*

*Nota.* Datos tomados de (Mettler Toledo, 2018).

**InPro 4501VP.** Es un electrodo resistente de pH con mango de PVDF (polivinilideno fluoruro), sensor de temperatura incorporado y solución de tierra con diagnóstico para aplicaciones químicas y altos índices de flujos de paso, este se muestra en la Figura 10.

**Figura 10***InPro 4501VP*

*Nota.* Datos tomados de (Mettler Toledo, 2018).

Analizando las características de cada sensor, se llega a la determinación de escoger el sensor de pH InPro 4010, debido que es el que más se adapta nuestras condiciones. Por ello, en la Tabla 12 se detalla cada una de las características.

**Tabla 12***Presión*

<b>Sensor</b>	<b>Rango de Presión</b>
GD4200-USB	5,000 br
PR3860	400 br
PCE-DMM 70	1250 br

*Nota.* En la tabla se detalla los rangos de presión de cada uno de los sensores.

**GD4200-USB.** Tiene una conexión instantánea con detección automática y se configurará automáticamente con su computadora de escritorio, computadora portátil o tableta Windows a través del protocolo USB, como se detalla en la Figura 11.

La frecuencia de muestreo permite medir presiones dinámicas con una resolución de hasta 21 bits a velocidades seleccionables por el usuario de hasta 1.000 Hz. Para el análisis en tiempo real, los datos transferidos a la PC se logran sin pérdida de precisión o ancho de banda.

### Figura 11

*GD4200-USB*



*Nota.* Datos tomados de (Mettler Toledo, 2020).

**PR3860.** Robusto construido de acero inoxidable, el transmisor de presión PR3860 permite una medición precisa de la presión a temperaturas elevadas, detallado en la Figura 12. Las opciones de salida incluyen 0-5 Vcc, 0-10 Vcc y 0-20 mA. Este transmisor es adecuado para su uso a temperaturas de hasta 250 ° C. Las aplicaciones típicas incluyen procesamiento de alimentos, productos farmacéuticos y petroquímicos.

**Figura 12***PR3860*

*Nota.* Datos tomados de (Mettler Toledo, 2017).

**PCE-DMM 70.** El sensor de presión es un medidor de precisión para la comprobación de fugas. El sensor de presión ha sido diseñado especialmente para la comprobación de fugas en redes de distribución, como se observa en la Figura 13.

**Figura 13***PCE-DMM 70*

*Nota.* Datos tomados de (Mettler Toledo, 2018).

Es posible separar la pantalla del sensor de presión. Los valores de medición se almacenan en la memoria interna.

Tomando en cuenta las características y el uso que se le va a dar el sensor, decidimos trabajar con el PCE-DMM 70 ya que es de menor costo y cuenta con los rangos necesarios para el trabajo a realizar.

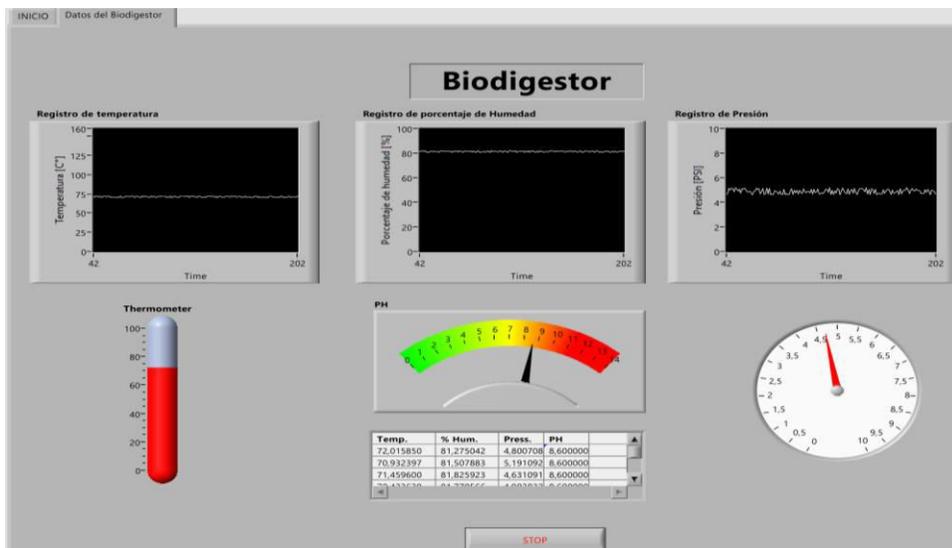
#### ***4.2.3 Diseño del instrumento virtual (VI) con los parámetros de funcionamiento a medir a partir de las variables identificadas en el biodigestor***

En el desarrollo de esta actividad se realizó el instrumento virtual (VI), utilizando el software LabVIEW. El VI permite monitorear la presión, temperatura y porcentaje de humedad. A continuación, en la figura 14, se presenta el panel frontal desarrollado, el cual funciona como una interfase gráfica de usuario, con este se puede llevar un registro en tiempo real del comportamiento de las variables que intervienen en el proceso de generación de bio-gas.

Adicionalmente se lleva un registro en formato tipo build table en el cual se guardan los datos de temperatura, humedad, presión y pH.

