

**Diseño de biodigestores para la optimización de procesos de producción de biogás a partir  
de residuos orgánicos en granjas porcícolas**



**Presentado por:**

**Lina Ximena Tovar Bermúdez**

**Liliana Katerin Florez Galvis**

**Laura Lizeth Gaitan Triana**

**Director:**

**Sergio Israel Rojas Serrano**

**Programa Ingeniería Química Facultad de Ingeniería**

**Universidad EAN**

**Bogotá D.C., Colombia**

**2022**

## Tabla de contenido

1. Resumen.....	8
1.1 Abstract.....	8
2. Introducción.....	9
3. Objetivos.....	12
3.1 Objetivo general.....	12
3.2 Objetivos específicos.....	12
4. Definición del problema.....	13
5. Justificación.....	14
6. Análisis de Requerimientos y especificaciones técnicas.....	15
6.1 Infraestructura del Biodigestor.....	16
6.1.1 Entrada del afluente al sistema.....	16
6.1.2 Pila de hidrólisis.....	16
6.2 Biodigestor.....	16
6.2.1. Sistema de agitación.....	16
6.2.2. Transporte y tratamiento del biogás.....	17
6.2.3. Pila de efluente.....	17
6.3. Dimensionamiento del biodigestor.....	17
6.3.1. Determinación de Biomasa.....	18
6.3.1. Determinación de Flujo Volumétrico del influente.....	19
6.3.2. Características Físicas, Químicas y Biológicas del Influyente.....	19
6.3.3. Cálculo de la producción de biogás.....	19
<b>6.4 Ecuaciones para el diseño de Biodigestores.....</b>	<b>20</b>
6.5. Marco legal.....	21
<b>6.5.1. Normativas ambientales.....</b>	<b>21</b>
<b>6.6 Concepto y alcance de la licencia ambiental.....</b>	<b>22</b>
<b>6.6.1 Competencia del MAVDT.....</b>	<b>23</b>
<b>6.7 Limitaciones ambientales y sociales en el desarrollo del proyecto.....</b>	<b>24</b>
<b>6.8 Análisis Económico.....</b>	<b>24</b>
<b>6.9. Análisis Topográfico.....</b>	<b>25</b>
<b>6.10 Salud y Seguridad.....</b>	<b>26</b>

<b>6.11. Socioculturales</b> .....	26
7. Marco referencial.....	27
<b>7.1 Biodigestores</b> .....	27
7.2 Tipología de biodigestores .....	27
7.2.1 Biodigestor tipo tubular o taiwanés .....	28
<b>7.2.2 Biodigestor CSTR – Flujo y agitación continua</b> .....	28
<b>7.2.3 Biodigestor de laguna cubierta</b> .....	29
<b>7.2.4 Biodigestor tipo chino o de domo fijo</b> .....	29
<b>7.2.5 Biodigestor tipo hindú</b> .....	30
<b>7.3 Materia orgánica de origen Porcicola</b> .....	31
7.3.1 La biomasa como fuente de energía renovable .....	31
<b>7.3.2 Importancia de la relación carbono nitrógeno del sustrato</b> .....	31
<b>7.3.3 Composición química de la materia orgánica</b> .....	32
<b>7.4 La digestión anaerobia</b> .....	32
7.4.1 Hidrolisis .....	33
<b>7.4.2 Acidogénesis</b> .....	33
<b>7.4.3 Acetogénesis</b> .....	33
<b>7.4.4 Metanogénesis</b> .....	34
<b>7.4.5 Condiciones para el proceso anaerobio</b> .....	35
<b>7.5 El biogás como energía renovable</b> .....	35
<b>7.5.1 Composición química del biogás</b> .....	36
<b>7.5.2 Factores que afectan la producción del biogás</b> .....	36
<b>7.5.2.1 Temperatura y tiempo de retención</b> .....	36
<b>7.6 Bioabono y recuperación del digestato</b> .....	40
<b>8. Metodología para la selección y desarrollo de la solución</b> .....	42
<b>8.1 Diagrama de bloques de flujo de proceso (BFD)</b> .....	42
<b>8.2 Diagrama de flujo de proceso (PFD) de la propuesta del biodigestor</b> .....	42
<b>8.3 Propuesta de simulación en software Aspen Plus</b> .....	42
<b>8.3.4 Selección de los componentes</b> .....	42
8.3.5 Reacciones involucradas en el proceso de la digestión anaerobia.....	46
<b>9. Resultados simulación y análisis de sensibilidad</b> .....	47
<b>10. Propuesta para el funcionamiento óptimo del biodigestor</b> .....	49

<b>10.1</b>	<b>Temperatura ambiental</b> .....	50
<b>10.2</b>	<b>Contenido de lípidos en la mezcla</b> .....	50
<b>10.3</b>	<b>Control de pH</b> .....	50
<b>10.4</b>	<b>Mezclado y contenido de agua</b> .....	51
<b>10.5</b>	<b>Control de presión</b> .....	51
<b>11.</b>	<b>Análisis de costos</b> .....	51
<b>11.1.</b>	<b>Costos del biodigestor</b> .....	51
11.2	Costos tanques.....	52
11.3	Costos para el invernadero .....	52
11.4	Montaje del biodigestor.....	53
11.5	Balance de costos .....	53
11.6	Costos directos e indirectos.....	53
<b>12.</b>	<b>Análisis de resultados y recomendaciones</b> .....	54
<b>13.</b>	<b>Conclusiones</b> .....	55
<b>14.</b>	<b>Bibliografía</b> .....	56

## Índice de imágenes y diagramas

Imagen 1. Biodigestor tubular construido con membrana de PVC .....	28
Imagen 2. Biodigestor de sistema de laguna abierta.....	29
Imagen 3. Biodigestor tipo chino.....	30
Imagen 4. Biodigestor tipo hindú.....	30
Grafica 1: Producción de biogás en función de la temperatura .....	37
Diagrama 1: diagrama de flujo de proceso .....	42
Diagrama 2: Diagrama PFD del proceso .....	42
Imagen 5: lista de componentes simulación .....	44
Imagen 6: Calculo de propiedades de la proteína. ....	45
Imagen 7. Corrientes de entrada al mezclador.....	45
Imagen 8: Diagrama de simulación en Aspen Plus .....	46
Imagen 9: composición de las corrientes involucradas.....	47
Imagen 10: Resultados en flujo masico .....	48
Imagen 11: Resultados en flujo masico .....	48
Imagen 12: Resultados en flujo másico .....	49
Imagen 13: Diagrama de instrumentación y tubería .....	50

## Índice de tablas

Tabla 1: Composición química del estiércol porcino .....	32
Tabla 2: Microorganismos que intervienen en el proceso .....	34
Tabla 3: Condiciones del proceso anaerobio .....	35
Tabla 4: Composición química del biogás.....	36
Tabla 5: Concentraciones de amoniacó .....	39
Tabla 6: Inhibidores que afectan el proceso .....	40
Tabla 7: Composición química del bioabono .....	41
Tabla 8: costos para diseñar el biodigestor.....	52
Tabla 9: Costos de tanques .....	52
Tabla 10: costos invernadero .....	52
Tabla 11: Montaje del biodigestor .....	53
Tabla 12: Balance de costos.....	53
Tabla 13: costos directos e indirectos .....	53

## **Tablas de anexos**

Anexo 15.2 Resultados propiedades de petrocaracterización de proteínas .....	59
Anexo 15.3 Selección del paquete de fluidos .....	59
Anexo 15.4 Requerimientos intercambiadores de calor .....	60
Anexo 15.5 Requerimientos reactor estequiométrico .....	60
Anexo 15.6 Requerimientos mezclador .....	61
Anexo 15.7 Requerimientos Reactor CSTR .....	61
Anexo 15.8 Especificaciones para la biomasa .....	62

## 1. Resumen

El presente trabajo se encuentra enmarcado en el diseño de un biodigestor para la producción de biogás y bio abono en granjas porcícolas, con el objetivo de optimizar los procesos de producción; por tal razón, se realizará análisis de las variables que afectan la eficiencia del proceso, y los factores fisicoquímicos que afectan la producción de biogás, lo cual se realizará inicialmente mediante revisión bibliográfica, con el fin de realizar una respectiva comparación de los datos obtenidos. Posteriormente, se realizará comparación de los diseños actualmente más utilizados, para determinar cuál es la mejor opción de acuerdo con las oportunidades de mejora identificadas. Adicionalmente, se realizará investigación acerca de los parámetros de diseño, los cuales, junto a los hallazgos identificados anteriormente, permitan proponer un modelo de biodigestor realizado mediante el uso de herramientas computacionales, para obtener como resultado final, un diseño que permita tener mayor control de las variables de proceso.

**Palabras claves:** Biodigestor, biogás, diseño, optimización de procesos

### 1.1 Abstract

This work is farmed in the design of a biodigester for the production of biogas and bio fertilizer in pig farms, with the aim of optimizing the production processes; for this reason, an analysis of the variables that affect the efficiency of the processes, and the physicochemical factors that affect the production of biogas, will be carried out which will be done initially through a literature review, in order to make a respective comparison of the data obtained. Subsequently, a comparison of the most used designs will be made to determine which is the best option according to identified opportunities for improvement. In addition, research will be carried out on the design parameters, which, together with the findings identified above, will make it possible to propose a biodigester model using computational tools, to obtain as a result, a design that allows greater control of process variables.

**Keywords:** Biodigester, biogas, design, process optimization

## 2. Introducción

Un biodigestor, es un recipiente cerrado donde no hay oxígeno, en el cual se fermenta las excretas y otros residuos orgánicos por acción de un grupo de microorganismos (bacterias); estos equipos son usados como sistema para convertir residuos orgánicos en gas metano y fertilizante natural. La materia orgánica es el resultado de un proceso de formación en cría y ceba de cerdos con alimentación alternativa. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a las cadenas productivas de la ganadería ascienden al 14,5 % de todas las emisiones de GEI de origen humano; Por esta razón, se plantea este proyecto con el fin de definir e identificar qué tipo de biodigestor es óptimo para trabajar la materia orgánica proveniente de la industria Porcicola, en el que se realizara énfasis en el control de las en el proceso.

El aumento de la productividad agropecuaria es la fuerza motriz del desarrollo económico y la sociedad; cuando la agricultura falla y las fuentes de ingresos se pierden, la sociedad se derrumba y la movilidad social aumenta; por ello, el desarrollo de las actividades agrícolas requiere de diferentes elementos: suelo fértil, agua, semillas, fertilizantes, pesticidas, mano de obra, y según sea el caso recursos energéticos.

Una forma útil de mantener un ambiente saludable es saber reutilizar diferentes ingredientes orgánicos en la producción agrícola; los agricultores, deben tener en cuenta los riesgos ambientales y de seguridad alimentaria al planificar abonar. Las prácticas de gestión del estiércol reducen el impacto negativo del entorno, como la eliminación de residuos y olores, y reducir el riesgo de contaminación por patógenos humanos que puedan encontrarse en heces.

El biogás concentra metano principalmente, el cual es útil para poner en marcha una pequeña motobomba y así dar energía a más de 240 moradores de esta comunidad del norte del Cauca. Esta tecnología emplea lo que los expertos llaman digestión anaerobia (de ahí que su nombre sea biodigestor) y su materia prima son los excrementos de 650 cerdos, los cuales se fermentan por acción de un microorganismo en ausencia de aire y al estar diluidos en agua. El resultado es el metano, que a diario produce 12 metros cúbicos de bioabono (12.000 botellas de gaseosa de un litro cada una) y unos 80 metros cúbicos (otras 80.000) de fertilizantes para cultivos.

Aunque el sistema es conocido, resulta novedoso que por primera vez en el suroccidente del país fue creado por 60 familias nativas que viven de la agricultura en 11 parcelas de los municipios Santander de Quilichao, Toribío, Corinto, Caloto, Miranda y Buenos Aires.

Toman su término de digestivo o digestión; son máquinas simples que convierten las materias primas en subproductos aprovechables, en este caso gas metano y abono, comúnmente se los denomina Biodigestores. El principio básico de funcionamiento es el mismo que tienen todos los animales; descomponer los alimentos en compuestos más simples para su absorción mediante bacterias alojadas en el intestino, con condiciones controladas de humedad, temperatura y niveles de acidez.

La construcción de un Biodigestor con variables monitoreadas permite la supervisión del proceso y el control del producto generado, el cual requiere de características específicas como son:

- La temperatura y el pH
- Concentración de sólidos y sustancias inhibidoras de la reacción biológica
- Adición de sustancias para el equilibrio de niveles ambientales y biológicos adecuados, con el fin en que este proyecto se desarrolle en la suite de Aspen. Manipular las variables involucradas de tal manera que se pueda establecer un diseño óptimo para el proceso que cuente con la opción de conocer y controlar el proceso en todo momento.

Debido a lo mencionado anteriormente, la producción de biogás se ve afectada por diferentes inhibidores como el crecimiento de microorganismos, pH, temperatura, niveles de amoníaco y otras interacciones, y con la finalidad de que el modelo obtenido sea lo más semejante posible a un escenario real, es necesario usar modelos complejos en los cuales este tipo de inhibiciones sean desarrolladas y tomadas en cuenta en los cálculos (Rajendran et al., 2014). Por lo tanto, en esta investigación se estudia el diseño de un biodigestor haciendo uso de un software bastante robusto, como es Aspen Plus, el cual es una herramienta de modelado de procesos usada en el control, optimización y diseño de procesos químicos más comunes en una planta industrial, este software es ampliamente utilizado por los ingenieros químicos para la simulación de procesos (Peris, 2011).

Teniendo en cuenta esto, se realiza una simulación en el software Aspen Plus en base a estudios anteriores de procesos de simulación de biodigestores anaerobios, en los que se tuvieron en cuenta las reacciones correspondientes a cada etapa del proceso con sus respectivas constantes cinéticas. En esta investigación se diseñaron dos reactores (reactor estequiométrico y reactor CSTR) y un intercambiador de calor para simular la digestión anaerobia, y en cada uno de los reactores se agregaron los sets de reacciones correspondientes, para el caso del primer reactor se agregaron las reacciones correspondientes a la hidrólisis, y para el caso del reactor CSTR se agregaron las reacciones correspondientes a las etapas de acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

### **3. Objetivos**

#### **3.1 Objetivo general**

Diseñar un biodigestor mediante el uso de herramientas computacionales para el aprovechamiento de residuos orgánicos, con el fin de generar energía y fertilizante en granjas porcícolas.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Realizar la comparación de los diferentes biodigestores actualmente utilizados en granjas porcícolas
- Identificar los factores que afectan la eficiencia de los biodigestores en granjas porcícolas.
- Identificar los factores fisicoquímicos que afectan al rendimiento de la obtención del biogás
- Comparar diferentes variables a controlar, para definir un prototipo de máximo beneficio

#### **4. Definición del problema**

El gas metano es un gas con alto potencial de efecto invernadero, presentando mayor poder que el dióxido de carbono, con un valor de 34 en un horizonte temporal de 100 años (VanderZaag et al., 2018), es necesario desarrollar alternativas que permitan el aprovechamiento de este gas, y evitar que este sea arrojado a la atmosfera, considerando que las emisiones de los biocombustibles tienen un balance neto de dióxido de carbono positivo. (Torres-Sebastián et al., 2021)

Se logra identificar que en las granjas porcícolas existe un problema de manejo adecuado de residuos, y en ocasiones no cuentan con los recursos energéticos suficientes para suplir todas las necesidades de las fincas; dado que es necesario disminuir el impacto ambiental que genera la descomposición de estos residuos, la construcción de sistemas de biodigestores se considera una alternativa optima al control de los gases emitidos a la atmosfera, ya que se genera biogás, que a su vez puede ser utilizado dentro de las fincas para suplir necesidades energéticas, tales como calentamiento de los cerdos para aumentar la producción, o para usos dentro del hogar. Adicionalmente, se obtiene como subproducto bioabono para ser utilizado en los cultivos.

