



FQF
Facultad de
Química y Farmacia

Departamento de Ingeniería Química

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUALES DE LA UEB
COMERCIALIZADORA DE PRODUCTOS AGROPECUARIOS EN LA EMPRESA
PECUARIA MANAGUACO

Autor: Aliany Acevedo Echevarría

Tutores: Dr. C. Julio Pedraza Garciga

Dra. C. Lisbet Mailin López González



Dra. C. Lisbet Mailin López González

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubián” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

*“La ciencia será siempre una búsqueda,
jamás un descubrimiento real.
Es un viaje, nunca una llegada”*

Karl Raíund Popper

DEDICATORIA

A mi familia por el apoyo amoroso, sus estímulos y la valiosa confianza en mí, jamás habría llegado hasta aquí sin Uds., lo cual constituye la herencia más valiosa que pudiera recibir.

Con gratitud permanente:

Hoy les digo: GRACIAS, he cumplido, inicio el camino.

De hoy en adelante la responsabilidad es mía.

AGRADECIMIENTOS

- *A mis tutores Lisbet López González y Julio Pedraza Garciga, por la infinita paciencia y la guía certera.*
- *A los investigadores del Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales (CEEPI) de la Universidad de Sancti Spiritus “José Martí Pérez” (UNISS), por el estímulo y la información.*
- *A la dirección de la Empresa Pecuaria de Managuaco y a los trabajadores de la UEB Comercializadora de Productos Agropecuarios, por abrirle las puertas a esta investigación.*
- *A mis profesores y compañeros de clase, por la sabiduría y las experiencias vividas.*
- *A mi familia y amigos, por el apoyo de siempre.*

RESUMEN

El trabajo se orienta a cumplir una tarea científica dentro del proyecto Fuentes Renovables de Energía como apoyo al Desarrollo local (FRE local) relacionada con el cambio la matriz energética de generación y consumo en la Empresa Pecuaria Managuaco. Se diseñó una planta de biogás para el tratamiento de los residuales disponibles en la UBE Comercializadora de Productos Agropecuarios, de la propia empresa. Los resultados proponen la construcción de un biodigestor de laguna cubierta con una capacidad total de digestión de 1747,2 m³ y generará producciones de 125 m³/día de biogás, que se utilizará en la cocción de alimento para un comedor obrero, en la generación de energía para cubrir la limpieza, el procesamiento de la carne, y la elaboración de productos derivados como los embutidos. También, producirá 3,25 t/día de digestato que puede ser convertido en bioabono y empleado para la mejora de la fertilidad de 928 ha de suelos de la Empresa Pecuaria Managuaco dedicados a la producción de cultivos varios; y su venta a otras entidades.

Se realizó un análisis de factibilidad económica de procesos obteniéndose valores del **VAN** = \$ 5920,22, una **TIR** = 13% y un **PRD** = 6,5 años, valores favorables todos, que, aunque bajos, se justifican por el bajo nivel del capital invertido, así como el nivel de ingresos, avalados lo anterior por la producción de sólo 125 m³/día.

Por último se realizó el análisis ambiental de la propuesta realizada, concluyéndose que se evitan las emisiones de metano a la atmósfera, en el orden de 1261,44 kgCH₄/año, así como 900 kgN₂O/año, contribuyendo a la disminución de los impactos ambientales de estos gases de efecto invernadero.

ABSTRACT

The work is aimed at fulfilling a scientific task within the Renewable Energy Sources project as support for local development, related to the change in the energy matrix of generation and consumption in the Managuaco Livestock Enterprise. A biogas plant was designed to treat the residuals available at the Slaughterhouse

The results propose the construction of a covered lagoon biodigester with a total digestion capacity of 1,747.2 m³ and will generate 125 m³ / day of biogas, which will be used in cooking food for a workers' dining room, in the generation of energy to cover cleaning, meat processing, and the production of derived products such as sausages. It will also produce 3.25 t / day of digestate that can be converted into bio-fertilizer and used to improve the fertility of 928 ha of soils of the Managuaco Enterprise dedicated to the production of various crops; and its sale to other entities.