Figura 14

*Panel frontal desarrollado*

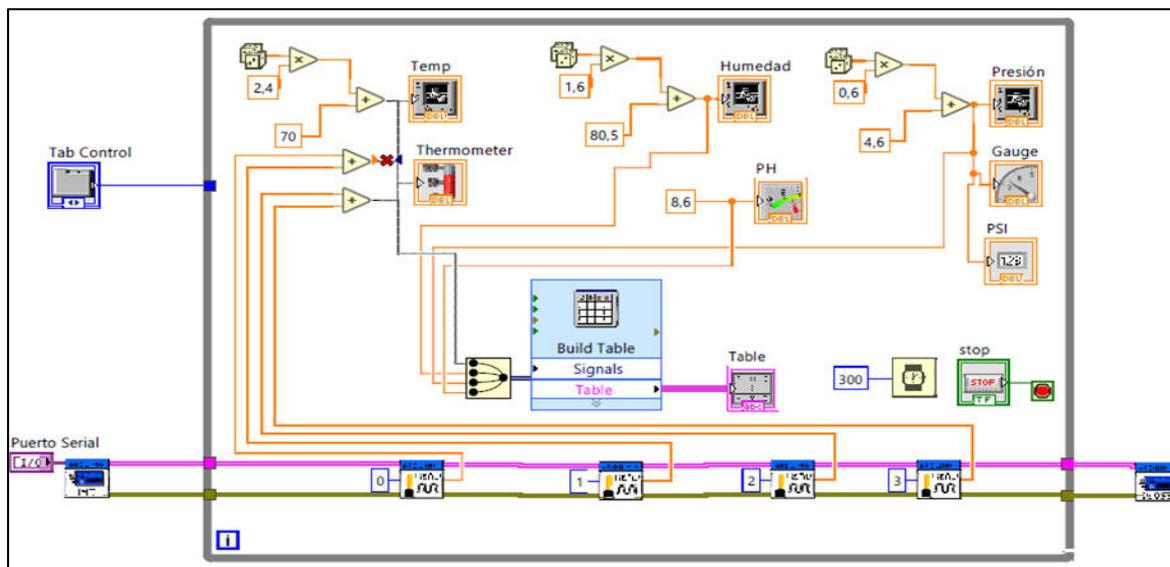


A continuación, en la Figura 15, se puede observar en el diagrama de bloques, la estructura interna de la programación orientada a objetos o bloques, con los cuales se controla la adquisición de datos, la visualización y el registro de las variables.

En el diagrama se muestra la interface de Arduino para la adquisición de datos y el almacenamiento de estos en la Build Table.

Figura 15

Diagrama de bloques



### 4.3 Simulación en ANSYS del funcionamiento del biodigestor anaeróbico

En el desarrollo de la fase tres se plantea para el diseño de un banco de pruebas como analizador de biogás para un biodigestor anaeróbico, realizar la simulación a través de la herramienta especializada ANSYS para visualizar parámetros físicos en el funcionamiento del biodigestor.

Es así como en la Tabla 14 me muestra el resumen de las características obtenidas para el tanque del biodigestor y de esta manera realizar el diseño en Solidwork.

**Tabla 13**

*Cuadro resumen de características del tanque del biodigestor*

<b>Característica</b>	<b>Medida</b>
Diámetro Interior	0,57m
Altura Interior	0,86m
Espesor del tanque	0,008m
Volumen de trabajo	307,90L
Motor	0,5hp

*Nota.* En la tabla se detalla las características obtenidas para el diseño.

#### ***4.3.1 Diseño en SolidWorks del biodigestor a partir de las variables identificadas***

En esta actividad se realizó en diseño del biodigestor en el software de SolidWorks, tomamos las medidas obtenidas en el proyecto anterior (“Diseño y construcción de un biodigestor anaeróbico para el aprovechamiento energético de la biomasa y uso experimental para la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña”) y pasamos a realizar cada una de las partes.

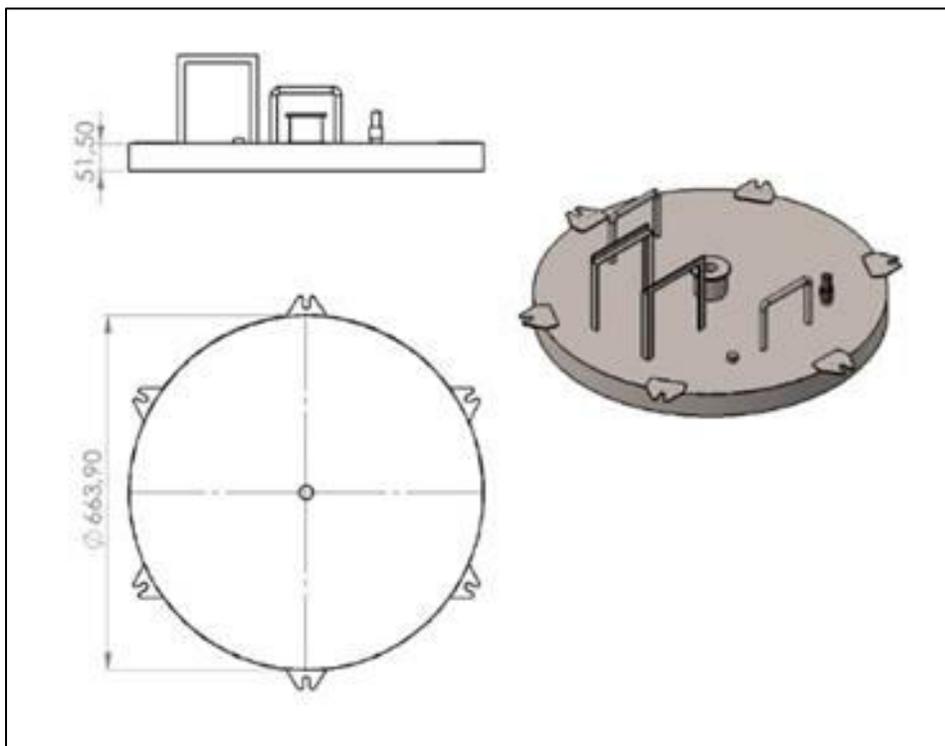
**Tapa del biodigestor.** En la Figura 16, podemos observar los diferentes detalles que van sobre la tapa los cuales son necesarios para el funcionamiento del biodigestor.