Los biodigestores que se implementan en granjas porcícolas presentan algunas falencias que afectan directamente al proceso de producción de biogás; tales como mantener la temperatura óptima para la generación de biogás, ya que este depende mayormente del piso térmico en el que se implementa el sistema, aumentos de presión y acumulación de gas, inestabilidad del PH y fallas en proporciones de materia orgánica y agua. Esto debido a que, no existe un proceso estandarizado, y usualmente las implementaciones no cuentan con elementos que permitan llevar seguimiento y control a las variables que interviene.

Con las oportunidades de mejora debidamente identificadas, se plantea mejorar el diseño de los sistemas de biodigestores implementados en el sector, de tal manera que permita que el sistema tenga mayor eficiencia en la producción de biogás, y en tener control de las variables que afectan directamente a la producción, mediante la implementación de sistemas de control que se analizaran mediante una simulación en herramientas computacionales.

## 5. Justificación

El desarrollo de la porcicultura en Colombia ha ido aumentando en los últimos años, y pese a que es un sector de gran importancia en el país, no se deben eludir sus impactos negativos para el medio ambiente y la salud. Las excretas producidas por los cerdos pueden provocar afectaciones al suelo si tienen altas concentraciones de nitrógeno y fósforo, o incluso microorganismos patógenos, de igual manera se producen algunas afectaciones al agua ya que esta es contaminada directamente a través de filtraciones y escurrimientos, especialmente cuando no se cuenta con una adecuada disposición. Además de los problemas medioambientales mencionados anteriormente, tienen impactos negativos en la salud debido a que estos desechos emiten gases nocivos tanto para las personas como para los mismos animales, gases como el amoníaco (derivado del nitrógeno presente en las heces), sulfuro de hidrógeno, metano y dióxido de carbono.

Sin embargo, en la actualidad existen tecnologías que permiten darle una utilidad a estos desechos, como es la producción de biogás a partir del excremento de cerdo con el fin de generar electricidad, y para el caso de esta investigación también se evalúa el uso del mismo como fertilizante de tierras. Es importante tener presente que para que esta tecnología sea eficaz y cumpla con los rendimientos esperados, es necesario mantener controladas las condiciones óptimas para cada una de las variables fisicoquímicas que se deben tener en cuenta en la producción del biogás, como la temperatura, presión, pH, composición, volumen, entre otras.

En este proyecto, también se pretende estudiar los tipos de biodigestores que generalmente se implementan en las granjas porcícolas, con ayuda de herramientas computacionales y pruebas en laboratorio, haciendo uso de los conocimientos y habilidades adquiridas durante la formación de Ingeniería Química. Esto finalmente va a permitir identificar aquellas falencias que puedan afectar directamente la producción del biogás y en base a estos resultados poder realizar mejoras y tomar decisiones relacionadas al diseño del biodigestor y manejo de las variables fisicoquímicas.

## **6. Análisis de Requerimientos y especificaciones técnicas**

Anteriormente se ha mencionado que el objetivo de este proyecto es diseñar un biodigestor para la producción de biogás y bioabono. Para el correcto desarrollo de este proyecto, es importante conocer los principios básicos del funcionamiento de los biodigestores, y de la formación del biogás, para lo cual se realiza una previa investigación acerca de los modelos existentes, las características de la materia orgánica, los procesos químicos dentro del equipo, y de los factores que intervienen en cada etapa del proceso.

Es importante conocer los antecedentes del proyecto, dentro de los cuales se tiene en cuenta la importancia de la gestión de ciertos residuos orgánicos en fincas, en este caso de los residuos porcícolas, ya que estos son fuente de la generación de gas metano que es altamente perjudicial para la atmosfera. En segundo instante, el planeta debe optar por el uso de fuentes de energías renovables, razón por la cual se almacena el biogás producido por el biodigestor para usos dentro de las fincas. Finalmente, para realizar el aprovechamiento de subproductos, se utilizará el bioabono en los cultivos, teniendo en cuenta que ha recibido cierto tratamiento químico durante el proceso, que hace que sea apto para los cultivos y benéfico para los suelos.

Dentro del estudio realizado, se analizan las variables que intervienen en el correcto funcionamiento del biodigestor, la digestión anaerobia y la eficiencia de la producción del biogás. Tales variables previamente identificadas, serán las bases del diseño, ya que con estas se decidirá como funcionaran los sistemas de control del proceso para garantizar que este sea óptimo.

Finalmente, para correcto desarrollo del diseño, es importante el conocimiento previo de las bases del diseño, es decir las ecuaciones con las que se realiza el dimensionamiento del sistema, y el conocimiento de la herramienta computacional apta; para este caso, tener conocimiento de la importancia del software de procesos, su correcto funcionamiento, y tener claridad en los alcances que se pueden lograr en estos.

## **6.1 Infraestructura del Biodigestor**

Los biodigestores industriales pueden ser muy variados porque son diseñados particularmente para el tipo y cantidad de desechos, tipo de tecnología a utilizar, ubicación física y capacidad de inversión. En general, tienen en común los mismos componentes, siendo los siguientes:

### **6.1.1 Entrada del afluente al sistema**

Está provista de tubería y canales de concreto, se le provee de rejillas, mallas y trampas de sólidos para impedir que materiales sólidos indeseables entren al sistema. También se proveen de puntos de mediciones de caudales, con vertederos en los canales de alimentación.

### **6.1.2 Pila de hidrólisis**

Esta pila permite realizar la etapa hidrolítica y de homogenización de la carga del afluente. Dependiendo de las condiciones topográficas, tiene bombas de dosificación para alimentar el biodigestor o bien se realiza a gravedad.

## **6.2 Biodigestor**

Es el reactor en donde se realiza la mayoría de la digestión anaeróbica de la materia orgánica y también sirve como captación y almacenamiento del biogás. Por razones técnicas y económicas en las áreas tropicales donde se cuenta con áreas suficientes para su ubicación, se están utilizando mucho los reactores del tipo laguna con una cubierta de geomembrana en su parte superior para la captación del biogás. Su fondo también puede ser de geomembrana o bien una pila de concreto.

### **6.2.1. Sistema de agitación**

Se requiere para homogenizar la materia orgánica en el interior del reactor y para liberar las burbujas de biogás que se han formado en el fondo y no logran salir hacia la superficie. El uso de un sistema de agitación aumenta hasta un 30% la producción de biogás en un reactor. La agitación se puede realizar por diferentes medios y depende del diseño del reactor. Existen procedimientos mecánicos con hélices, paletas o rastrillos ubicados en el interior del reactor.

También hay procedimientos hidráulicos que recirculan el afluente en el interior del reactor con ayuda de bombas. Los procedimientos neumáticos se realizan con ayuda de compresores o ventiladores que inyectan en el fondo del reactor parte del biogás para mantener cierta agitación del líquido en el interior de este. La decisión de qué sistema usar, está en función de la tecnología del biodigestor

### **6.2.2. Transporte y tratamiento del biogás**

Se utiliza para llevar el biogás desde el biodigestor hacia el punto de consumo. Está constituida por tuberías de PVC o de acero inoxidable. Adicionalmente contiene las trampas de agua, filtros del sulfuro de hidrógeno, medidores de presión y los medidores de caudal del biogás.

### **6.2.3. Pila de efluente**

Recibe el material líquido que sale del reactor. Sirve como almacén temporal mientras se dispone finalmente enviándolo al campo o suministrándolo a otro sistema de tratamiento secundario. Esta pila comúnmente está construida a cielo abierto, con suelo impermeabilizado con concreto, arcilla o con una geomembrana.

## **6.3. Dimensionamiento del biodigestor**

Para el dimensionamiento de los sistemas de biodigestión se considerarán factores, que permitan, en primera instancia, conocer la cantidad real disponible de excretas dentro la unidad productiva, así como una serie de factores que se describirán a continuación, mismos que podrán utilizarse para realizar estimaciones adecuadas de su dimensionamiento, los cuales deberán quedar registrados en las memorias de cálculo que determinen el potencial de producción de biogás del sistema. Los factores base que deberán considerarse en el dimensionamiento de biodigestores serán:

- Tipo y disponibilidad de la biomasa (excretas porcinas y estiércol bovino).
- Características Físicas, Química y Biológicas de la biomasa.
- Aspectos Geográficos de la zona.

### 6.3.1. Determinación de Biomasa

Estos cálculos deberán basarse en la información proveniente de cada caso en particular, por ejemplo, para granjas porcinas, de la estructura y desarrollo de la piara mes con mes, durante el año de operación representativo, en donde se registren los movimientos en la existencia de animales en consideración de los diferentes parámetros zootécnicos, tales como tasas de pariciones, mortalidad, entradas y salidas por compraventa, entre otros. Asimismo, para el caso de establos, la información provendrá de la estructura del hato dentro de la explotación.

$$PEe = PAE * TDE$$

Donde:

- **PEe:** Producción Diaria de Excretas por cerdo por etapa (Kg/día-animal)
- **PAE:** Peso del Animal por Etapa de Desarrollo (Kg/animal)
- **TDE:** Tasa Diaria de Excreción por etapa (%)

El valor de PEe, permite estimar la producción diaria total de excretas por etapa, generadas dentro de las unidades productivas, por lo que se establecerá la siguiente relación:

$$PDT = PE * PAT$$

Donde:

**PDT:** Producción Diaria Total de Excretas por etapa (Kg/día)

**PE:** Producción Diaria de Excretas por etapa (Kg/día-animal)

**PAT:** Población Animal (Número de animales por Etapa de Desarrollo)

Con este dato, se procederá a determinar la cantidad total de excretas generadas en la granja, mediante el uso de la siguiente relación:

$$PTU = \Sigma PDT$$

Donde:

**PTU:** Producción Diaria Total de Excretas en la Unidad Productiva.

### **6.3.1. Determinación de Flujo Volumétrico del influente**

Posterior a la estimación de biomasa dentro de la unidad productiva, para el diseño del biodigestor, se deberá considerar el flujo volumétrico que se dispondrá dentro del mismo. Para esto, se identificará la cantidad de agua que se ocupará dentro del sistema. Lo anterior, debido a que la eficiencia del proceso anaeróbico dependerá de una correcta relación agua-contenido de sólidos. La cantidad de agua disponible para ser utilizada en el diseño del biodigestor dependerá del sistema de manejo de excretas y estiércoles con el que cuentan las unidades productivas (Golpe de Agua, Escrepa, fosa inundada, manual, entre otros).

### **6.3.2. Características Físicas, Químicas y Biológicas del Influyente**

A efecto de garantizar una eficiente producción de biogás, el proveedor deberá tomar en cuenta, para el dimensionamiento del sistema de biodigestión, datos de las características físicas, químicas y biológicas del influente. Entre los principales parámetros a considerar, se encuentran:

- Contenido de Sólidos (Sólidos Totales, Sólidos Sedimentables, Sólidos Volátiles)
- pH
- Temperatura del influente
- Relación Carbono-Nitrógeno
- Demanda Bioquímica y Química de Oxígeno
- Presencia de Agentes Inhibidores

### **6.3.3. Cálculo de la producción de biogás**

De manera general, el cálculo de la producción de biogás se podrá realizar de acuerdo con la metodología que recomienda el Panel Intergubernamental de Cambio Climático, en su documento “2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”, la cual establece la siguiente formula.

$$Y_v = \left[ \frac{B_o * V_s}{R} \right] \left[ 1 - \frac{K}{RM-1 + K} \right]$$

Donde:

**Y<sub>v</sub>** = Producción diaria de metano por volumen de influente, Lt/Lt.

**VS** = Concentración de Sólidos Volátiles totales (TVS) en gramos por volumen de influente por día.

**B<sub>o</sub>** = Último rendimiento de metano, Lt/gr de TVS en %

**R** = Tiempo de retención en días. **M** = Tasa máxima de crecimiento microbiano por día.

**K** = Parámetro cinético, adimensional.

#### 6.4 Ecuaciones para el diseño de Biodigestores

Cálculo del volumen de digestión

$$V_d = \text{volumen de digestion}$$

$$V_d = \frac{(Kg_{Biomasa} + Kg_{Agua}) * \text{Tiempo de retencion}_{TR}}{\rho_{Mezcla}}$$

Volumen de construcción. El cual debe ser 30% mayor al volumen de digestión

$$V_{cd} = V_d + 0.3 * V_d = 1.3V_d$$

Volumen total del digestor

$$V_{Tk} = \frac{\pi * D^2 * h}{4}$$

Número total de biodigestores

$$N^\circ = \frac{V_{cd}}{V_{Tk}}$$

Biogás generado

$$V_{td} = 0.09m^3 \text{biogas} * 1kg \text{biomasa}$$

Fuente: Castillo, Y., Montegudo, J., Jimenez, R., Patiño, C. 2021

## 6.5. Marco legal

Para el diseño del biodigestor se deben tener en cuenta las limitaciones legales, las cuales pueden influir en gran medida en el desarrollo del estudio, algunas de las normativas se describen a continuación:

### 6.5.1. Normativas ambientales

Para el diseño del biodigestor, se tiene en cuenta el marco legal vigente de Colombia, normas estipuladas en relación con biodigestores e incentivos para la generación de energía a partir de fuentes renovables.

- **El Artículo 5 del Decreto 1713 de 2002** establece que la responsabilidad por los efectos ambientales y a la salud pública generados por las actividades efectuadas en los diferentes componentes del servicio público de aseo de los residuos sólidos, recaerá en la persona prestadora del servicio de aseo; sin embargo, cuando se realice la actividad de aprovechamiento, dicha responsabilidad será de quien ejecute la actividad.
- **La Ley 1715 de 2014** tiene como objetivo promover el desarrollo y el uso de fuentes no convencionales de energía, especialmente aquellas de carácter renovable, y su participación en las Zonas no Interconectadas y en otros usos energéticos como medio para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y el abastecimiento energético. En esta ley se establece que los interesados en realizar inversiones en proyectos de fuentes no convencionales de energía pueden acceder a incentivos tributarios, siempre y cuando se cumplan con los requisitos y procedimientos establecidos por las entidades públicas pertinentes que son: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Social (MADS), Corporación Autónoma Regional (CAR), Ministerio de Minas y Energía, Comisión de regulación de energía y gas (CREG), Autoridad Nacional de licencias ambientales (ANLA). (MinMinas et al., n.d.)
- **La Resolución 754 de 2014** por medio de la cual se adopta la metodología para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los

Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Ministerio de Vivienda, n.d.)