An analysis of economic feasibility of processes was carried out, obtaining values of NPV = \$ 5,920.22, an IRR = 13% and a PRD = 6.5 years, all favorable values, which, although low, are justified by the low level of capital invested, as well as the level of income, supported by the previous production of only 125 m³ / day.

Finally, the environmental analysis of the biogás plant proposed was carried out, concluding that methane emissions into the atmosphere are avoided, in the order of 1261.44 kgCH₄ / year, as well as 900 kgN₂O / year, contributing to the reduction of environmental impacts of these greenhouse gases.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL.....	4
1.1. Introducción.....	4
1.2. Situación energética mundial	4
1.3. Situación energética en Cuba	5
1.4. El proceso de digestión anaerobia. Etapas.....	7
1.4.1. Parámetros que influyen en el proceso: ambientales y de control.....	10
1.5. Generación de residuales en matadero.....	15
1.5.1. Digestión anaerobia de residuales en mataderos.....	16
1.5.2. Características fisicoquímica de los residuos que se generan	16
1.5.3. Tratamiento de aguas residuales en mataderos.....	18
1.5.4. Beneficios de la valorización de residuos en la digestión anaerobia en mataderos ..	19
1.6. Biodigestor.....	23
1.6.1. Elementos que componen un biodigestor	23
1.6.2. Purificación del biogás.....	24
1.6.3. Biodigestores de uso agropecuario.....	24
1.6.4. Beneficios en la economía, la sociedad y el medio ambiente.....	29
1.7. Metodología de Evaluación Económica.....	30
1.8. Conclusiones parciales del capítulo	31
CAPÍTULO 2. DISEÑO DEL SISTEMA DE BIODIGESTIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS.....	32
2.1. Introducción.....	32
2.2. Caracterización general de la UEB Comercializadora de Productos Agropecuarios de la Empresa Pecuaria Managuaco en Sancti Spíritus.	32
2.3. Procedimiento para la recolección de datos	33
2.4. Descripción del proceso productivo actual en el Matadero	34
2.5. Propuesta del sistema de biodigestión elegido para la obtención de biogás y tratamiento de las aguas residuales generadas en el Matadero.....	36
2.5.1. Descripción del sistema de biodigestión propuesto. Tratamiento preliminar.	36
2.5.2. Diagrama de flujo y de proceso para la obtención de biogás	38
2.6. Diseño del sistema propuesto para la obtención de biogás.....	40
2.6.1. Especificaciones del tanque de alimentación	40

2.6.2.	Especificaciones del biodigestor tipo laguna cubierta.....	43
2.6.3.	Especificaciones de la laguna de descarga.....	50
2.6.4.	Estructuras auxiliares	51
2.7.	Balance de materiales.....	58
2.8.	Demanda energética a cubrir	61
2.9.	Conclusiones parciales del capítulo	61
CAPÍTULO 3. FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN LA UEB COMERCIALIZADORA DE PRODUCTOS AGROPECUARIOS		62
3.1.	Introducción.....	62
3.2.	Estimación del costo de la inversión	62
3.3.	Análisis de los indicadores de eficiencia económica.....	65
3.4.	Análisis Ambiental del tratamiento de los residuales provenientes del biodigestor.	67
CONCLUSIONES GENERALES		70
RECOMENDACIONES		71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		
ANEXOS		

INTRODUCCIÓN

Actualmente, el mundo atraviesa por una compleja situación económica y social agravada por la pandemia y un clima cada vez más cambiante, que ha impactado a todos los países en mayor y en menor cuantía. Cuba no está exenta de este escenario mundial, que unido al bloqueo económico impuesto por Estados Unidos impone significativas dificultades en muchas áreas de la economía.