- ✓ Soportes para el motorreductor.
- ✓ Apoyos para que el operador pueda manipular la tapa.
- ✓ Orificio para el eje de las aspas.
- ✓ Orificio para el aliviador de presión.
- ✓ Orificio para el sensor de presión.

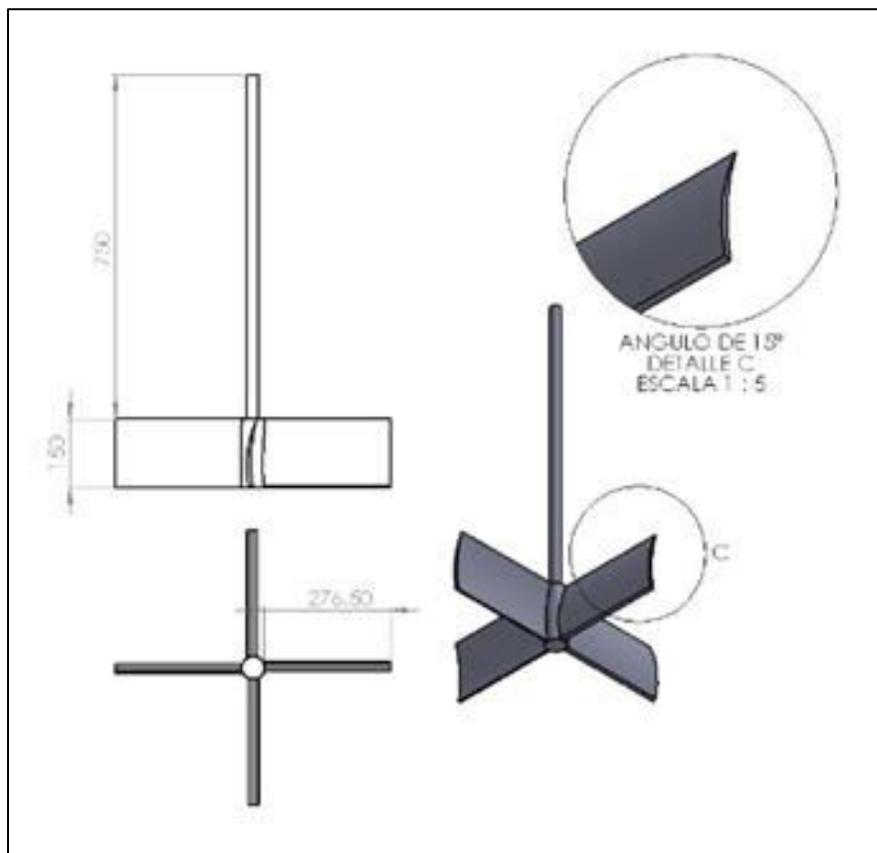
✓ Seguros de la tapa.

**Figura 16**

*Tapa del biodigestor*



**Aspas del biodigestor.** En la Figura 17 de las aspas hicimos unas modificaciones al diseño original, en las recomendaciones se daba a conocer que para una mejor mezcla se recomendaba de cuatro (4) a seis (6) aspas.

**Figura 17***Aspas del biodigestor*

Por otra parte, en la Figura 18 se muestra las indicaciones del agitador.

**Figura 18***Agitador con palas planas inclinadas*

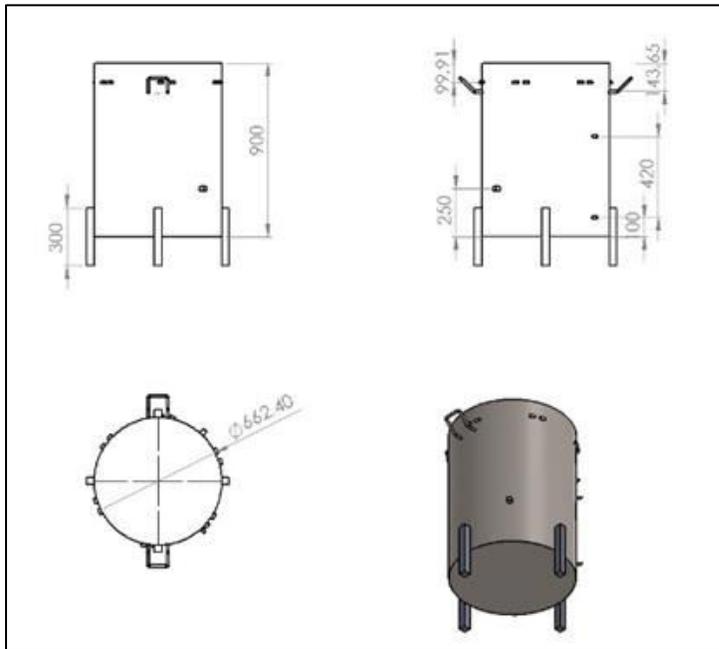
<u>Agitador con palas planas inclinadas</u>	
<b>Descripción</b>	- 4-6 palas rectas - ángulo de inclinación
<b>Campo de flujo generado</b>	axial / radial (componente radial mayor que con el mezclador de hélice)
<b>Régimen alcanzado</b>	de transmisión- turbulento
<b>Velocidad tangencial</b>	3-15m/s
<b>Viscosidad del medio</b>	hasta 20 Pa-s
<b>Posición del rodete (d2/d1)</b>	0.2- 0.5 ( alejado de la pared)
<b>Aplicaciones</b>	-Homogenizar -Suspender -Favorecer el intercambio de calor