- **El Artículo 7 del decreto 838 de 2005** establece como instrumentos de planificación de la actividad de disposición final dentro del servicio público de aseo los siguientes:
  - Los PGIRS.
  - Los POT.
  - Licencia Ambiental.
  - Reglamento Técnico del Sector, RAS.
  - Reglamento operativo.
  
- **NTC 5167 del 15 de junio de 2004** la cual tiene por objeto establecer los requisitos que deben cumplir y los ensayos a los cuales deben ser sometidos los productos orgánicos como abonos o fertilizantes (ICONTEC internacional, n.d.)

### **Licencias ambientales**

Decreto 1753 de 1994

Decreto 1728 de 2002

Decreto 1180 de 2003

Decreto 1220 de 2005

### **6.6 Concepto y alcance de la licencia ambiental**

La licencia ambiental, es la autorización que otorga la autoridad ambiental competente para la ejecución de un proyecto, obra o actividad, que de acuerdo con la ley y los reglamentos pueda producir deterioro grave a los recursos naturales renovables o al medio ambiente o introducir modificaciones considerables o notorias al paisaje; la cual sujeta al beneficiario de esta, al cumplimiento de los requisitos, términos, condiciones y obligaciones que la misma establezca en relación con la prevención, mitigación, corrección, compensación y manejo de los efectos ambientales del proyecto, obra o actividad autorizada.

La licencia ambiental lleva implícitos todos los permisos, autorizaciones y/o concesiones para el uso, aprovechamiento y/o afectación de los recursos naturales renovables, que sean necesarios para el desarrollo y operación del proyecto, obra o actividad. La licencia ambiental deberá obtenerse previamente a la iniciación del proyecto, obra o actividad.

**Ningún proyecto, obra o actividad requerirá más de una licencia ambiental.**

Son autoridades competentes para otorgar o negar licencia ambiental:

1. El MAVDT
2. Los municipios, distritos y áreas metropolitanas cuya población urbana sea superior a un millón de habitantes dentro de su perímetro urbano.
3. Las autoridades ambientales creadas mediante la Ley 768 de 2002, y 5. Las entidades territoriales delegatarias de las Corporaciones Autónomas Regionales.

**6.6.1 Competencia del MAVDT**

**En el sector hidrocarburos:** exploración, (sísmica y perforación), explotación, transporte y conducción, Estaciones de transferencia y construcción y operación de refinerías) En el sector eléctrico: a) La construcción y operación de centrales generadoras de energía eléctrica con capacidad instalada igual o superior a 100 MW.

**De los estudios ambientales.**

**El decreto 1220 de 2005:** reconoce dos estudios ambientales: el Diagnóstico Ambiental de Alternativas y el Estudio de Impacto Ambiental que deberán ser presentados ante la autoridad ambiental competente. De los términos de referencia. Los términos de referencia son los lineamientos generales que la autoridad ambiental señala para la elaboración y ejecución de los estudios ambientales que deben ser presentados ante la autoridad ambiental competente (Resoluciones 1274 y 1291 de 2006).

## **6.7 Limitaciones ambientales y sociales en el desarrollo del proyecto**

Como en la mayoría de los proyectos se encuentran ciertas limitaciones en relación con el impacto ambiental y social, es decir a la salud y calidad de vida de las personas. En el aspecto ambiental, la relación entre los GEI (gases de efecto invernadero) y el biogás/biometano o biodigestores, y basado en la investigación realizada estas tecnologías no producen cantidades significativas de GEI, sin embargo se debe tomar en consideración el control en el manejo adecuado de los residuos orgánicos, en especial aquellos provenientes de animales ya que se requiere de capacitaciones previas para entender las limitaciones respecto al uso de este tipo de materia orgánica, y así evitar el deterioro del ecosistema en el que se encuentra implementado el proyecto.

Respecto al aspecto social la incorrecta disposición de las heces puede conllevar a cualquier tipo de afectaciones de salud ya que pueden perjudicar la calidad del aire, suelo y agua, además si no se realiza de la manera adecuada se considera una práctica poco recomendable ya que aumenta el crecimiento de microorganismos patógenos que pueden ser un riesgo para la salud y calidad de las personas y animales que habitan dichos lugares (Andres Díaz Roa, n.d.).

Por eso mediante la implementación de un biodigestor que trabaja en ambiente anaerobio, se aprovecha esta materia orgánica y se crean dos subproductos, por un lado, el biogás que puede ser usado como energía en los hogares, y por otro lado el bioabono el cual es utilizado como fertilizante que proporciona al suelo una serie de beneficios para mejorar sus características físicas, químicas y biológicas.

## **6.8 Análisis Económico**

Como ya se ha mencionado anteriormente para el diseño del biodigestor es clave tener en cuenta factores como el volumen el cual viene determinado por la carga diaria que a su vez está basada en la materia orgánica disponible y las dimensiones del biodigestor, las cuales van a depender de la cantidad de biogás que se desea generar ya sea al día o a la semana.

Una vez conocido el volumen del biodigestor y el área de las zanjas requerido se analiza la disponibilidad en el mercado de los diferentes plásticos para poder así determinar el tipo de membrana que se va a utilizar, también se debe tomar en cuenta los cálculos de las circunferencias y radios y con estos datos se puede determinar la longitud necesaria para lograr el volumen requerido. Para determinar estos parámetros es sumamente importante tener en cuenta criterios como disponibilidad de espacio.

En el aspecto financiero además de la membrana y la parte robusta del biodigestor también se debe tener en cuenta la cotización de las diferentes piezas que son fundamentales para la construcción e instalación del biodigestor, como es el caso de tuberías, válvulas, codos, y los diferentes instrumentos que se van a usar para controlar las variables como el pH, temperatura, flujo, entre otros.

Sin embargo, es prescindible que para el diseño del biodigestor los costos de fabricación sean bajos, puesto que la población objetivo del proyecto son las familias de las áreas rurales y se busca que los altos costos de implementación no sean un limitante para la construcción del biodigestor.

## **6.9. Análisis Topográfico**

Algunos de los factores considerados como los más importantes a tener en cuenta para elegir donde se va a instalar el biodigestor son:

- **Materia prima accesible:** Es decir que el lugar donde se encuentran los cerdos este cerca al biodigestor, de tal manera que la recolección y el transporte del estiércol se simplifique, además que el acceso al agua sea el adecuado para poder cargar el biodigestor
- **Ubicación del biodigestor:** Este debe encontrarse cerca del lugar donde se va a consumir el gas ya que la presión no permite el transporte a grandes distancias. También, se debe procurar que este ubicado en un lugar en el que se mantenga una distancia de 10 a 15 metros de cualquier fuente hídrica para evitar contaminaciones

- Topografía del sitio: Se deben tener en cuenta las características del suelo y su estabilidad, ya que si el tipo de suelo no es el adecuado pueden ocurrir derrumbes o deslizamientos

### **6.10 Salud y Seguridad.**

Es importante el uso de calor para el desarrollo óptimo del porcino, ya sea para cría o ceba intensiva, y, por tanto, la obtención de energía térmica y eléctrica. Ahorro en consumo energético (gas, leña, electricidad y gasolina). Una mayor propagación de esta tecnología puede ayudar a reducir el consumo de leña en más del 50% a nivel rural, y tener un impacto en la salud de los beneficiarios (as). Los digestores cumplen una función ecológica como es reciclar totalmente los desechos a un coste bajo, por tanto, el uso de biodigestores contribuye a la reducción de los problemas de contaminación ambiental. El aprovechamiento de la materia orgánica reduce el volumen de basura en los hogares rurales. El biogás es un ahorro económico por la sustitución de reducción de la contaminación de las aguas superficiales con estiércol y otros desechos orgánicos.

### **6.11. Socioculturales**

El uso del fertilizante producido por el biodigestor permite aumentos en la productividad. En el caso de que los productos orgánicos sean vendidos el margen de beneficio obtenido por el productor es mayor, de igual manera se puede utilizar la formación de biogás para cocinar los alimentos puede realizarse sin depender de los combustibles fósiles no renovables (electricidad, leña o gas).

Hay aceptación y valoración sobre la importancia y el deber ciudadano de preservar el medio ambiente.

## 7. Marco referencial

### 7.1 Biodigestores

Un biodigestor es un contenedor sellado herméticamente, dentro del cual se deposita el material de origen vegetal o animal a fermentar, en determinada dilución de agua y allí un grupo de microorganismos presentes en estos desechos producen una reacción química conocida como fermentación anaerobia, en la cual se produce gas metano en su mayoría y fertilizantes orgánicos ricos en nutrientes como el nitrógeno, fosforo y potasio (Bayona & Cortés, 2015). En general, este tipo de sistemas incluyen:

- **Cámara de carga:** Depósito donde se coloca la materia orgánica que alimenta al reactor
- **Reactor:** Tanque en el cual se lleva a cabo la fermentación anaerobia, se encuentra conectado a las cámaras de carga y de descarga
- **Cámara de descarga:** Recibe los residuos provenientes del reactor, los cuales pueden ser usados como abono
- **Cubierta:** Impide la entrada de aire al interior del reactor y evita la fuga del gas producido
- **Tubería:** Conduce el gas producido en el reactor, cuenta con una válvula de seguridad que impide que la presión al interior de la cubierta sobrepase los niveles permitidos
- Dispositivo para captar y almacenar el biogás

Los biodigestores representan una alternativa económica y muy efectiva en comunidades donde el acceso a la energía es limitado, especialmente en las zonas rurales del país. Permiten satisfacer la demanda energética de estas poblaciones y así mismo, proporcionan una solución para manejar estos desechos orgánicos que muchas veces contaminan los recursos hídricos, el aire o el suelo.

### 7.2 Tipología de biodigestores

Existe una gran variedad de biodigestores y se pueden clasificar de acuerdo con diferentes criterios como, modo de operación, tamaño, nivel de sofisticación, llenado y vaciado, número de tanques o sistemas de movilización de biomasa. Estos son algunos de los tipos de biodigestores más comunes:

### 7.2.1 Biodigestor tipo tubular o taiwanés

Es un tipo de biodigestor que tiene como característica tubos largos que pueden ir sobre el piso o enterrados en el suelo, tiene forma alargada, lo cual permite que cuando se carga la masa del líquido dentro del biodigestor este se desplace hacia la salida y los residuos viejos no se mezclen con los nuevos, por esta razón la fermentación se da en forma horizontal y esto hace que sea uno de los más eficientes. (Bayona & Cortés, 2015)

Son fabricados con diferentes tipos de membranas, la cual no debería tener un grosor inferior a 0.80mm, la membrana puede variar en cuanto a tipo de material, grosor, costo, características, las más comunes son de policloruro de vinilo (PVC), polietileno de alta densidad (PDA). Son de fácil instalación y movilidad, y comúnmente se utilizan para sustratos con contenidos de sólidos medios/altos como estiércol de porcino y bovino (FAO. s.f.)

#### Imagen 1. Biodigestor tubular construido con membrana de PVC



Fuente: FAO. 2019

### 7.2.2 Biodigestor CSTR – Flujo y agitación continua

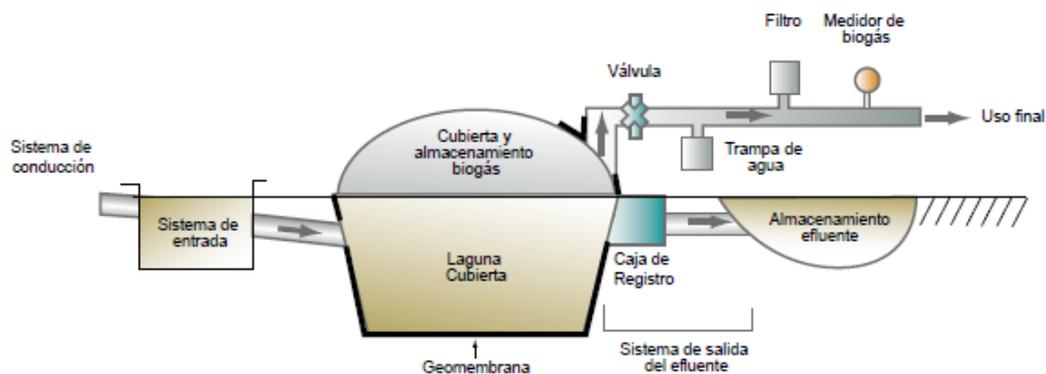
Este tipo de biodigestor procesa elevadas cargas orgánicas, la composición es la misma en cualquier punto dentro del tanque debido a que trabaja en estado estacionario, es decir que las propiedades no varían con el tiempo. Cuenta con un sistema de agitación, por lo tanto, dentro del tanque no hay acumulación, esto también permite que el contacto entre la materia orgánica y los microorganismos encargados de la fermentación sea bastante óptimo, favoreciendo así la transferencia de calor del proceso y una productividad del 15 al 30% de biogás. Este tipo de sistemas son adecuados para mezclas con alta concentración de sólidos, por eso también es uno de los más comunes (Bernal & Suárez, 2018).

### 7.2.3 Biodigestor de laguna cubierta

Este tipo de biodigestores son los más simples, generalmente utilizados para la degradación de purines de la industria bovina. Son lagunas impermeabilizadas y recubiertas herméticamente con membranas de diferentes plásticos, este tipo de biodigestores no presenta sistemas de calefacción ni agitación del medio, por lo que su eficiencia depende de las temperaturas con las que ingresan los efluentes. (FAO, s.f.)

Las cantidades de biogás que generan estos sistemas son altas debido a las grandes dimensiones de estas piscinas, y los volúmenes de materia que ingresa al reactor y no a la eficiencia que por lo general es baja. Estos biodigestores funcionan mejor en zonas tropicales, por lo que se mencionaba anteriormente sobre la temperatura de ingreso al sistema.

**Imagen 2. Biodigestor de sistema de laguna abierta**

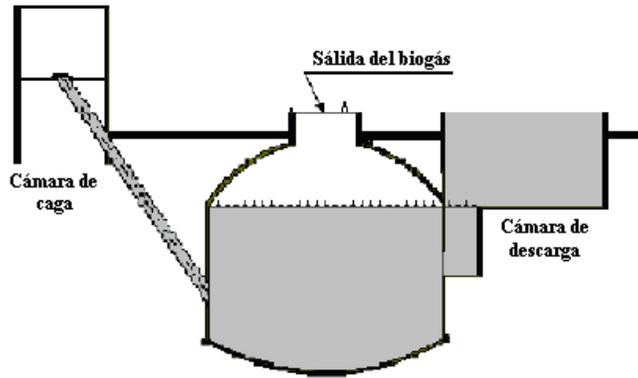


Fuente: Ministerio de Energía y GIZ, 2012

### 7.2.4 Biodigestor tipo chino o de domo fijo

Consiste en una cámara de gas hecha de materiales rígidos como hormigón, ladrillo, cemento, piedra, entre otros. Generalmente están enterrados en el suelo, y en el tanque a medida que aumenta la producción de gas, la presión aumenta forzando al líquido en los tubos de entrada y salida a subir. Este tipo de biodigestor es poco eficiente para generar biogás debido a los largos tiempo de retención, es muy bueno para la obtención de fertilizante. (Bernal & Suárez, 2018)

**Imagen 3. Biodigestor tipo chino**



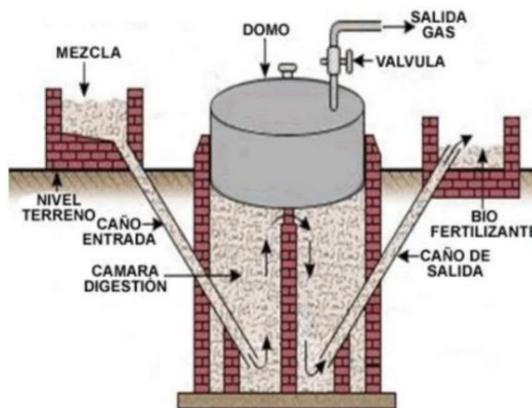
Fuente: Hidalgo, P. 2011

### 7.2.5 Biodigestor tipo hindú

Consiste en un biodigestor vertical subterráneo con un recipiente móvil para gas, el cual flota ya sea sobre la mezcla de fermentación o en una chaqueta de agua, el gas es recolectado en el tambor de gas que se levanta o se baja de acuerdo con la cantidad de gas almacenado. Este biodigestor trabaja a presión constante y es de fácil operación. (González & Olaya, 2009)

Alguna de sus desventajas son los altos costos de los materiales para el tambor de acero y la susceptibilidad a la corrosión de las piezas de acero.