El sector ganadero constituye un renglón vital para el desarrollo productivo cubano. Sin embargo, la sostenibilidad del programa ganadero se ha visto afectado por el deterioro progresivo de las instalaciones productivas, la disminución de las áreas de alimentos para el ganado, la insuficiente limpieza de las áreas de pastos, así como de su acuartonamiento, y la ineficiencia del sistema eléctrico unido a la dependencia de combustibles fósiles para alcanzar niveles de producción adecuados.

La Empresa Pecuaria Managuaco contaba con la Granja Genética “Dos Ríos”, (hoy UEB Genética del mismo nombre), que durante la década de los 70, se dedicó a la cría del ganado Holstein importado de Canadá y en la de los 80 ya realizaba la Prueba de Progenie para esta raza, con magníficos resultados. Luego del periodo especial se reorientó su proyecto genético para el desarrollo del Siboney de Cuba, el cual se encuentra en fase de desarrollo y consolidación. A partir del 2015 tiene un desarrollo sostenido en la recuperación del sistema productivo de la ganadería, pero todavía el mismo es lento para las necesidades macroeconómicas que necesita el país. Por tal motivo se propone realizar cambios estructurales y de sistemas tecnológicos, enfocados a resolver toda la problemática que causa esta lenta recuperación.

Con la actualización e implementación del Modelo económico y social cubano y la aprobación de las Bases del “Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta el 2030” se amplían las oportunidades estratégicas para la Empresa en sinergia con el sector de la energía que se posiciona como tema esencial en la agenda política de Cuba. Dentro de los principios rectores y ejes temáticos se declara la necesidad de:

Transformar y desarrollar, acelerada y eficientemente, la matriz energética mediante el incremento y la participación de las fuentes renovables (24%) y los otros recursos energéticos nacionales y el empleo de tecnologías de avanzada con el propósito de

consolidar la eficiencia y sostenibilidad del sector y, en consecuencia, de la economía nacional. (PCC, 2017)

En este escenario y como parte de los cambios jurídicos, políticos, sociales y gubernamentales asociados al “Programa de Apoyo a la Política de Energía en Cuba” se inscribe el proyecto “Fuentes Renovables de Energía como apoyo al Desarrollo Local” FRE (local, 2019) que pretende apoyar el desarrollo local facilitando el acceso a la energía, a partir de la asimilación de tecnologías que emplean las fuentes renovables y, la estimulación de su consumo eficiente. Especialmente, el Resultado 2 busca la identificación de mejores prácticas con respecto al uso de fuentes renovables de energía (FRE) en áreas rurales, utilizando agro-energía e implementando proyectos que utilicen las FRE para el incremento de niveles productivos en empresas ubicadas en áreas rurales, como en el caso de la Empresa Pecuaria de Managuaco, ubicada en el territorio espirituano.

De manera que, la Empresa Pecuaria Managuaco y el proyecto FRE local se unen en una misión común de fortalecimiento del programa de desarrollo ganadero, asumiendo nuevos retos en la producción de leche y carne, así como los cierres de ciclos. La idea conceptual se basa en disminuir el consumo de portadores energéticos y transformar la matriz energética, basada en el aprovechamiento de la biomasa (excretas animales y residuos para la generación de biogás), y la construcción de 3 redes presurizadas de generación descentralizada y distribución de biogás, en las áreas Niña Bonita (Red 1), Sabanilla (Red 2) y Dos Ríos (Red 3).

El presente trabajo se orienta a cumplir dentro del proyecto FRE local, la tarea relacionada con el área de Sabanilla, con énfasis en la problemática de la UEB Comercializadora de Productos Agropecuarios, conocida como Matadero, donde se consume diésel para la generación de energía que cubre la limpieza, el procesamiento de la carne, y la elaboración de productos derivados como embutidos, ahumados, etc.; y se consume leña para la cocción de alimentos en el comedor obrero. Además, se vierten diariamente los desechos de la UEB a una laguna de oxidación provocando la contaminación del lugar, el manto freático y la emisión de gases de efecto invernadero, que dañan el medioambiente con emisiones de CO₂, que pueden ser evitadas. En contraposición se desaprovecha un alto potencial de biomasa constituido por los

residuales y desechos del matadero y la excreta del ganado mayor que va a ser sacrificado, convertido en biogás que ofrece la oportunidad de reducir la carga contaminante y valorizar los estiércoles vacunos.