**Cilindro del biodigestor.** En la Figura 19 del cilindro vemos los detalles que sobresalen.

- ✓ Soportes del cilindro.
- ✓ Orificio de salida del gas.
- ✓ Orificio de ingreso de agua.
- ✓ Orificio de salida de agua.
- ✓ Orificio para el sensor de temperatura.
- ✓ Orificio para el sensor de pH.
- ✓ Apoyos para manipulación del operador.
- ✓ Soportes para asegurar la tapa.

**Figura 19**

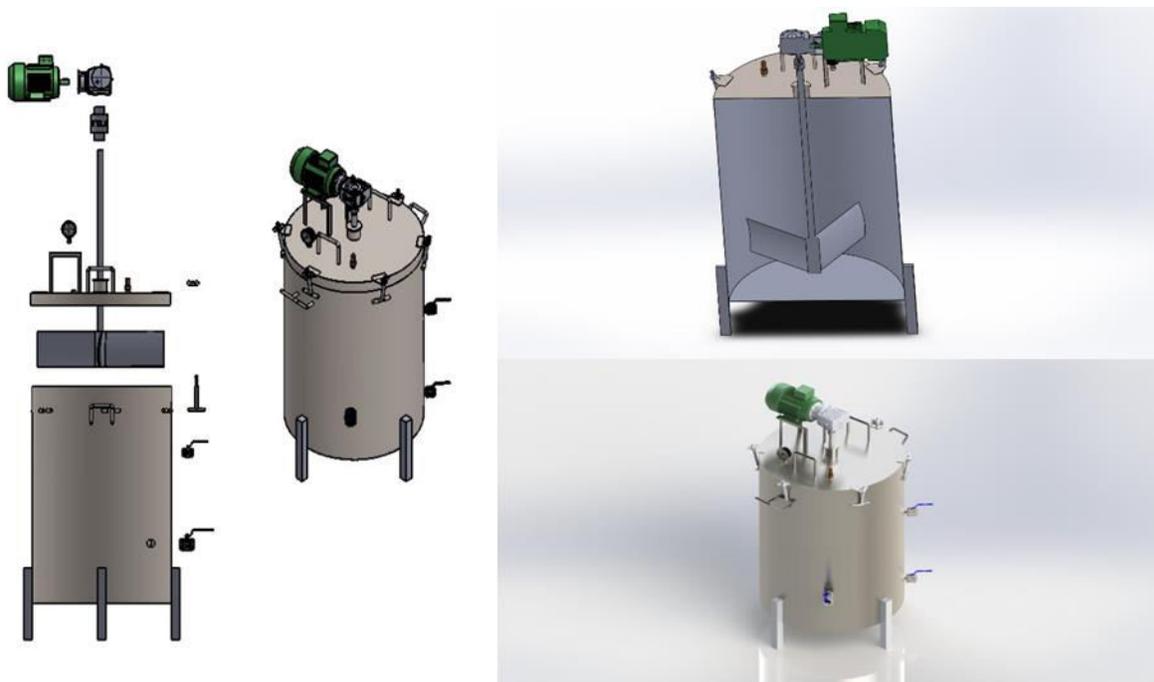
*Cilindro del biodigestor*



A continuación se muestra el esquema que se realizó en software junto con todos sus accesorios, esto se detalla en la Figura 20.

### Figura 20

*Esquema realizado en el software*



#### ***4.3.2 Descripción de la mezcla que se realiza dentro del biodigestor***

Para hablar de la mezcla vamos hablar de biogás ya que es el resultado que se genera de una buena mezcla. El Biogás es un combustible, una mezcla de gases compuesta, en su mayor parte, por metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en proporciones que varían según el residuo con el cual se alimenta al biodigestor y habitualmente rondan en un 50% de  $\text{CH}_4$ .

Esta mezcla de gases es obtenida en el proceso de digestión anaerobia que libera la energía química contenida en la materia orgánica. (Marchisio & BioEnergías Santa Fe, 2015)

Esta puede variar de acuerdo con el tipo de material orgánico utilizado en la carga del biodigestor y con el tiempo que se utilice en el proceso de biodigestión. (Albarracín, 1995). La proporción de los componentes del biogás se detalla en la Tabla 14.

**Tabla 14**

*Composición química del biogás*

COMPONENTES	FORMULA QUIMICA	PORCENTAJE
Metano	CH <sub>4</sub>	60 – 70
Bióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	30 – 40
Hidrogeno	H <sub>2</sub>	Hasta 1.0
Sulfuro de hidrogeno		Hasta 1.0
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0.5 – 3
Monóxido de carbono	CO	0.1
Oxigeno	O <sub>2</sub>	0.1
Ácido sulfhídrico	H <sub>2</sub> S	0.1

*Nota.* En la tabla se muestra la composición de cada uno de los gases.