**Imagen 4. Biodigestor tipo hindú**



Fuente: (Heckman et al., 2011)

### **7.3 Materia orgánica de origen Porcicola**

La materia orgánica apta para biodigestores se caracteriza por ser esencialmente desechos orgánicos húmedos como lo son las excretas de animales, los cuales se caracterizan por no tener contaminantes, patógenos ni metales pesados. Adicionalmente, es importante que dentro de su composición, contengan carbono, nitrógeno, azufre y otras trazas, que son importantes para la producción del biogás (Solano et al., 2011).

#### **7.3.1 La biomasa como fuente de energía renovable**

El termino biomasa hace referencia a la materia orgánica de origen biológico, que pueda ser utilizada como fuente de energía renovable; dentro de este concepto, es posible incluir material de origen vegetal, animal, microbiano, residuos de la agroindustria y aguas residuales. (Gutiérrez, F., et al., 2015). De acuerdo con la real academia española, la biomasa puede definirse como: ” *materia orgánica fijada por la fotosíntesis y la materia derivada de las transformaciones naturales o artificiales de dichos compuestos orgánicos* ”

#### **7.3.2 Importancia de la relación carbono nitrógeno del sustrato**

La relación C-N es uno de los factores más importantes a tener en cuenta, ya que la alta presencia de nitrógeno favorece la producción de amoníaco que puede ser perjudicial para las bacterias metanogénicas (Solano et al., 2011). Para el estiércol de porcino, la relación C-N es de 16:1 (Olaya & González, 2009). El estiércol de cerdo es una mezcla de excretas sólidas, solidos totales y solidos volátiles, que tienen un papel importante en la producción del biogás. (Apolo, 2019)

### 7.3.3 Composición química de la materia orgánica

En la tabla número 1 se puede observar la composición química del estiércol de porcino.

**Tabla 1: Composición química del estiércol porcino**

<b>Composición química del estiércol solido porcino</b>					
MO: Materia orgánica					
CE: Conductividad eléctrica					
<b>(%) MO</b>	<b>(%) Humedad</b>	<b>pH</b>	<b>CE (dS/m)</b>	<b>(%) N</b>	<b>(%) P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>
80.86	26.23	6.36	6.27	2.04	6.1
<b>(%) Na</b>	<b>Fe (ppm)</b>	<b>Cu (ppm)</b>	<b>Zn (ppm)</b>	<b>Mn (ppm)</b>	<b>B (ppm)</b>
0.23	29	385	1580	488	1417
<b>(%) K<sub>2</sub>O</b>	<b>(%) CaO</b>	<b>(%) MgO</b>			
1.63	3.98	2.0			

Fuente: Elaboración propia. Adaptado de: (Moreno Ayala & Cadillo Castro, 2018)

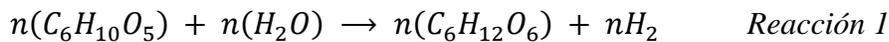
### 7.4 La digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso en el cual, de manera biológica es posible obtener gas metano y otros gases volátiles, mediante el uso de una cámara cerrada herméticamente llamada biodigestor; en este proceso intervienen microorganismos que son los encargados de descomponer la materia orgánica en ausencia de oxígeno (Torres-Sebastián et al., 2021). La materia orgánica o biomasa puede provenir de diferentes fuentes; pueden ser utilizados residuos agroindustriales, agrícolas, o residuos de origen animal tales como los provenientes de las industrias cárnicas, o excrementos. (Manyi-Loh et al., 2013). Este proceso se desarrolla en cuatro etapas, en las que intervienen diferentes tipos de microorganismos en un sistema también llamado sintrofismo (Torres-Sebastián et al., 2021), donde se obtiene como resultado principalmente gas metano, y se forma el digestato o materia orgánica descompuesta, que usualmente es utilizado como fertilizante.

A continuación se describen cada una de las fases de la digestión anaerobia.

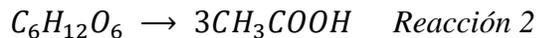
### 7.4.1 Hidrolisis

Esencialmente consiste en la ruptura de enlaces químicos mediante la adición de agua; el primer paso es considerado un proceso lento, que puede limitar la velocidad del proceso de digestión, especialmente si se utiliza materia orgánica sólida. (Anukam et al., 2019). En esta etapa inicial, las macromoléculas son hidrolizadas a sus monómeros por enzimas digestivas provenientes de los anaerobios que digieren las proteínas en aminoácidos. La temperatura optima debe ser entre 30 °C y 50 °C, y un pH entre 5 y 7, (Torres-Sebastián et al., 2021) y es posible representarse mediante la siguiente reacción (1). (Anukam et al., 2019):



### 7.4.2 Acidogénesis

En esta etapa las bacterias introducen productos de hidrolisis a través de la membrana celular para fermentarlo y obtener finalmente un compuesto orgánico como el ácido acético. Durante esta etapa, se producen ácidos grasos volátiles; las concentraciones de las nuevas moléculas dependen de las condiciones del biodigestor. (Torres-Sebastián et al., 2021). Este proceso se puede representar mediante las siguientes reacciones (2, 3 y 4). (Anukam et al., 2019):



### 7.4.3 Acetogénesis

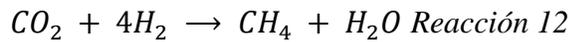
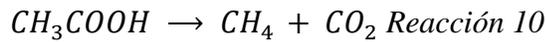
En la etapa anterior se produjo ácido acético, que pasara directamente a la siguiente etapa; sin embargo, los ácidos grasos volátiles que se formaron en la etapa anterior se oxidaran a ácido acético, y adicionalmente se sintetizara H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. (Torres-Sebastián et al., 2021). Las reacciones asociadas a esta etapa se pueden observar a continuación (5, 6, 7 y 8) (Anukam et al., 2019):





#### 7.4.4 Metanogénesis

En esta última etapa, microorganismos pertenecientes al dominio archa, son los encargados de metabolizar los productos a metano; estas bacterias son estrictamente anaeróbicas, sensibles al oxígeno, y a cambios fisicoquímicos dentro del biodigestor que pueden ser fatales para el proceso. La etapa de metanogénesis ocurre por seis rutas metabólicas distintas. A continuación, se pueden observar las reacciones mediante las cuales se produce el metano (10 a 13). (Anukam et al., 2019)



**Tabla 2: Microorganismos que intervienen en el proceso**

Fase	Microorganismo que interviene
Hidrolisis	Bacteroides, Lactobacillus, propionibacterium, Sphingomonas, Sporobacterium, Megaspheara, Bifidobacterium
Acidogenesis Acetogenesis	Clostridium, Paenibacillus, Ruminococcus, Cytophaga- Flavobacterium- Bacteroides
Metanogenesis	Mathanobacterium, Methanospirillum hungatii, Metanosarcina

Fuente: elaboración propia. Adaptado de: (Heckman et al., 2011)

#### 7.4.5 Condiciones para el proceso anaerobio

**Tabla 3: Condiciones del proceso anaerobio**

Variable del proceso	Condición Óptima
PH	6,5 – 7,5 determina la toxicidad de las bacterias metanogénicas
Temperatura	Controlar la temperatura puede aumentar la eficiencia del proceso. Ambiente psicofílico entre 0°C y 20 °C Ambiente mesofílico entre 20 °C y 45 °C Ambiente termofílico entre 45 °C y 97 °C
Tiempo de retención	Está directamente relacionado con la temperatura. En condiciones óptimas deber ser de 20 días a 30 °C
Relación C/N	La relación adecuada es de 20:1 y 30:1
Amoniaco	La concentración debe ser inferior a 200 mg/l

Fuente: elaboración propia. Adaptado de (Olaya & González, 2009)

#### 7.5 El biogás como energía renovable

El biogás es un tipo de energía renovable procedente de la transformación de residuos orgánicos en energía eléctrica, el biogás es un gas renovable compuesto en su mayoría por metano ( $C_2H_4$ ) en un porcentaje del 60%, dióxido de carbono ( $CO_2$ ) en un 40% y aportes menores de nitrógeno, hidrogeno y gas sulfhídrico.

El biogás que se produce generalmente es incoloro e inflamable y se obtiene a partir de la degradación anaerobia (es decir en ausencia de oxígeno) de materia orgánica, por ejemplo, estos residuos pueden ser, ganaderos, purines de cerdo, agroindustriales, lodos de depuradoras de agua, efluentes industriales, madera, residuos domésticos, entre otros. Además de ser convertidos en energía, estos desechos se pueden transformar en abono, con la intención de aumentar la fertilidad de los suelos y mejorar la calidad de los productos que se cultivan.

Para poder llevar al cabo el proceso de descomposición de esta materia, se requiere de un espacio en el que se pueda ya sea almacenar los residuos y por la acción de algunas bacterias y

microorganismos se produzca el biogás, de igual manera se requiere de un espacio para tener los equipos que finalmente van a generar la energía eléctrica. El biogás es de gran utilidad ya que debido a su poder calorífico puede sustituir con cierta ventaja a combustibles tradicionales que cumplen con la misma función.

### 7.5.1 Composición química del biogás

**Tabla 4: Composición química del biogás**

Composición química del biogás		
componente		composición aprox. %
Metano	CH <sub>4</sub>	60-70
Gas carbónico	CO <sub>2</sub>	30-40
Hidrogeno	H <sub>2</sub>	1.0
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0.5
Monóxido de carbono	CO	0.1
Oxígeno	O <sub>2</sub>	0.1
Ácido sulfúrico	H <sub>2</sub> S	0.1

Fuente: Elaboración propia. Tomado de: (Olaya & González, 2009)

### 7.5.2 Factores que afectan la producción del biogás

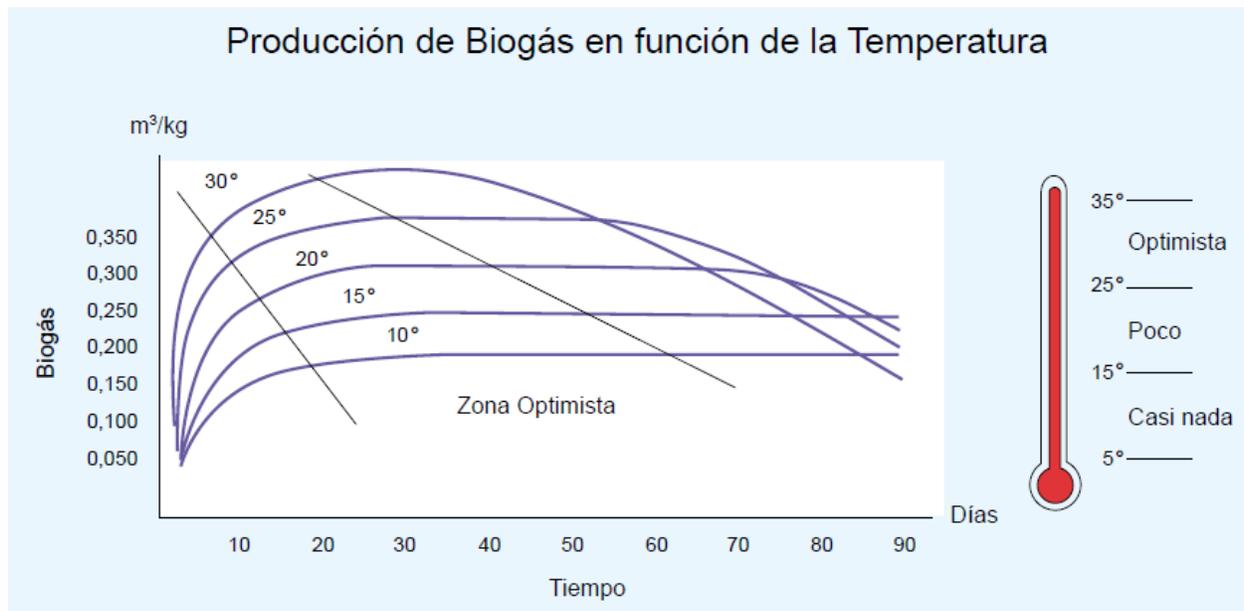
Hay diversos factores que influyen en el funcionamiento del biodigestor, descritos a continuación:

#### 7.5.2.1 Temperatura y tiempo de retención

Según el rango de temperatura y el tiempo de residencia dentro del biodigestor, la fermentación se puede clasificar de la siguiente manera:

- Fermentación psicofísica, rango de temperatura entre 10 y 20°C y más de 100 días de retención
- Fermentación mesofílica, rango de temperatura entre 20 y 35°C y aproximadamente 30 a 40 días de retención
- Fermentación termofílica, rango de temperatura entre 50 y 60°C y más de 8 días de retención

**Grafica 1: Producción de biogás en función de la temperatura**



Fuente (Heckman et al., 2011)

Además, la temperatura es uno de los factores más importantes en cada una de las fases de la digestión anaerobia, ya que esta afecta la velocidad de reacción y el crecimiento de los microorganismos presentes en la materia orgánica. La relación entre el crecimiento de estos y la variación en la temperatura es, a medida que aumenta la temperatura la velocidad de crecimiento de los microorganismos también aumenta, esto hace que el proceso de digestión se acelere, dando lugar a mayor producción de biogás. (Bernal & Suárez, 2018)

#### 7.5.2.2 Niveles de acidez y alcalinidad

En función de la concentración de CO<sub>2</sub> presente en el gas, de la concentración de ácidos volátiles y de la materia prima, las bacterias encargadas del mecanismo de producción de biogás son altamente sensibles a los cambios en los niveles de pH, oscilando entre 6 y 8, siendo el valor deseable entre 7 y 7,2, es decir valores cercanos al pH neutro (Bernal & Suárez, 2018).

Si los niveles de pH son muy altos la acción de las bacterias y las enzimas al interior del tanque se detiene, afecta la producción de ácidos orgánicos, siendo esto un factor limitante en la producción de biogás.