Por lo que se declara como **problema científico**:

Insuficiente aprovechamiento de los residuales y desechos (aguas residuales y la excreta animal) en la UEB Comercializadora de Productos Agropecuarios (Matadero) para la generación de biogás en la Empresa Pecuaria de Managuaco.

Hipótesis:

Si se diseña un biodigestor tipo laguna tapada para la UEB Comercializadora de Productos Agropecuarios, entonces se podrán satisfacer las necesidades de energía térmica para la planta de sacrificio y el comedor obrero, modificando la matriz energética de generación y consumo en la Empresa Pecuaria de Managuaco.

Objetivo general:

Proponer una planta de biogás para el tratamiento de los residuales disponibles en la UEB Comercializadora de Productos Agropecuarios, de la Empresa Pecuaria Managuaco.

Objetivos específicos:

1. Determinar el potencial de residuos para la producción de biogás.
2. Estimar el potencial de biogás existente y posibles usos.
3. Diseñar una planta de biogás para el tratamiento de los residuales disponibles en la UEB Comercializadora de Productos Agropecuarios, de la Empresa Pecuaria Managuaco.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL

1.1. Introducción

En el capítulo se realiza una búsqueda detallada sobre la situación energética en el mundo y en Cuba. El proceso de digestión anaerobia, sus etapas, factores que influyen. Los residuales de la digestión anaerobia, su importancia en la obtención de biogás y digestato, los beneficios para la economía, la sociedad y el medio ambiente. Tipos de biodigestores de uso agropecuario. La metodología de evaluación económica

1.2. Situación energética mundial

Entre los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) post 2015 de las Naciones Unidas se encuentra el número 7, orientado a “garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos”. Y dentro se enmarcan tres metas que indican para el 2030: garantizar el acceso universal a servicios de energía asequibles, confiables y modernos; aumentar sustancialmente el porcentaje de la energía renovable y duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética (Rujas and Romero, 2021)

A pesar del progreso acelerado de los últimos años, es poco probable que se alcance la meta de acceso universal para 2030 establecida en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) porque la pandemia de COVID-19 ha impedido el avance hacia el cumplimiento del objetivo y ha revertido el progreso que se había logrado en la electrificación; y se han agravado las desigualdades regionales y entre países pobres y ricos, con un déficit de acceso a la energía que se concentra especialmente en África, al sur del Sahara. Mientras que América Latina y el Caribe, Asia oriental y Asia sudoriental están avanzando hacia el acceso universal, ya que más del 98% de su población tiene acceso a la electricidad.

Según la situación de consumo energético a nivel mundial (OLADE, 2021) en el año 2018, el consumo final de energía fue de 9,938¹ millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), concentrándose entre los 36 países miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y China, quienes participan con aproximadamente el 59% del consumo total mundial. En tanto, para América Latina y el

¹ IEA, Key World Energy Statistics 2020, August 2020

Caribe el consumo final de energía en el 2019 fue de 618 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), lo que constituye el 4,6% del consumo total mundial.

La matriz de consumo energético global se ha incrementado significativamente, destacándose un mayor empleo de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural) para generar electricidad y; también, su composición estructural ha cambiado debido a su diversificación a través de fuentes de energía más limpias, que lograron un crecimiento cercano al 25% en 2018 (OLADE, 2021). A nivel de sectores de consumo, se destaca el transporte, seguido en importancia del sector industrial y el residencial, mientras que otros sectores tienen menores índices de consumo.