Es importante tener en cuenta algunos de los factores importantes que gobiernan el proceso metanogénico. Los microorganismos, especialmente los metanogénicos, son altamente susceptibles a los cambios en las condiciones ambientales. Muchos investigadores evalúan el desempeño de un sistema anaeróbico en función de la tasa de producción de metano, porque la

metanogénesis se considera un paso limitante del proceso. Debido a esto, la biotecnología anaeróbica requiere de un cuidadoso monitoreo de las condiciones ambientales. Algunas de estas condiciones ambientales son: temperatura (mesofílica o termofílica), tipo de materias primas, nutrientes y concentración de minerales traza, pH (generalmente cercano a la neutralidad), toxicidad y condiciones redox óptimas. (FAO et al., 2011)

Los productos principales de la biodigestión son el biogás y el biofertilizante. Se analizarán sus usos y cómo proceder para aprovecharlos. Se comenzará con el biogás, enumerando sus posibles usos (entre otros):

- ✓ Quema directa para mitigar Cambio Climático
- ✓ Cocción de alimentos
- ✓ Calefacción de Ambientes
- ✓ Calefacción en establecimientos de cría intensiva
- ✓ Secado de granos
- ✓ Iluminación en sectores de alimentación animal
- ✓ Procesos industriales existentes (lácteas, cerveceras, dulces, alimentos en general termotanques, calderas, etc.
- ✓ Impulsión de biofertilizantes en suelos de cultivo
- ✓ Refrigeración por absorción
- ✓ Generación de Potencia Mecánica
- ✓ Generación eléctrica en Red
- ✓ Cogeneración (electricidad – Calor procesos)

- ✓ Transporte Maquinaria agrícola
- ✓ Transporte Automotor
- ✓ Inyección de Biometano a Red de Gas Natural

Para resumir, se puede utilizar como energía térmica (generación de calor o vapor), para generar electricidad o para combustible de vehículos. Existen también sistemas de cogeneración, donde se combina la generación de electricidad en un generador y el calor residual se usa también para calentar algún fluido, como el agua. Como se puede deducir, para cada una de estas aplicaciones tan diferentes, el biogás debe ser sometido a diferentes tratamientos previos.

En la tabla 15, se puede observar la cantidad de estiércol que produce por cada especie y el peso promedio de estos, la energía generada por estas y, por último, el poder calorífico en relación con el volumen del biogás.(Barros Gómez et al., 2017)

**Tabla 15**

*Generación de energía por especie*

ESPECIES	PESO PROMEDIO DE LAS ESPECIES (KG)	CANTIDAD DE ESTIÉRCOL KG/CABEZA	VOLUMEN DE BIOGÁS HÚMEDO M3/KG	PODER CALORÍFICO MJ/KG	ENERGÍA PRODUCIDA MJ/CABEZAS
PORCINO	50	2,35	0,06	1,284	3,02
VACUNO	500	6,0	0,04	0,856	5,14
CAPRINO	100	1,6	0,05	1,07	1,7
AVICOLA	2	1*10 <sup>-4</sup>	0,08	1,712	1,7*10 <sup>-4</sup>

*Nota.* En la tabla se detalla los parámetros obtenidos en el diseño. Fuente: (Barros Gómez et al., 2017)

A partir del análisis realizado con la información de la tabla 15 se presenta en la tabla 16 el comparativo en las cantidades expresadas para cada especie de acuerdo a la disponibilidad en la Granja Experimental de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña. En este sentido se presenta para las especies porcino, vacuno de leche, caprino y avícola la cantidad de materia prima y biomasa a partir del análisis realizado a variables como poder calorífico, volumen de biogás, peso promedio y cantidad de estiércol. Además, podemos notar la cantidad de materia prima y biomasa que la granja experimental de la universidad francisco de paula Santander sede Ocaña posee, la cual no tiene el mejor aprovechamiento y uso.

**Tabla 16**

*Generación de energía por especie*

ESPECIE	PESO PROMEDIO KG	CANTIDA EXISTENTE EN LA GRANJA	CANTIDAD DE ESTIERCOL KG/CABEZA	VOLUMEN DE BIOGAS HUMEDO M3/KG	PODER CALORIFICO MJ/KG	ENERGIA PRODUCIDA MJ/CABEZAS
PORCINO	50	29	68,15	1,74	37,236	87,58
VACUNO DE LECHE	500	44	264	1,76	37,664	226,16
CAPRINO	100	62	99,2	99,2	66,34	105,4
AVICOLA	2	4300	430*10 <sup>-3</sup>	344	7,3616	731*10 <sup>-3</sup>

*Nota.* En la tabla se detalla los parámetros obtenidos en el diseño para la universidad. Fuente: (Barros Gómez et al., 2017)

Con el pasar de los años hemos visto el crecimiento energético en muchos países, cuyo aumento es de miles de millones de toneladas de petróleo. El crecimiento esta directamente relacionado a la tasa de urbanización acompañado de la industrialización, creando así un aumento acelerado en el consumo de energía. La mayor parte de los países en el mundo dependen de los combustibles fósiles no renovables como fuente principal de energía, los países

de mayor consumo de energía en el mundo son E.E.U.U., Rusia, India, Japón, Canadá, Alemania, Brasil, Francia y Corea del sur, estableciendo así el 64.6% de la energía consumida a nivel mundial. Con el transcurso de la historia hemos notado que los países desarrollados han sido los mayores productores de gases de efecto invernadero, en los últimos años la proporción de producción de gases invernadero ha sido superada por los países en desarrollo, aumentando rápidamente. Los gases de efecto invernadero son los directamente responsables de los cambios climáticos que se presentan actualmente. (Barros Gómez et al., 2017)

#### ***4.3.3 Parámetros de funcionamiento del biodigestor***

Como hemos visto en las fases anteriores los parámetros de funcionamiento son varios a tener en cuenta, en el PID se va a monitorear la temperatura, presión y el porcentaje de humedad. Regulando estos parámetros vamos a tener un óptimo funcionamiento del biodigestor y así generar Biogás de una mejor calidad.