### **7.5.2.3 Humedad**

El contenido de humedad de los residuos a tratar es una variable importante a tener en cuenta para el inicio del proceso, puesto que se asegura un ambiente ideal para los microorganismos y bacterias encargadas de la biodegradación. En este tipo de proceso biológico la biomasa se debe llevar a cabo en base húmeda, con un porcentaje de humedad mayor al 60%, entre los cuales se encuentran la digestión anaerobia y la fermentación alcohólica.

### **7.5.2.4 Contenido de agua en la mezcla**

Para que las bacterias y microorganismos encargados de la biodegradación de la materia orgánica puedan funcionar efectivamente, el contenido de agua en la mezcla no debe ser demasiado bajo ya que la cantidad de biogás que se produzca también será pequeña. Para el caso de exceso de agua, si la mezcla es demasiado diluida, se puede aprovechar un porcentaje bajo de la materia orgánica y la producción del biogás será limitada.

En el caso específico del uso de excrementos ya sea de humanos o animales como alimento para el biodigestor, la razón de biomasa a agua entre 1:1 y 1:2 y por cada 100 kg de heces y orina, se requieren entre 100 y 200 litros de agua. (González & Olaya, 2009)

### **7.5.2.5 Tipo de materia orgánica**

El tipo de material orgánico es un factor de suma importancia para el proceso de producción de biogás, debido a que cada residuo ya sean agroindustriales, desechos de animales, humanos, entre otros) tienen diferentes composiciones químicas que influyen en el rendimiento de la etapa hidrolítica por la complejidad en el rompimiento de las macromoléculas, especialmente en aquellos residuos con alto contenido de sólidos (Bernal & Suárez, 2018).

Para el caso del uso de residuos de animales como materia principal, la biodegradación de estos va a depender del tipo de animal y la alimentación que hayan recibido los mismos. Por esta razón es importante tener en cuenta cuál es la mejor opción de materia prima, ya que hay un sin número de factores que podrían intervenir en la producción del biogás, uno de los más importantes es el rendimiento o eficiencia del gas dependiendo de cada especie animal. (Universo Porcino, s.f.)

### 7.5.2.6 Relación C-N

Para el proceso de biodigestión anaerobia, se deberá considerar la relación de nutrientes encontrada en el influente. Esta puede expresarse en función de la relación carbono-nitrógeno. Cuando esta relación es más alta ( $C:N > 30:1$ ), existirá en el sistema una gran concentración de Ácidos Grasos Volátiles (AGV's) que inhibirán las etapas microbiológicas del sistema. En caso contrario ( $C:N < 20:1$ ), la alta concentración de compuestos nitrogenados también inhibirá la producción de biogás. Por lo anterior, para este tipo de procesos, se considera una relación entre 20:1 y 30:1, siendo la óptima 25:1.

### 7.5.2.7 Niveles de amoníaco

Durante el proceso de degradación anaeróbica, el nitrógeno que proviene del material orgánico es hidrolizado formando nitrógeno amoniacal; factores como el pH, la temperatura, la capacidad del digestor y la relación C/N, afectan la cantidad de amoníaco formado, el cual en exceso puede ser perjudicial, ya que limita el crecimiento bacteriano. Además, se ha demostrado que las altas temperaturas aumentan la formación de amoníaco. (Heckman et al., 2011)

A continuación, en la tabla 5 Se pueden observar diferentes concentraciones de amoníaco y su efecto en el proceso.

**Tabla 5: Concentraciones de amoníaco**

<b>Amoníaco-N (mg/L)</b>	<b>Efectos</b>
50-100	Benéficos
200-1000	Sin efectos adversos
1500-3000	Efectos Inhibitorios a niveles de pH altos
sobre 3000	Toxico

Fuente: (Heckman et al., 2011)

### 7.5.2.8 Presencia de compuestos inhibidores del proceso

Factores como la presencia de metales pesados, antibióticos, altas concentraciones de ácidos volátiles, y condiciones elevadas de nitrógeno y amoníaco, son factores que interrumpen el proceso fermentativo, y destruir las bacterias metanogénicas. (Hilbert, A., et al, SF)

En la tabla 6, se observan algunos de los inhibidores que afectan la eficiencia en la producción de biogás

**Tabla 6: Inhibidores que afectan el proceso**

<b>Inhibidores</b>	<b>Concentración Inhibidora</b>
SO <sub>4</sub>	5.000 ppm
NaCl	40.000 ppm
Nitrato (según contenido de nitrógeno)	0,05 mg/ml
Cu	100 mg/ml
Cr	200 mg/ml
Nitrato	200-500 mg/ml
CN (después que se han domesticado las bacterias metanogénicas a 2-10 mg/ml)	25 mg/ml
ABS (detergente sintético)	20-40 mg/ml
Na	3.500-5.500 mg/ml
K	2.500-4.500 mg/ml
Ca	2.500-4.500 mg/ml
Mg	1.000-1.500 mg/ml

Fuente: Elaboración propia. Adaptado de (Hilbert, A., et al, SF)

## 7.6 Bioabono y recuperación del digestato

El bioabono es el efluente final de la fermentación anaeróbica, también conocido como digestato, o subproducto de los biodigestores. Debido a su alta concentración de nitrógeno mineral en forma de amoníaco, y su alto contenido de materia orgánica, es apto para la agricultura y la industria química; sin embargo, antes de ser utilizado, es necesario realizar tratamiento previo para eliminar compuestos indeseables, para tener como resultado el bioabono. (Monfet et al., 2018)

El bioabono que se obtiene del biodigestor, ha tenido ciertos cambios químicos que hacen que pueda ser asimilado sin problema por las plantas, y se ha demostrado que presenta buenos resultados como cualquier otro abono orgánico, ya que acondiciona el suelo y mejora los cultivos. Algunas de las características del bioabono, son la relación carbono nitrógeno 10:1, que contribuye a que los microorganismos no compitan con el nitrógeno de las plantas, al no superar la relación 11:1, ayuda en la recuperación de la fertilidad de los suelos, y ayuda a prevenir el deterioro

progresivo de los mismos cuando se explotan intensamente. (Centroamericano, Instituto de investigación y tecnología 1985)

Los cambios químicos que puede ocasionar al suelo son: aumento de la capacidad de intercambio catiónico, efecto buffer en el pH del suelo y aporte de macronutrientes y micronutrientes a las plantas.

**Tabla 7: Composición química del bioabono**

<b>Componente</b>	<b>Concentración</b>
Sólidos totales	8-9 g/100g
Sólidos volátiles	5.5-6 g/100g
Nitrógeno total N	0.20%
Fosforo P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.15%
Potasio K <sub>2</sub> O	0.10%

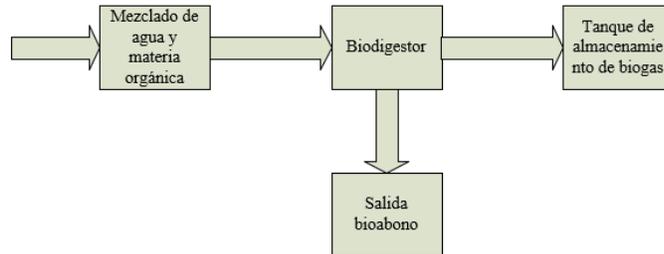
Fuente: (Centroamericano, Investigación y Tecnología. 1985)

Existen diferentes procesos de tratamiento para la recuperación del digestato, con el objetivo de preparar la materia orgánica para su uso en la agricultura, dentro de los cuales se encuentran los procesos mecánicos y fisicoquímicos y los procesos biológicos, siendo estos últimos la forma más sencilla y eficiente de recuperar nutrientes y mejorar la calidad del digestato. Dentro de los biológicos se encuentran el compostaje, la hidrólisis enzimática y el biosecado. Dentro de los procesos mecánicos y físico químicos se encuentran las separaciones sólido-líquido, filtraciones, eliminación de amoníaco, y algunos procesos avanzados como ozonización y oxidación química, oxidación electroquímica, y procesos de microondas y híbridos. (Monfet et al., 2018)

## 8. Metodología para la selección y desarrollo de la solución

### 8.1 Diagrama de bloques de flujo de proceso (BFD)

Diagrama 1: diagrama de flujo de proceso

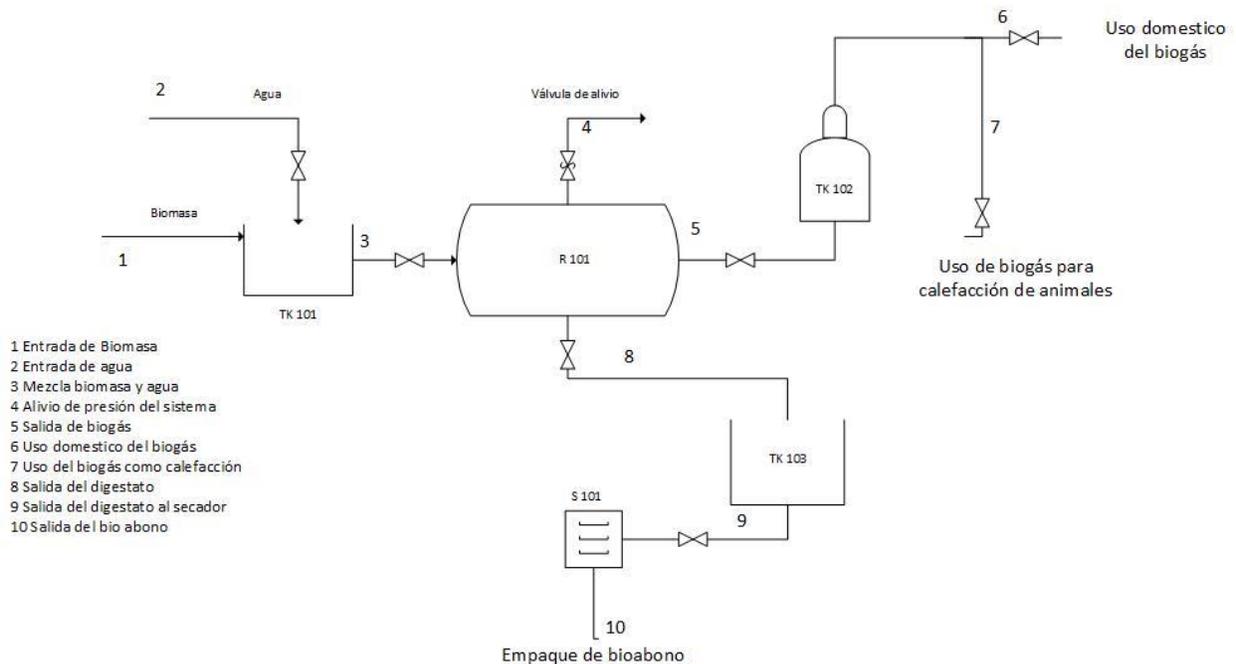


Fuente: Elaboración propia

### 8.2 Diagrama de flujo de proceso (PFD) de la propuesta del biodigestor

Diagrama 2: Diagrama PFD del proceso

TK 101 : Tanque para mezclado de materias primas  
R 101 Reactor anaerobio  
TK 102 Almacenamiento de biogás  
TK 103 Almacenamiento de digestato  
S 101 Unidad de secado de bio abono



Fuente: Elaboración propia en visio

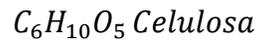
### 8.3 Propuesta de simulación en software Aspen Plus

#### 8.3.4 Selección de los componentes

La materia orgánica se caracteriza por estar conformada por carbohidratos en un 55%, grasas o lípidos en un 40%, y proteínas e inertes en un 5% (Rajendran et al., 2014); estudios demostraron que cuando en la biomasa se aumentan las cantidades de grasas en el 40%, aumenta la producción de biogás, lo cual, aplicado a la propuesta de proyecto, podrían agregarse a la materia orgánica derivada de los cerdos, los residuos de grasas que se generen en las fincas.

Para la elaboración de la simulación, se tuvieron en cuenta estudios anteriores en procesos de simulación sobre biodigestores anaerobios, en los que se tuvieron en cuenta las reacciones correspondientes a cada etapa y sus constantes cinéticas. (Peris, 2011; Rajendran et al., 2014)

Teniendo en cuenta la composición de la biomasa a utilizar, para la simulación se tuvieron en cuenta los siguientes compuestos para simular la materia orgánica.



Adicionalmente, se agregaron compuestos para los sets de reacciones que hacen parte de las cuatro etapas de la digestión anaerobia, que se pueden observar en la imagen 5.

**Imagen 5: lista de componentes simulación**

Component ID	Type	Component name	Alias
C6H10O5	Conventional	DILACTIC-ACID	C6H10O5
WATER	Conventional	WATER	H2O
METHANE	Conventional	METHANE	CH4
CO2	Conventional	CARBON-DIOXIDE	CO2
H2S	Conventional	HYDROGEN-SULFIDE	H2S
HYDROGEN	Conventional	HYDROGEN	H2
C6H12O6	Conventional	DEXTROSE	C6H12O6
ACETI-01	Conventional	ACETIC-ACID	C2H4O2-1
C51H98O6	Conventional	TRIPALMITIN	C51H98O6
C16H34O	Conventional	1-HEXADECANOL	C16H34O
C3H8O3	Conventional	GLYCEROL	C3H8O3
NH3	Conventional	AMMONIA	H3N
PROTEIN	Pseudocomponent		
C5H7NO2	Conventional	ETHYL-CYANOACETATE	C5H7NO2
C3H6O2-1	Conventional	PROPIONIC-ACID	C3H6O2-1
C4H8O2-4	Conventional	ISOBUTYRIC-ACID	C4H8O2-4

Fuente: Elaboración propia en Aspen Plus

Se selecciono el paquete de fluidos NRTL para la simulación, ya que la mezcla a trabajar contiene un alto contenido de agua y hace que se comporte como un compuesto polar, y la presión trabajada es inferior a los 10 bares. (Pe et al., 2021) La correcta selección del paquete de fluidos, es importante ya que cada modelo esta creado en base a ecuaciones matemáticas y resultados empíricos de cada proceso. (Cadavid, 2013).

Para el compuesto proteína, se ingresó en Aspen plus como pseudocomponente, para lo cual fue necesario ingresar propiedades de densidad, peso molecular y temperatura. Posteriormente, en propiedades de petrocaracterización, se calcularon las propiedades faltantes que son necesarias para el cálculo de los coeficientes de interacción binaria, y que son esenciales para que la simulación de resultados.

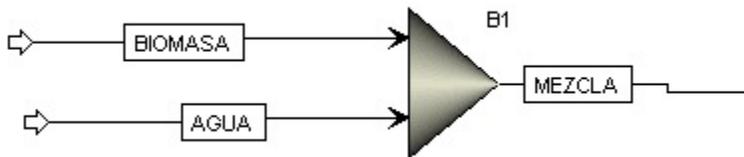
## Imagen 6: Calculo de propiedades de la proteína.