Se espera que, a partir del año 2022, se acreciente la crisis energética con una demanda y consumo mundial de energía en aumento. Las actuales fuentes basadas en combustibles fósiles tienen en su mayoría recursos limitados y su uso representa repercusiones ambientales negativos sobre el bienestar humano.

Salvar la brecha para cumplir con el ODS 7, requiere una transición inclusiva hacia las Fuentes Renovables de Energía (FRE). Una recuperación sana y ecológica de la pandemia de COVID-19 incluye la importante tarea de garantizar una rápida transición hacia la energía limpia y sostenible, donde se utilice de manera combinada la energía del sol, del viento, la biomasa forestal, los residuos biodegradables y la hidroenergía, entre otras. Esto implica una reducción de las emisiones de CO₂ provenientes del uso de combustibles fósiles y la mitigación de los efectos del cambio climático.

En la actualidad, el principal desafío que enfrenta el mundo es crear un sistema energético que combine asequibilidad, confiabilidad y sostenibilidad, que aborde las desigualdades sociales, económicas y ambientales entre los países.

1.3. Situación energética en Cuba

Desde el triunfo revolucionario en 1959, el sector energético ha sido una constante preocupación para el gobierno cubano, orientado a garantizar los portadores energéticos para el desarrollo de la actividad económica y social.

En la actualidad, la base energética del país con un total de 10 323,5 kilotoneladas equivalentes de petróleo (ktep), se caracteriza por la alta dependencia de las importaciones del 53,84% (CUBAENERGÍA, 2019). Por otra parte, alrededor del 5,6% de la generación de electricidad se produce mediante FRE con una generación de 687

000 MW/hora, lo que representa un ahorro de 178 000 toneladas de combustible. Se tienen en operación 67 parques solares fotovoltaicos con 156,6 MW de potencia, una bioeléctrica de 62 MW, 7 plantas industriales en grandes centros porcinos para la producción de biogás, 2643 biodigestores instalados en productores porcinos, y 1188 sistemas de bombes solares instalados para el sector de la ganadería fundamentalmente (UNE, 2019).

Las características propias del país, confiere condiciones excepcionales para la instalación de tecnologías que aprovechen las fuentes renovables de energía con posibilidades infinitas. El empeño de diversificar la matriz energética, se concreta a partir de múltiples acciones estratégicas, contenidas en leyes, políticas, programas, normativas y acciones que comienzan a perfilar el destino energético de Cuba, con énfasis en el aseguramiento del desarrollo integral de las FRE, alejados de la dependencia de los combustibles fósiles, entre las que se destacan: Decreto Presidencial No. 3 de la República de Cuba (Popular, 2019) (PCC, 2017).

Sin perder de vista el escenario nacional e internacional, en medio de la pandemia de la COVID-19, “el país apuesta a las FRE y se prevé que de una generación eléctrica de 820 GWh al cierre de 2019 se crezca a 9961 GWh para el año 2030”. Ello significa un crecimiento de más de diez veces en la generación, y “un incremento de la penetración de las FRE en la generación desde un 4% hasta un 37% mediante bioeléctricas (612 MW), parques eólicos (734 MW), parques solares fotovoltaicos (2104 MW) y pequeñas centrales hidroeléctricas (56MW)” (Noa et al., 2021)

La provincia Sancti Spíritus para cumplir con esta meta tiene un plan de desarrollo de las FRE, conformado por 19 parques solares fotovoltaicos (PSFV) que suman una capacidad de 67 MW, 5 pequeñas centrales hidroeléctricas con 10,4 MW, 1 bioeléctrica con 50 MW, además del desarrollo de biodigestores y la instalación de más de 1000 módulos fotovoltaicos en viviendas aisladas donde no llega el servicio del sistema electroenergético nacional (UNE, 2019).

La gestión cada vez más descentralizada de esta tarea-país, exige que las empresas e instituciones desarrollen un modelo de gestión energética que permita garantizar la sostenibilidad a partir de las potencialidades de cada territorio. De ahí que, deba analizarse la complejidad creciente del fenómeno, desde las cuestiones técnicas y

financieras, la inversión extranjera directa en las FRE hasta los elementos sociales, humanísticos y éticos para lograr la transformación de la matriz energética.