En varios manuales se recomienda tener control del porcentaje de humedad (pH) una vez a la semana, con ayuda de las “cintas de pH”, que el valor del mismo esté entre 7 y 8, según la escala de colores. Se deberá tomar una muestra del contenido del biodigestor, por la boca de descarga o por la válvula de desagote, luego de haber removido el contenido accionando el mezclador por al menos 2 minutos. La muestra se coloca en un vaso o recipiente pequeño; en él se sumerge por unos 10 segundos la parte coloreada de una de las cintas, se saca, se sacude el excedente de líquido y se compara la tonalidad de cada uno de los cuadrados de colores con los

colores de muestra para cada valor de pH provistos en la caja. (Marchisio & BioEnergías Santa Fe, 2015)

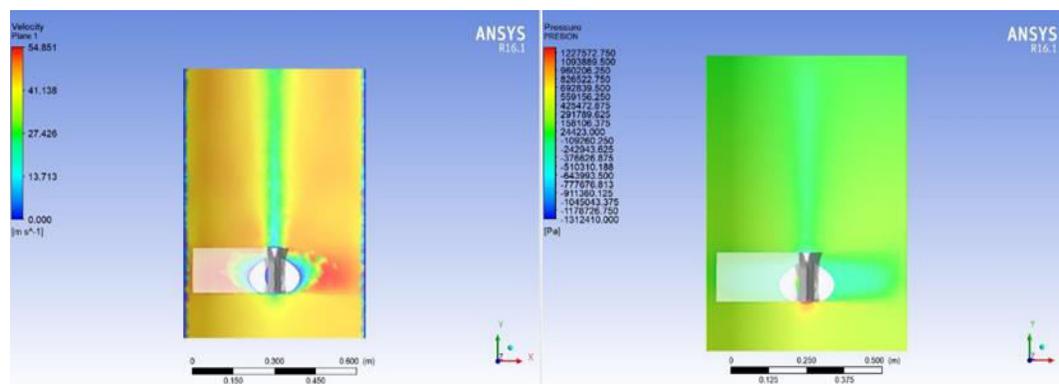
La temperatura de operación del biodigestor, es considerada uno de los principales parámetros de funcionamiento, debido a la influencia de este factor en la velocidad de digestión anaeróbica. Las variaciones bruscas de temperatura en el biodigestor pueden afectar la desestabilización del proceso. Por ello, para garantizar una temperatura homogénea en el biodigestor, es imprescindible un sistema adecuado de agitación y un controlador de temperatura. (FAO et al., 2011)

#### ***4.3.4 Simulación a través de la herramienta computarizada ANSYS de acuerdo a los parámetros de funcionamiento***

En la Figura 21, se muestra la modelación en el software mencionado, observando el comportamiento de la presión y la velocidad en el tanque del biodigestor, notando que la variación de la presión esta entre los 24.000 y 29.000(3.5psi y 4.2psi) sin llegar a altas presiones y así no exponer la integridad del biodigestor. En el esquema de velocidad podemos ver que la velocidad en el fluido de va entre los 40m/s y 50m/s en la mayor parte del tanque, en las zonas cerca de las aspas la velocidad del fluido va ser mayor, superando los 50m/s.

**Figura 21**

*Esquema de presión y velocidad en el tanque del biodigestor*



Por otra parte, en la Tabla 17, se detallan cada uno de los parámetros obtenidos luego de la modelación.

**Tabla 17**

*Parámetros obtenidos*

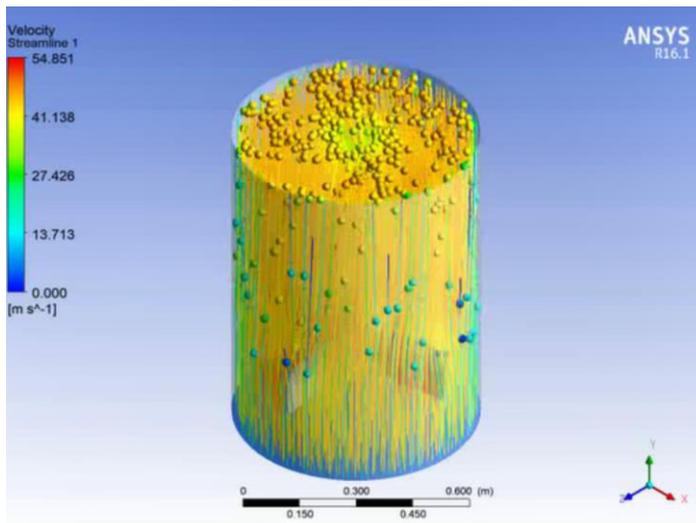
<b>Tabla</b>	<b>Observación</b>
<b>Presión</b>	<p>La presión del sistema se mantiene en el rango de 24.000 a 29.000 Pa (3,5psi – 4.2psi).</p> <p>En la parte superior la presión va ser mayor asumiendo así la generación de Biogás.</p> <p>La presión en la zona de contacto con las aspás es menor debido a la turbulencia que se genera en esa zona.</p>
<b>Velocidad</b>	<p>La velocidad en la mayor parte del cilindro se va mantener en un rango de 40 – 50 m/s</p> <p>La velocidad en la zona de contacto con las aspás es mayor.</p>

*Nota:* En la tabla se detalla los parámetros obtenidos en el diseño.