Pure component scalar parameters																
Parameters	Units	Data set	Component	Component	Component	Component	Component	Component	Component	Component	Component	Component	Component	Component	Component	Component
			METHANE	CO2	H2S	HYDROGE	C6H12O6	ACETI-01	C51H98O6	C16H34O	C3H8O3	NH3	CSH7NO2	C3H6O2-1	CAH8O2-4	PROTEIN
API		1 0	340	340	340	340	-11.9371	2,6	24,2719	37,0097	-19,3091	340	1,83235	10,1	16,9	
CHARGE		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DCPLS	cal/mol-K	1 8	2,33042	3,40556		1,64617	30,165	6,52042	5,43434	17,5736	19,3215	6,06676	12,9965	6,37776	7,17171	
DGFORM	cal/mol	1 5	-12059,3	-94193,7	-7987,01	0	-204309	-89471,7	-113858	-11856,3	-106788	-3917,07	-48963,4	-87584,8	-86486,1	141900
DGSFRM	cal/mol	1 2					-216896		-124725	-23535,9						
DHAQFM	cal/mol	1	-21266,8	-98834,4	-9482,18	-1003,15		-116100				-19176,9				
DHFORM	cal/mol	1 2	-17798,8	-93988,2	-4927,39	0	-260103	-103373	-455001	-124630	-138029	-10962,5	-75475,3	-108317	-115625	101182
DHSFRM	cal/mol	1 7					-304122		-546479	-164804						
DHVLB	cal/mol	1 2	1951,68	3909,98	4472,15	214,136	26171,5	5583,98	20041,2	13386,6	15861	5571,89	13177	7430,69	8245,06	7434,94
FREEZEPT	C	1 0	-182,456	-56,57	-85,47	-259,2	146	16,66	65,86	49,2	18,18	-77,74	-22,5	-20,7	-46	
HCOM	cal/mol	1	-191702		-1,2372217	-57757,7	-606074	-194564	-7,077e+06	-2,32039e...	-352775	-75673,5	-593054	-333190	-477787	
HFUS	cal/mol	1 9	224,85	2154,15	567,617	27,9689	7506,93	2801,66	40126,1	14091,9	4366,1	1351,15	3248,3	2546,1	1199,2	
MUP	debye	1 2	0	0	0,968331	0	2,7491	1,7388	2,79995	1,66985	2,68015	1,46899	2,1705	1,75079	1,09125	0
MW		1 3	16,0428	44,0098	34,0819	2,01588	180,158	60,0526	807,336	242,445	92,0947	17,0306	113,116	74,0794	88,1063	367,419
OMEGA		1 1	0,0115478	0,223621	0,0941677	-0,215993	2,3867	0,466521	1,97439	0,778775	0,51269	0,252608	0,558431	0,579579	0,61405	-0,00309151
OMGPRS		1 8	0,01	0,231	0,1	0						0,255				
PC	bar	1 4	45,99	73,83	89,6291	13,13	48,2	57,86	2,368	14,68	75	112,8	33,4	46,68	37	174,544
PCPRS	bar	1 9	46,17	73,76	90,07	20,47						112,77				
RKTRRA		1 2	0,28927	0,27256	0,28135	0,321	0,31797	0,22401	0,14963	0,23557	0,25601	0,24658	0,22425	0,23107	0,22903	0,887135
S02SE	cal/mol-K	1	63,7958	50,3696	38,8688	31,2124		114,165				69,7011		146,749		
SG		1 1	0,3	0,3	0,3	0,3	1,18348	1,0553	0,90838	0,839714	1,26124	0,9992	1,06126	0,9992	0,9535	
TB	C	1 0	-161,49	-78,45	-60,35	-252,76	343,85	117,9	602,85	324,85	287,85	-33,43	206	141,17	154,5	
TC	C	1 6	-82,586	31,06	100,38	-239,96	481,85	318,8	652,15	495,45	576,85	132,5	405,85	327,66	331,85	400,504
TCPRS	C	1 2	-82,52	31	100,4	-229,55						132,4				
TPT	C	1 1	-182,456	-56,57	-85,47	-259,2	146	16,66	65,75	49,2	18,18	-77,74	-22,5	-20,7	-46	
VB	cc/mol	1 1	37,9694	35,0189	35,8604	28,5681	204,631	63,9308	1997,72	402,39	86,85	24,9801	129,899	86,085	108,687	258,177
VC	cc/mol	1 2	98,6	94	98,5	64,147	414	177	4950	1080	264	72,47	358	235	292	94,1899
VLSTD	cc/mol	1 5	53,5578	53,5578	53,5578	53,5578	152,61	57,63	890,992	289,448	73,2027	53,5578	106,855	74,2798	92,6015	256,936

Fuente: Elaboración propia en Aspen Plus.

Posteriormente, en el ambiente de simulación, se crean las corrientes de entrada correspondientes a la biomasa y el agua ingresadas a tempera ambiente de 25 °C y 1 atm de presión, las cuales ingresan a un mezclador, obteniendo la mezcla que será enviada al reactor, que se puede observar en la imagen 6.

## Imagen 7. Corrientes de entrada al mezclador



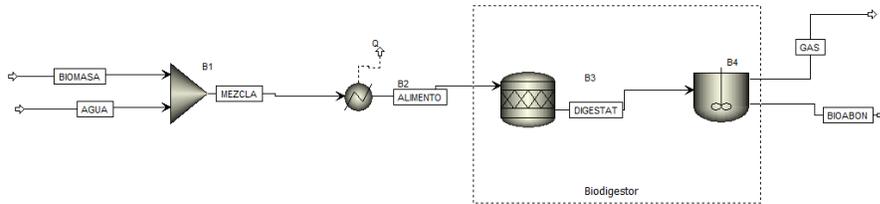
Fuente: Elaboración propia en software Aspen Plus

Mediante el uso de dos reactores, se simula la digestión anaerobia; inicialmente en un reactor estequiométrico (RStoik) se agregan los sets de reacciones correspondientes a la etapa de hidrolisis, donde previamente se adiciono un intercambiador de calor, para asegurar la temperatura de reacción de 35 °C.

En un reactor CSTR, se agregan las reacciones correspondientes a las etapas Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis, con un tiempo de residencia de 40 días.

- Fermentación mesofílica, rango de temperatura entre 20 y 35°C y aproximadamente 30 a 40 días de retención

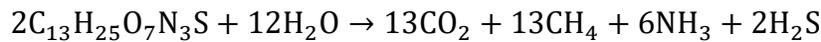
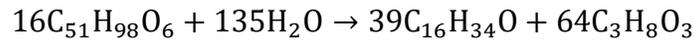
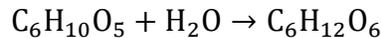
**Imagen 8: Diagrama de simulación en Aspen Plus**



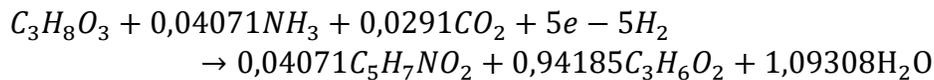
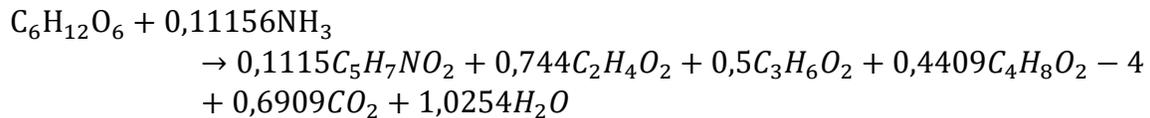
Fuente: Elaboración propia en software Aspen Plus

### 8.3.5 Reacciones involucradas en el proceso de la digestión anaerobia

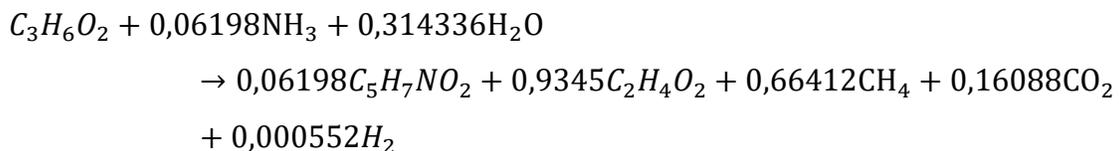
#### 8.3.5.6 Reacciones etapa de hidrolisis

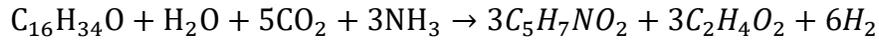
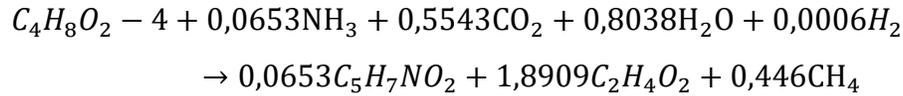


#### 8.3.5.7 Reacciones etapa de acidogénesis

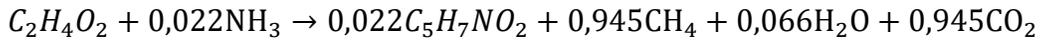


#### 8.3.5.8 Reacciones etapa de acetogenesis





### 8.3.5.9 Reacciones etapa de metanogénesis



## 9. Resultados simulación y análisis de sensibilidad

Visualización de las corrientes involucradas

**Imagen 9: composición de las corrientes involucradas**

	Units	AGUA	ALIMENTO	BIOABON	BIOMASA	DIGESTAT	GAS	MEZCLA
Enthalpy Flow	cal/sec	-105254	-115937	-115760	-11028,6	-115237	-544,237	-116282
Average MW		18,0153	26,4691	26,1273	430,483	27,0201	26,7361	26,4691
♦ Mole Flows	kmol/hr	5,55084	5,66699	5,69845	0,116148	5,55142	0,0416959	5,66699
♦ Mole Fractions								
- Mass Flows	kg/hr	100	150	148,885	50	150	1,11478	150
C6H10O5	kg/hr	0	10,3579	7,25054	10,3579	7,25055	4,77313e-06	10,3579
WATER	kg/hr	100	100	95,864	0	92,9851	0,0390089	100
METHANE	kg/hr	0	0	0,13022	0	0,302793	0,385186	0
CO2	kg/hr	0	0	1,14931	0	0,830647	0,660809	0
H2S	kg/hr	0	0	0,0836927	0	0,098964	0,0152713	0
HYDROGEN	kg/hr	0	0	2,39922e-08	0	0	2,4705e-06	0
C6H12O6	kg/hr	0	0	0,101685	0	3,45263	3,87824e-16	0
ACETI-01	kg/hr	0	0	0,000101457	0	0	2,59888e-08	0
C51H98O6	kg/hr	0	37,5083	3,75083	37,5083	3,75083	3,51709e-21	37,5083
C16H34O	kg/hr	0	0	24,7098	0	24,7101	1,62226e-08	0
C3H8O3	kg/hr	0	0	3,43784	0	15,4032	1,04936e-08	0
NH3	kg/hr	0	0	0,017388	0	0,148356	0,000163521	0
PROTEIN	kg/hr	0	2,13376	1,05326	2,13376	1,06688	0,0136158	2,13376
C5H7NO2	kg/hr	0	0	0,868791	0	0	2,74247e-06	0
C3H6O2-1	kg/hr	0	0	9,74679	0	0	0,000652015	0
C4H8O2-4	kg/hr	0	0	0,721008	0	0	6,81493e-05	0
♦ Mass Fractions								
Volume Flow	l/min	1,6768	3,91229	2,82143	2,06601	8,4391	17,5718	3,86351
♦ Vapor Phase								
♦ Liquid Phase								

Fuente: Elaboración propia en Aspen Plus

Resultados para las siguientes concentraciones

C6H10O5: 0.55

Proteína: 0.05

C51H98O6: 0.4

### Imagen 10: Resultados en flujo masico

	Units	DIGESTAT	BIOABON	GAS
C5H7NO2		0	0,00134783	5,81464e-07
C3H6O2-1		0	0,0230891	0,000211089
C4H8O2-4		0	0,00143607	1,85507e-05
<b>- Mass Flows</b>	<b>kg/hr</b>	<b>150</b>	<b>148,885</b>	<b>1,11478</b>
C6H10O5	kg/hr	7,25055	7,25054	4,77313e-06
WATER	kg/hr	92,9851	95,864	0,0390089
METHANE	kg/hr	0,302793	0,13022	0,385186
CO2	kg/hr	0,830647	1,14931	0,660809
H2S	kg/hr	0,098964	0,0836927	0,0152713
HYDROGEN	kg/hr	0	2,39922e-08	2,4705e-06
C6H12O6	kg/hr	3,45263	0,101685	3,87824e-16
ACETI-01	kg/hr	0	0,000101457	2,59888e-08
C51H98O6	kg/hr	3,75083	3,75083	3,51709e-21
C16H34O	kg/hr	24,7101	24,7098	1,62226e-08
C3H8O3	kg/hr	15,4032	3,43784	1,04936e-08
NH3	kg/hr	0,148356	0,017388	0,000163521
PROTEIN	kg/hr	1,06688	1,05326	0,0136158
C5H7NO2	kg/hr	0	0,868791	2,74247e-06
C3H6O2-1	kg/hr	0	9,74679	0,000652015
C4H8O2-4	kg/hr	0	0,721008	6,81493e-05
<b>+ Mass Fractions</b>				
Volume Flow	l/min	8,4391	2,82143	17,5718
<b>+ Vapor Phase</b>				
<b>+ Liquid Phase</b>				

Fuente: Elaboración propia en Aspen Plus

Resultados para las siguientes concentraciones:

C6H10O5: 0.4

Proteína: 0.1

C51H98O6: 0.5

### Imagen 11: Resultados en flujo masico

	Units	AGUA	BIOMASA	MEZCLA	GAS
Enthalpy Flow	cal/sec	-105254	-9581,34	-114835	-710,499
Average MW		18,0153	505,267	26,5496	26,7267
<b>+ Mole Flows</b>	<b>kmol/hr</b>	<b>5,55084</b>	<b>0,0989577</b>	<b>5,6498</b>	<b>0,0558025</b>
<b>+ Mole Fractions</b>					
<b>- Mass Flows</b>	<b>kg/hr</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>150</b>	<b>1,49142</b>
C6H10O5	kg/hr	0	6,41809	6,41809	4,00115e-06
WATER	kg/hr	100	0	100	0,0521495
METHANE	kg/hr	0	0	0	0,518946
CO2	kg/hr	0	0	0	0,853092
H2S	kg/hr	0	0	0	0,033386
HYDROGEN	kg/hr	0	0	0	2,64353e-06
C6H12O6	kg/hr	0	0	0	3,25099e-16
ACETI-01	kg/hr	0	0	0	2,18759e-08
C51H98O6	kg/hr	0	39,946	39,946	5,06733e-21
C16H34O	kg/hr	0	0	0	2,3373e-08
C3H8O3	kg/hr	0	0	0	1,51221e-08
NH3	kg/hr	0	0	0	0,00165377
PROTEIN	kg/hr	0	3,63589	3,63589	0,0312103
C5H7NO2	kg/hr	0	0	0	3,43912e-06
C3H6O2-1	kg/hr	0	0	0	0,000911636
C4H8O2-4	kg/hr	0	0	0	5,67139e-05
<b>+ Mass Fractions</b>					
Volume Flow	l/min	1,6768	2,42248	3,94736	23,5167
<b>+ Vapor Phase</b>					
<b>+ Liquid Phase</b>					