1.4. El proceso de digestión anaerobia. Etapas

La digestión anaerobia (DA) o biometanización es un proceso bioquímico que se da en un ambiente natural o en reactores especializados, bajo condiciones de anoxia y a través de diferentes etapas en las que intervienen un grupo heterogéneo de microorganismos (bacterias anaerobias y arqueas metanogénicas), que van a transformar la fracción más degradable de la materia orgánica presente en residuos sólidos en biogás y los compuestos de más difícil degradación van a conformar el digestato. En el proceso de DA el residuo orgánico se lleva a un tanque séptico en ausencia de oxígeno ya que los microorganismos productores de metano no sobreviven en ambientes con oxígeno y luz. Este proceso global puede ser dividido para su estudio en cuatro etapas principales: Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis (Fig. 1), aunque debe comprenderse que en los digestores las reacciones ocurren simultáneamente. A continuación, se explican:

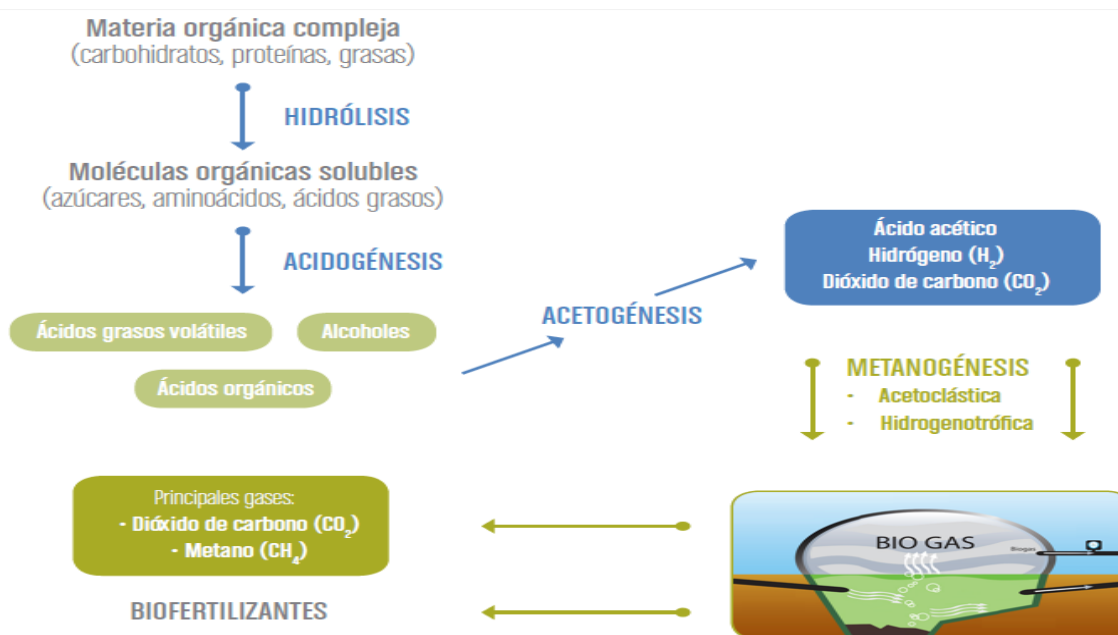


Fig. 1. Etapas de la DA en un biodigestor con producción de biogás y fertilizante

Fuente: Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores.(Casanovas et al., 2019)

Etapas hidrolíticas: La materia orgánica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles que puedan

atravesar la membrana celular. En esta etapa, las bacterias y hongos convierten las macromoléculas en aminoácidos, azúcares y ácidos grasos volátiles, que genera los sustratos para la siguiente etapa (Nielsen et al., 2007) (Leis et al., 2014).