En la Figura 22, se puede observar cómo al llevar a cabo la simulación introduciendo los rangos óptimos de funcionamiento, se va a llevar la transformación de la mezcla en gas, comprobando en software la generación de gas que se puede dar en el en el biodigestor.

**Figura 22**

*Esquema de la transformación de la mezcla en gas*



#### ***4.3.5 Aplicación del biodigestor como banco de pruebas para estrategia pedagógica en el desarrollo de asignaturas del programa ingeniería mecánica***

La aplicación del biodigestor se orienta hacia la línea de Eficiencia Energética y Energías Renovables, para articular estrategias de aprendizaje con un componente práctico en asignaturas como termodinámica, diseño térmico y máquinas térmicas ya que se desarrollan competencias orientadas al análisis de energía, en este caso para la energía por Biomasa en donde se aprovechan los desechos de tipo orgánico para la generación de gas metano ( $\text{CH}_4$ ) y este como medio de combustión para diferentes procesos.

Entonces se puede utilizar el biodigestor propuesto como banco de pruebas ya que este permite el análisis de cada una de las variables que intervienen en el proceso de producción de gas metano mediante la biodigestión de biomasa. La idea es llevar al estudiante a la generación de conocimiento mediante la experimentación, ya que, al comprobar los diferentes tipos de biomasa, se puede analizar la cantidad de gas que esta puede producir dependiendo de las condiciones bacterianas de cada una de las muestras, y cómo influyen cada una de las variables en el proceso de producción de gas.

Adicionalmente en los procesos de investigación formativa como semilleros de investigación o curso de seminario, se pueden comprobar distintos tipos de biomasa y como sus características ya sea su composición básica de materia prima orgánica puede afectar la producción de gas metano o aumentar o disminuir el poder calorífico de este a la hora de utilizarse como medio de combustión.

## Capítulo 5. Conclusiones

En relación al primer objetivo específico, se puede mencionar que los biodigestores son una fuente de energía renovable a la que con el tiempo se deberá llegar para el consume de todo, ya sea para generar gas para cocinar como para calefacción. En el estudio que se realizó para la realización de este trabajo se pudo observar, que en muchos países los biodigestores son de gran ayuda en la industria agrícola, lo cual debería de tomarse como ejemplo y empezar a implementarlo desde la universidad hacia el campo. Al analizar las diferentes materias primas que se utilizan en los biodigestores anaeróbicos, en los diferentes trabajos revisados se logró ver que los nutrientes del estiércol y los residuos sólidos se llega a la premisa en que el ganado porcino tiene mayores características para la producción de biogás. Mediante la literatura consultada, fue posible notar, que al tener un control del porcentaje de humedad (pH) y la temperatura podemos tener un biogás con más nutrientes y de mejor calidad.

Por su parte, en el segundo objetivo específico se desarrolló el instrumento virtual que permitirá obtener los datos requeridos para diseñar el sistema. Para ello, se determinaron los diferentes tipos de sensores requeridos para el registro de diferentes parámetros requeridos para que el sistema que se obtenga sea optimo y eficiente Posteriormente, se utilizó el software LabVIEW, donde se da a conocer como una herramienta útil a la hora de hacer la automatización de procesos, permitiendo la integración de diferentes tecnologías de adquisición de datos, adaptándose a los requerimientos de cualquier proceso industrial. En esta plataforma se pueden monitorear las variables de presión, temperatura, pH y porcentaje de humedad. Por último, se elabora el diagrama de bloques de la estructura interna de la programación orientada a objetos.

La última parte del diseño, estuvo enfocada en la simulación en ANSYS para conocer el funcionamiento del biodigestor anaeróbico, en ella se obtienen las características finales en cuanto a sus elementos tales como diámetros, alturas, espesores, volumen y potencia del motor. Con esta información definida, se procedió al diseño mediante el software SolidWorks, donde se detalla cada uno de los elementos como la tapas, aspas, agitador y cilindro del biodigestor. Finalmente, se detalla el funcionamiento y los principales usos del producto obtenido.

## Capítulo 6. Recomendaciones

Realizar estudios a los biodigestores instalados a pequeña y mediana escala, presentes en la Universidad Francisco de Paula Santander.

Efectuar una recolección total del estiércol que produce la granja de la Universidad Francisco de Paula Santander, de modo que se puedan incorporar nuevos biodigestores con el tiempo, a fin de disminuir significativamente el impacto ambiental.

Continuar con proyectos para el aprovechamiento del biogás, de tal modo que se pueda generar energía eléctrica, mediante el diseño de turbinas impulsadas por la combustión, y el almacenamiento del mismo en recipientes bajo presión.

Este tipo de sistemas, deberían de aplicarse a nivel rural, en toda la provincia de Ocañera.