Fuente: Elaboración propia en Aspen Plus

Resultados para las siguientes concentraciones

C6H10O5: 0.3

Proteína: 0.1

C51H98O6: 0.6

**Imagen 12: Resultados en flujo másico**

	Units	AGUA	ALIMENTO	BIOABON	BIOMASA	DIGESTAT	GAS	MEZCLA
Average MW		18,0153	26,6024	26,2998	569,786	27,1129	25,6285	26,6024
<b>+</b> Mole Flows	kmol/hr	<b>5,55084</b>	<b>5,6386</b>	<b>5,66324</b>	<b>0,0877523</b>	<b>5,53242</b>	<b>0,0412725</b>	<b>5,6386</b>
<b>+</b> Mass Fractions								
<b>-</b> Mass Fractions	kg/hr	<b>100</b>	<b>150</b>	<b>148,942</b>	<b>50</b>	<b>150</b>	<b>1,05775</b>	<b>150</b>
C6H10O5	kg/hr	0	4,26851	2,98795	4,26851	2,98796	1,97718e-06	4,26851
WATER	kg/hr	100	100	95,1893	0	92,1806	0,0385546	100
METHANE	kg/hr	0	0	0,137584	0	0,457531	0,409074	0
CO2	kg/hr	0	0	0,976853	0	1,25514	0,564558	0
H2S	kg/hr	0	0	0,126362	0	0,149538	0,0231763	0
HYDROGEN	kg/hr	0	0	2,71426e-08	0	0	2,80937e-06	0
C6H12O6	kg/hr	0	0	0,0419043	0	1,42283	1,60648e-16	0
ACETI-01	kg/hr	0	0	4,22328e-05	0	0	1,08742e-08	0
C51H98O6	kg/hr	0	42,5073	4,25073	42,5073	4,25073	4,00645e-21	42,5073
C16H34O	kg/hr	0	0	28,003	0	28,0034	1,84797e-08	0
C3H8O3	kg/hr	0	0	3,89601	0	17,4561	1,19565e-08	0
NH3	kg/hr	0	0	0,104187	0	0,224171	0,000985506	0
PROTEIN	kg/hr	0	3,22418	1,59143	3,22418	1,61209	0,0206594	3,22418
C5H7NO2	kg/hr	0	0	0,79038	0	0	2,50785e-06	0
C3H6O2-1	kg/hr	0	0	10,5493	0	0	0,000709351	0
C4H8O2-4	kg/hr	0	0	0,297128	0	0	2,79367e-05	0
<b>+</b> Mass Fractions								
Volume Flow	l/min	1,6768	4,08996	2,87138	2,31641	16,0293	17,3933	4,03994
<b>+</b> Vapor Phase								
<b>+</b> Liquid Phase								

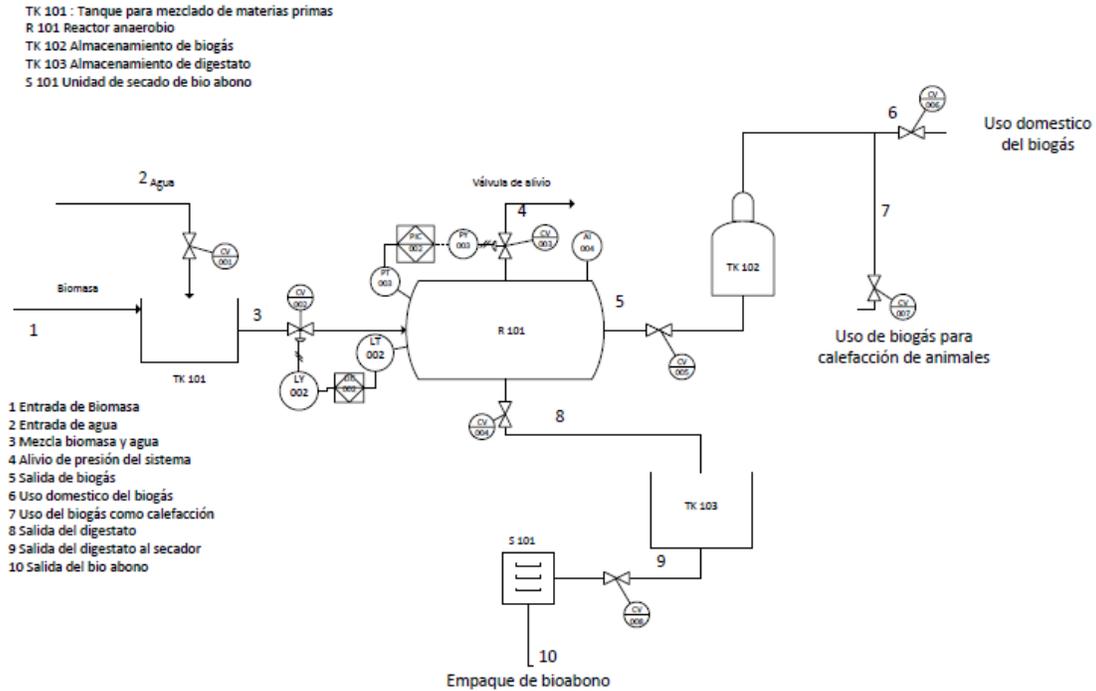
Fuente: Elaboración propia en Aspen Plus

## 10. Propuesta para el funcionamiento óptimo del biodigestor

A continuación, se presenta la propuesta de mejora del funcionamiento del biodigestor mediante el uso de lazos de control con sensores de presión, nivel, temperatura y pH.

Lo que se busca con la implementación de estos lazos de control, es llevar un control del nivel interno del biorreactor, para garantizar la operación óptima; se llevara control de la presión, ya que un aumento de metano dentro de este puede afectar las condiciones de pH, y por lo tanto la vida de los microorganismos que allí se encuentran. Finalmente, un medidor de pH, el cual es visible al operario, para identificar si es necesario aumentar el caudal de entrada, o si es necesario adicionar un aditivo como el hidróxido de sodio o hidróxido de potasio para aumentar el pH.

### Imagen 13: Diagrama de instrumentación y tubería



Fuente: Elaboración propia en Visio bajo normas ISA

#### 10.1 Temperatura ambiental

En la puesta en marcha del biodigestor, se debe tener en cuenta que la producción de biogás se verá afectada por la temperatura de la zona donde se encuentre el montaje; de tal manera que, si se desea una mayor producción de biogás en épocas del año donde las temperaturas descienden, se debe aumentar la carga de biomasa, teniendo en cuenta que se debe mantener el pH óptimo.

#### 10.2 Contenido de lípidos en la mezcla

Aumentar el contenido de grasas en la mezcla; esto se puede realizar agregando al biodigestor residuos de grasa que se obtienen dentro de las mismas fincas. Un aumento en la cantidad de estas, garantiza una mayor producción de biogás (Rajendran et al., 2014)

#### 10.3 Control de pH

Se plantea un sensor con el cual sea posible visualizar el PH del Biorreactor, con el fin de analizar lo siguiente:

Asegurar el PH cercano a 7 para el arranque del biorreactor; para esto, la materia prima debe ser enriquecida con inóculos metalogénicos (Pulido, A, Et Al 2016)

Si el PH del biorreactor es mayor al óptimo, (7-7,2), se aumentaras las cargas para aumentar la producción de metano, y novelar gradualmente el PH

Si se requiere aumentar el PH, según la medición que se obtenga se añadirá a la mezcla compuestos alcalinos tales como cal, hidróxido de sodio o hidróxido de potasio.

#### **10.4 Mezclado y contenido de agua**

El mezclado se realiza de manera manual, garantizando la relación 1:1 y 1:2; para esto, se plantea una corriente de agua de fácil acceso, para garantizar la proporción óptima para la producción de biogás.

#### **10.5 Control de presión**

Inicialmente el sistema se debe encontrar perfectamente sellado para evitar fugas de gas; también cuenta con una válvula de alivio, y un sensor de medición de presión, el cual se encargará de abrir la válvula en caso de que la presión sea demasiado alta.

### **11. Análisis de costos**

#### **11.1. Costos del biodigestor**

<b>COSTOS DEL BIODIGESTOR</b>			
<b>unidad</b>	<b>descripción</b>	<b>valor unitario</b>	<b>valor total</b>
500	ladrillos	\$ 1.250	\$ 625.000
3	bultos de cemento	\$ 48.000	\$ 144.000
100	paladas de arena	\$ 1.000	\$ 100.000
2	tubo de PVC de 1* metros	\$ 43.000	\$ 86.000
1	un acople macho roscado de PVC de 1 1/2"	\$ 5.000	\$ 5.000
1	un acople macho hembra roscado de PVC	\$ 7.000	\$ 7.000
1	Arandela en aluminio de 15cm de diámetro y agujero centran de 1 1/2	\$ 6.200	\$ 6.200

1	tubo de PVC de 2	\$ 12.000	\$ 12.000
2	"T" de PVC de 1 1/2"	\$ 8.000	\$ 16.000
1	galón transparente	\$ 5.000	\$ 5.000
1	"Y" sanitaria de PVC de 4"	\$ 29.000	\$ 29.000
1	tubo de 4" m	\$ 30.000	\$ 30.000
1	reductores de 4" a 1 1/2"	\$ 13.000	\$ 13.000
7	metros de anguera roscada	\$ 5.700	\$ 39.900
67	metros de plástico tubular calibre 8 con protección a los rayos UV	\$ 9.000	\$ 603.000
<b>total</b>			<b>\$ 1.721.100</b>

**Tabla 8: costos para diseñar el biodigestor**

### 11.2 Costos tanques

<b>Costos tanque de entrada y salida</b>	
Tanque	valor
Tanque entrada	\$ 1.500.000
Tanque salida	\$ 4.500.000
<b>total</b>	<b>\$ 6.000.000</b>

**Tabla 9: Costos de tanques**

### 11.3 Costos para el invernadero

<b>costos para invernadero</b>	
descripción	valor
polietileno	\$ 450.000
listones	\$ 300.000
<b>total</b>	<b>\$ 750.000</b>

**Tabla 10: costos invernadero**

#### 11.4 Montaje del biodigestor

<b>montaje del biodigestor</b>	
descripción	valor
mano de obra	\$ 3.000.000
materiales biodigestor	\$ 1.721.100
materiales invernadero	\$ 750.000
<b>total</b>	<b>\$ 5.471.100</b>

**Tabla 11: Montaje del biodigestor**

#### 11.5 Balance de costos

<b>Balance De Equipos</b>					
<b>Ítem</b>	<b>cantidad</b>	<b>costo</b>	<b>costo total</b>	<b>vida útil</b>	<b>valor de liquidación</b>
moto bomba	1	\$ 350.000	\$ 350.000	5 años	\$ 50.000
Calefactor	1	\$ 100.000	\$ 100.000	5 años	\$ 20.000
Computador	1	\$ 1.500.000	\$ 1.500.000	3 años	\$ 200.000
Carretilla	1	\$ 300.000	\$ 300.000	5 años	\$ 50.000
Palas	3	\$ 20.000	\$ 60.000	5 años	\$ 0
equipo de oficina.	1	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000	3 años	\$ 50.000
<b>Total</b>		<b>\$ 3.270.000</b>	<b>\$ 3.310.000</b>		<b>\$ 370.000</b>

**Tabla 12: Balance de costos**

#### 11.6 Costos directos e indirectos

<b>Maquinaria Y Equipo</b>	
descripción	valor
costos indirectos	\$ 3.000.000
costos directos	\$ 13.300.000
<b>total</b>	<b>\$ 16.300.000</b>

**Tabla 13: costos directos e indirectos**

**Costos indirectos:** Son costos que complementan la acción para el montaje de los biodigestores, están representados por: puntillas, serrucho, pegante para PVC, entre otros (\$ 300.000). El valor asociado a estos costos lo representa la asesoría por un experto en el tema, en cuanto al montaje y puesta en marcha de este, se estima un valor de 3.000.000. El valor del generador de energía eléctrica es de \$10'000.000.

## **12. Análisis de resultados y recomendaciones**

Se puede evidenciar en la simulación, que en la corriente gaseosa además del gas metano, se producen en menor medida trazas de otros compuestos que se forman dentro de la digestión anaerobia. Para este caso, si se desea obtener biometano, es decir gas limpio, es necesario que este se pase a través de una columna de absorción con el fin de eliminar impurezas, ya que de liberarse a la atmosfera pueden ocasionar efectos negativos a la atmosfera y al medio ambiente.

De acuerdo con investigaciones realizadas, se encontró que la producción de biogás presenta un aumento directamente proporcional con el incremento de lípidos en la mezcla de biomasa. Esto se pudo evidenciar en el análisis de sensibilidad realizado en la simulación de aspen plus, al conseguir resultados al trabajar con diferentes concentraciones de cada uno de los componentes. Se obtuvo como resultado el análisis de sensibilidad, que cuando la cantidad de carbohidratos se encuentra en un 40%, los lípidos en 50% y las proteínas en un 10%, se obtiene mayor cantidad de biogás; para este caso, de una corriente de entrada de 150 kg/h, es posible obtener 0,51 kg/h de gas metano.

Teniendo en cuenta que las excretas de los porcinos son la base de carga para el biodigestor y su respectivo tratamiento para la obtención principalmente de biogás y abono orgánico, la digestión anaerobia se destacan por su alta capacidad para producir metano, además porque contienen alta concentración de nutrientes comparados con otros sustratos; dichas excretas gozan de esta propiedad debido a que los cerdos son ineficientes al asimilar los nutrientes, lo que genera que desperdicien altos porcentajes de alimento.

### 13. Conclusiones

- El uso de la digestión anaeróbica en la implementación de biodigestores para la formación de una fuente de energía renovable como el biogás y un fertilizante orgánico de calidad como el bioabono, representa una alternativa bastante amigable con el medio ambiente, ya que además de evitar la emisión de gases de efecto invernadero provenientes de la descomposición de la materia orgánica, el biogás puede reemplazar algunos combustibles fósiles como el gas natural, esto toma importancia en el momento de la crisis energética actual en la que se encuentra la humanidad.
- Se puede concluir efectiva la producción de biogás mediante la utilización de estiércol de cerdo, ya que los resultados obtenidos a partir de la simulación demuestran que
- Con la evaluación del modelo planteado se obtuvieron parámetros de los equipos principales para el biodigestor, obteniendo resultados para una producción de m<sup>3</sup>/h de biogás con una concentración de % de metano, % de CO<sub>2</sub> y con una población de cerdos. Cabe resaltar que, para lograr un adecuado funcionamiento de los biodigestores, se deben utilizar mezclas y efectuar la carga diariamente para mantener una producción continua de biogás y bioabono; si se introducen volúmenes de mezcla mayores a los diseños se resentirá arrastre de las bacterias que degradan la materia orgánica por la reducción en el tiempo de retención lo cual puede ocasionar problemas de acidificación en el proceso, malos olores y disminución en la producción de biogás.
- Se realizó una metodología con el objetivo de facilitar el análisis y cálculo de los parámetros para el diseño y construcción de plantas de biogás tubular (biodigestores), teniendo como herramienta de trabajo el procesador Aspen.
- La experiencia ha demostrado, que una de las dificultades que se presenta para la construcción de los biodigestores, es la determinación de sus parámetros constructivos y estabilidad del proceso.
- Se pudo evidenciar en la simulación que el contenido de metano que es posible obtener, varía respecto al contenido de lípidos en la mezcla. Este valor es mayor en altas concentraciones
- Los sistemas de control en biodigestores son importantes si se desean controlar las variables de proceso, y así mejorar la producción de gas metano.

- Se puede evidenciar que, con un aumento de proteínas en la mezcla, la producción de biogás disminuye, ya que estas promueven la formación de aminoácidos y no de ácidos grasos volátiles que son la raíz de formación del gas metano. Es decir, que los altos contenidos de proteína actúan como inhibidores del proceso.
- Para la producción de un biodigestor em cuanto, a costos, sale beneficioso ya que solo se invierte en la formación del biodigestor, ya que es autosostenible y se realiza mantenimiento cada 5 años, se tiene en cuenta la vida útil de cada equipo a usar.

#### 14. Bibliografía

- [1]. Andrea, S., Salazar, D., Yesid, H., & Cortes, T. (n.d.). *Análisis de viabilidad de la implementación de biodigestores como alternativa energética para familias del área rural*.
- [2]. Andres Díaz Roa, C. (n.d.). *Implementación de un biodigestor para la generación de biogás y biol en Bogotá a partir de heces caninas usando un ecocatalizador como acelerante biológico*. [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria)
- [3]. Anukam, A., Mohammadi, A., Naqvi, M., & Granström, K. (2019). Methods of accelerating and optimizing process efficiency. *Processes*, 7(8), 1–19.
- [4]. Apolo, G. M. (2019). Diseño y emplazamiento de un biodigestor para el aprovechamiento de biogás en la granja de explotación porcina “Mis Tres Marías” Arenillas-El Oro-Ecuador. *Universidad Politecnica Salesiana*, 76.
- [5]. A. Pulido and J. Espitia, “Diseño E Implementación De Un Sistema De Supervisión, Monitoreo Y Control De Temperatura, Presión Y Tiempo De Proceso En Un Sistema De Digestión Anaeróbia De Biomasa (Contenido Ruminal Bovino) a Escala De Laboratorio,” p. 120, 2016, [Online]. Available: <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/7358>.
- [6]. Cadavid, N. (2013). *Incidencia De La Selección Del Paquete Termodinámico En La Simulación Para El Diseño De Procesos En La Producción Del Formaldehído Y Estireno*. 94. [https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/8227/NataliaAndrea\\_CadavidHernandez\\_2013.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/8227/NataliaAndrea_CadavidHernandez_2013.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- [7]. Centroamericano, I. de I. y T. I. (1985). *Biogas Y Bioabono*. <http://biblioteca.olade.org/opac->

tmpl/Documentos/cg00199.pdf

- [8]. Heckman, J. J., Pinto, R., & Savelyev, P. A. (2011). Minenergía / Pnud / Fao / Gef. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.
- [9]. Manyi-Loh, C. E., Mamphweli, S. N., Meyer, E. L., Okoh, A. I., Makaka, G., & Simon, M. (2013). Microbial anaerobic digestion (bio-digesters) as an approach to the decontamination of animal wastes in pollution control and the generation of renewable energy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 10(9), 4390–4417.  
<https://doi.org/10.3390/ijerph10094390>
- [10]. Monfet, E., Aubry, G., & Ramirez, A. A. (2018). Nutrient removal and recovery from digestate: a review of the technology. *Biofuels*, 9(2), 247–262.  
<https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1336348>
- [11]. Moreno Ayala, L., & Cadillo Castro, J. (2018). Uso del estiércol porcino sólido como abono orgánico en el cultivo del maíz chala. *Anales Científicos*, 79(2), 415.  
<https://doi.org/10.21704/ac.v79i2.914>
- [12]. Olaya, Y., & González, L. (2009). Fundamentos para el diseño de Biodigestores-Módulo para la asignatura de Construcciones Agrícolas. *Jurnal Ekonomi Malaysia*, 31.  
<http://www.bdigital.unal.edu.co/7967/4/luisoctaviogonzalezsalcedo.20121.pdf>
- [13]. Pe, J. F., Andr, C., & Mart, G. (2021). *Simulación del aprovechamiento de biogás a partir de la cáscara de arroz para cogeneración de energía eléctrica en un campo petrolero de la cuenca de llanos orientales*.
- [14]. Peris, R. S. (2011). Biogas Process Simulation using Aspen Plus. *Department of Chemical Engineering, Biotechnology and Environmental Technology. Syddansk University.*, 1–88.
- [15]. Rajendran, K., Kankanala, H. R., Lundin, M., & Taherzadeh, M. J. (2014). A novel process simulation model (PSM) for anaerobic digestion using Aspen Plus. In *Bioresource Technology* (Vol. 168, pp. 7–13). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.051>
- [16]. Solano, O. R., Vargas, M. F., & Watson, R. G. (2011). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. *Tecnología En Marcha*, 23(1), 39.  
[http://tecdigital.tec.ac.cr/servicios/ojs/index.php/tec\\_marcha/article/view/132](http://tecdigital.tec.ac.cr/servicios/ojs/index.php/tec_marcha/article/view/132)

- [17]. Torres-Sebastián, M. J., Colli-Mull, J. G., Escobedo-Sánchez, L., Martínez-Fong, D., Rios-Solis, L., Gutiérrez-Castillo, M. E., López-Jiménez, G., Moreno-Rivera, M. L., Tovar-Gálvez, L. R., & Espadas-Álvarez, A. J. (2021). Methane, a renewable biofuel: from organic waste to bioenergy. *Biofuels*, *0*(0), 1–11. <https://doi.org/10.1080/17597269.2021.2016105>
- [18]. VanderZaag, A. C., Baldé, H., Crolla, A., Gordon, R. J., Ngwabie, N. M., Wagner-Riddle, C., Desjardins, R., & MacDonald, J. D. (2018). Potential methane emission reductions for two manure treatment technologies. *Environmental Technology (United Kingdom)*, *39*(7), 851–858. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1313317>

## 15. Anexos

A continuación, se presentan las evidencias correspondientes a la simulación en Aspen plus del biodigestor, para lo cual todas las imágenes corresponden a elaboración propia en la herramienta computacional.

### Anexo 15.1 Propiedades pseudocomponentes

The screenshot shows the Aspen Plus interface with the 'Pseudocomponents' properties window open. The window displays a table of pseudocomponent characterization data for 'PROTEIN'.

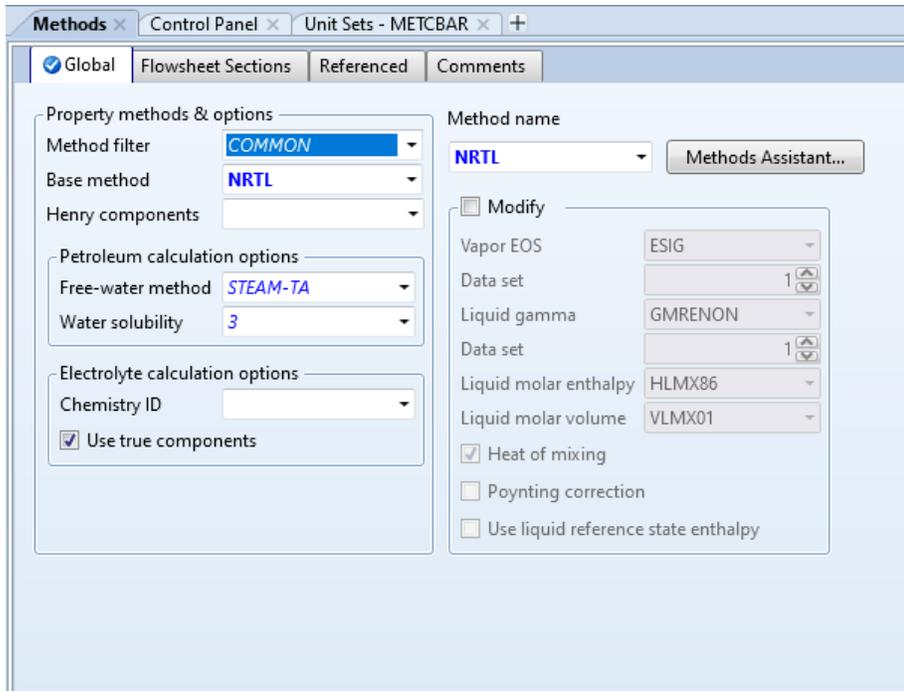
Component	Average NBP	Gravty	Molecular weight
PROTEIN	343,15	1430	367,419

### Anexo 15.2 Resultados propiedades de petrocaracterización de proteínas

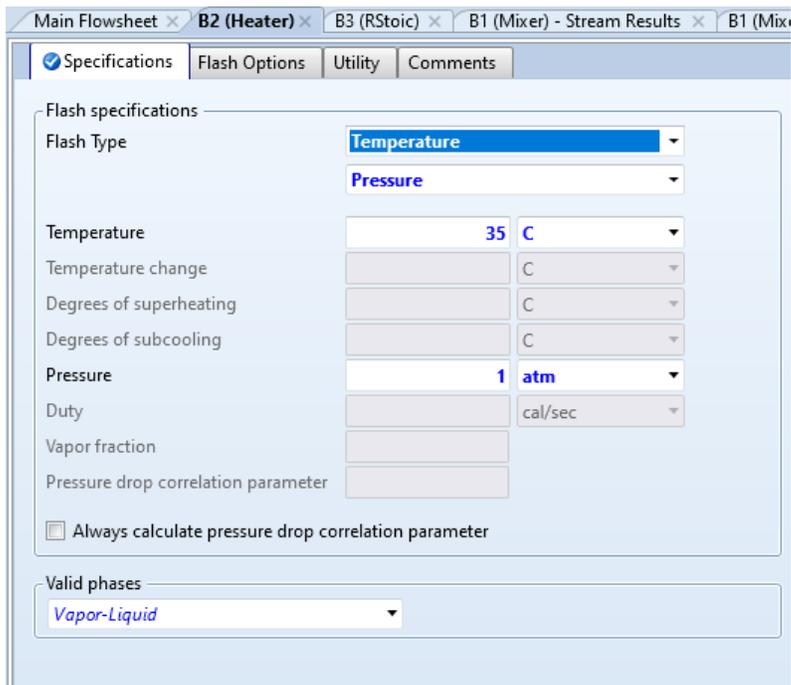
The screenshot shows the Aspen Plus interface with the 'Petro Characterization - Results' window open. The window displays a table of petro characterization results for 'PROTEIN'.

Pseudocomponent	Average NBP	API gravity	Specific gravity	UOPK	Molecular weight	Critical temperature	Critical pressure
PROTEIN	70	-32,752	1,43294	5,94325	367,419	400,504	174,544

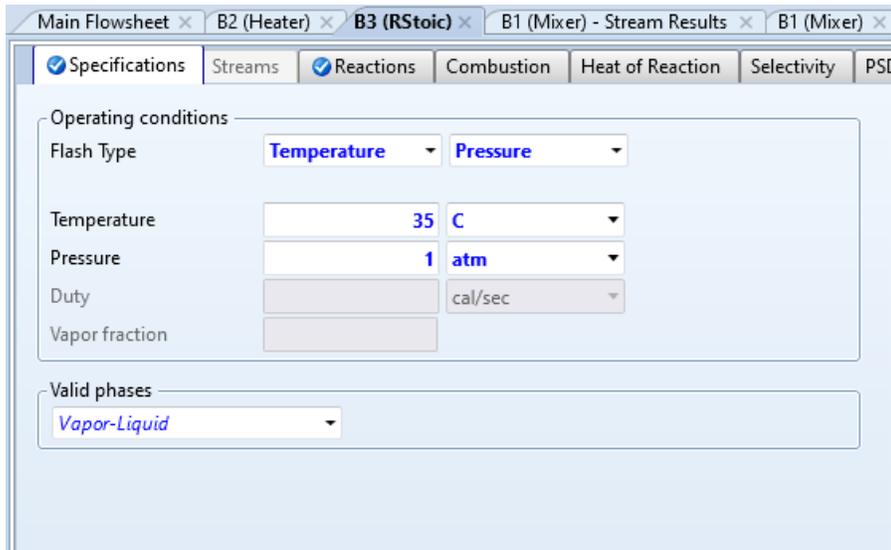
### Anexo 15.3 Selección del paquete de fluidos



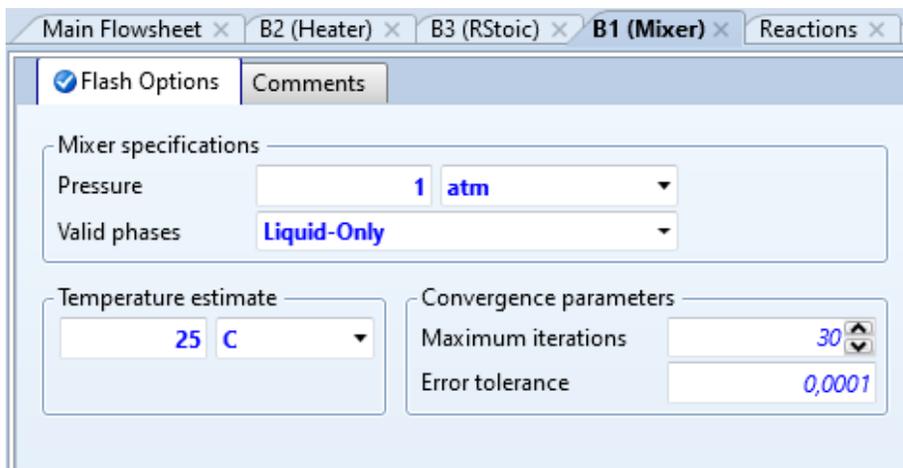
## Anexo 15.4 Requerimientos intercambiadores de calor



## Anexo 15.5 Requerimientos reactor estequiométrico



### Anexo 15.6 Requerimientos mezclador



### Anexo 15.7 Requerimientos Reactor CSTR

Main Flowsheet x B2 (Heater) x B3 (RStoic) x B1 (Mixer) x Reactions x Results Summary - Run Status x B4 (RCSTR) x

Specifications Streams Kinetics PSD Component Attr. Utility Catalyst Comments

Operating conditions

Pressure 1 atm

Temperature 35 C

Duty cal/sec

Vapor fraction

Holdup

Valid phases Vapor-Liquid 2nd Liquid

Specification type Residence time

Reactor

Volume 100 l

Resi. time 40 day

Phase

Phase

Volume l

Volume frac

Residence time hr

## Anexo 15.8 Especificaciones para la biomasa

Main Flowsheet x B2 (Heater) x B3 (RStoic) x B1 (Mixer) - Stream Results x B1 (Mixer) x Results Summary - Streams (All) x Results Summary - R

Mixed CI Solid NC Solid Flash Options EO Options Costing Comments

Specifications

Flash Type Temperature Pressure

State variables

Temperature 25 C

Pressure 1 atm

Vapor fraction

Total flow basis Mass

Total flow rate 50 kg/hr

Solvent

Reference Temperature

Volume flow reference temperature C

Component concentration reference temperature C

Composition

Mole-Frac

Component	Value
C6H10O5	0,3
WATER	
METHANE	
CO2	
H2S	
HYDROGEN	
C6H12O6	
ACETI-01	
C51H98O6	0,6
C16H34O	
C3H8O3	
NH3	
PROTEIN	0,1
C5H7NO2	
C3H6O2-1	
C4H8O2-4	
Total	1

Component Attributes

Particle Size Distribution