## Referencias

- Agudelo, J., Borge, D., & Perez, J. (2010). Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico- experimentales. *Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*.
- Amézquita, M., Arango, A., & Camargo, J. (2012). Evaluación de la oferta de residuos de biomasa de guadua para propósitos energéticos en el Eje Cafetero de Colombia. *Recursos Naturales*.
- Barrientos, X., Domínguez, M., & Guzmán, U. (2010). *Herbolaria mexicana en el convento del divino salvador, Malinalco, estado de México*. Monterrey.
- Bueno, E. (2010). *Diseño de un Convertidor Analógico-Digital de Aproximaciones Sucesivas de bajo consumo y área reducida*. Valencia. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/19255/EnriqueBuenoGimeno.pdf>
- Bustamante, J. (2007). Desarrollo de un prototipo de bomba de flujo pulsátil para caracterizar las condiciones hidrodinámicas en un ambiente de circulación extracorpórea. *Colombiana de Cardiología*.
- Cervi, R. (2011). Viabilidad Económica de la Utilización de Biogás para la Conversión en Energía Eléctrica. *Información tecnológica*.
- Comercialaviles. (2018). *BLOG DE EMBALAJE*. Obtenido de <https://www.comercialaviles.com/blog/que-significa-biodegradable/#:~:text=El%20diccionario%20de%20la%20Real,produzca%2C%20me no s%20contaminaremos%20nuestro%20planeta>.
- Congreso de Colombia. (2014). *Ley 1715 de 2014*. Bogotá.

- Donoso, G., Ladera, C., & Martén, P. (2009). *Caída de imanes dentro de una tubería conductora: movimiento y función del espesor de la pared de la tubería*. Caracas.
- Ecured. (2014). *Hidrólisis*. Obtenido de <https://www.ecured.cu/Hidr%C3%B3lisis#:~:text=Descomposici%C3%B3n%20de%20sustancias%20org%C3%A1nicas%20e,sustancia%20qu%C3%ADmica%20por%20el%20agua>.
- Ecured. (2019). *Biodigestor*. Obtenido de <https://www.ecured.cu/Biodigestor> Educalingo.
- (2019). *educalingo*. Obtenido de <https://educalingo.com/es/dic-es/digestor#:~:text=En%20el%20diccionario%20castellano%20digestor,carne%20o%20de%20otra%20sustancia>.
- Esacademic. (2011). *Válvula de alivio de presión*. Obtenido de <https://esacademic.com/dic.nsf/eswiki/1195039#:~:text=Las%20v%C3%A1lvulas%20de%20alivio%20de,por%20un%20exceso%20de%20presi%C3%B3n>.
- Garfi, A., Castro, L., & Montero, N. (2018). *Evaluación de los beneficios ambientales de los digestores de biogás de bajo costo en fincas de pequeña escala en Colombia: una evaluación del ciclo de vida*. Bucaramanga.
- Gómez, S., & Soria, E. (2002). Análisis electroquímico. *Diagnóstico Biológico*. Obtenido de [http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-79732002000100005](http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-79732002000100005)
- Guerrero, L., & Hogland, G. (2014). *Desafíos en la gestión de residuos sólidos para las ciudades de países en desarrollo*. Países bajos.
- Hernández, J., Tobón, S., & Vázquez, J. (2014). *Estudio conceptual de la docencia socioformativa*. El Fuerte.

- Jyothilakshmi, R., & Prakash, S. (2016). *Diseño, Fabricación y Experimentación de un Biodigestor Anaeróbico a Pequeña Escala para Residuos Sólidos Biodegradables Domésticos con Recuperación de Energía y Cálculos de Dimensionamiento*.  
Karnataka.
- Kooijman, S. (2015). La exposición diaria prolongada a la luz aumenta la masa de grasa corporal mediante la atenuación de la actividad del tejido adiposo marrón. *PNAS*.
- Leyva, A., & Martínez, A. (2014). *La biomasa de los cultivos en el oecosistema. Sus beneficios agroecológicos*. La Habana. Obtenido de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362014000100002#:~:text=un%20nivel%20tr%C3%B3fico,-,El%20aumento%20de%20biomasa%20en%20un%20per%C3%ADodo%20determinado%20recibe%20el,de%20%C3%A1rea%20o%20de%20volumen.](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362014000100002#:~:text=un%20nivel%20tr%C3%B3fico,-,El%20aumento%20de%20biomasa%20en%20un%20per%C3%ADodo%20determinado%20recibe%20el,de%20%C3%A1rea%20o%20de%20volumen.)
- Magaña, L., & Rubio, R. (2011). Tratamiento anaerobio de desechos lácticos y estiércol de cabra. *Ingeniería e investigación*.
- Medline. (2018). *MedlinePlus*. Obtenido de <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/002230.htm>
- Ministerio de energía. (2011). *Manual de biogás*. Santiago de Chile.
- Moeller, G., & Tomasini, A. (2004). *MICROBIOLOGÍA DE LODOS ACTIVADOS*. Bogotá.
- Olmo, M. (2017). *pH*. Obtenido de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Chemical/ph.html>
- Pino, J., & García, C. (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. *Agrociencia*.

- Sanchez, M. (2016).. *Evaluación preliminar de parámetros de campo en un biodigestor anaeróbico diseñado para el tratamiento de aguas residuales.*
- Sánchez, M., & Peón, I. (2016). Evaluación inicial de parámetros de campo en un biodigestor anaeróbico para el tratamiento de aguas residuales. *Colombiana de Biotecnología.*
- Soliva, M. (2011). *Guía para la recogida separada y gestión de la fracción orgánica.* Madrid.
- Vera, I., & Estrada, M. (2017). Biogás como una fuente alternativa de energía primaria para el Estado de Jalisco, México. *Ingeniería Investigación y Tecnología.*
- Vera, S. (2017). *La Tecnología ZigBee estudio de las características de la capa física.*  
Pamplona.