Las bacterias actúan sobre los componentes orgánicos del sustrato, tales como celulosa, almidones, proteínas y grasas entre otras. Los transforman por hidrólisis en compuestos orgánicos solubles, de esta forma los carbohidratos se convierten en azúcares simples; las grasas, en ácidos grasos y glicerol y las proteínas se desdoblan en polipéptidos y aminoácidos, los cuales liberan también CO_2 y H_2 . Posteriormente, esos productos son convertidos a ácidos orgánicos, fundamentalmente butírico, propiónico y acético. La hidrólisis depende de variables como: pH, temperatura, concentración de biomasa hidrolítica, tipo de materia orgánica y tamaño de partículas.

En general la tasa de hidrólisis aumenta con la temperatura, independiente del sustrato utilizado, y disminuye cuando existe en la composición del sustrato una alta cantidad de lignina. Este compuesto es altamente refractario a la degradación anaerobia, lo que afecta la biodegradabilidad del sustrato (Veeken and Sanders, 2002).

Etapas acidogénica: las moléculas orgánicas solubles resultantes de la etapa hidrolítica son fermentadas, donde forman compuestos que pueden ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas. Los productos finales de la etapa anterior son transformados en acetato, H_2 y CO_2 por un grupo de bacterias que aportan aproximadamente el 54% del hidrógeno que se utilizará en la formación de metano. La función de estos microorganismos en el proceso de la digestión anaerobia es ser donantes de H_2 , CO_2 y acetato (CH_3COO^-) para las bacterias metanogénicas (Bonmanti. A et al., 2001).

Existen dos tipos de microorganismos que producen acetato, las bacterias homoacetogénicas, las cuales fermentan el acetato como único metabolito y las bacterias acetogénicas las que metabolizan los productos terminales de la etapa acetogénica y necesitan asociarse estrechamente a microorganismos consumidores de hidrógeno (Flotats et al., 1997). Por otra parte, existen las bacterias sulfato reductoras, este tipo de microorganismos se da por oxidación de compuestos orgánicos, y reducción de sulfato a sulfuro. Se subdividen en dos grupos: oxidadores completos que producen CO_2 , H_2O y sulfuro, y oxidadores incompletos cuyos productos son acetato, CO_2 y sulfuro.

Dado que la acidogénesis es considerada la etapa más rápida del proceso global, resulta fundamental controlarla para evitar que el descenso de pH (acidificación) del medio interfiera con la acción del consorcio microbiano.

Etapas acetogénica: los compuestos intermedios resultantes de la etapa acidogénica van a ser transformados por las bacterias acetogénicas, obteniéndose como principales productos hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético. Este último compuesto aparece directamente por la acción de estas bacterias por la transformación de alcoholes, ácidos grasos, ácidos volátiles, etc. junto con hidrógeno y dióxido de carbono que por acción de las bacterias homoacetogénicas lo transforman en ácido acético. El metabolismo acetogénico va a ser muy dependiente de las concentraciones de estos productos.

Etapas metanogénica: con la presencia del ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono aparecen en el medio los microorganismos responsables de la metanogénesis o formación del metano. Se distinguen dos tipos principales de microorganismos: los que van a degradar el ácido acético produciendo CH_4 y CO_2 , (los metanógenos acetoclásticos), y los que a partir del hidrógeno y dióxido de carbono resultantes de etapas anteriores van a generar metano y agua, (los metanógenos hidrogenotrofos).

La principal vía de formación del metano va a ser la vía acetoclástica, con alrededor del 70% del metano producido de forma general. A pesar de ser esta vía la más importante, sólo microorganismos de los géneros *Methanosarcina* y *Methanothrix* son capaces de producir metano a partir de acético.

La naturaleza y composición química del residuo que entra en el digestor va a condicionar la composición cualitativa de la población bacteriana que va a estar presente en cada etapa, por lo que este equilibrio ecológico en el que coexisten los diferentes grupos de bacterias se puede ver fácilmente alterado cuando algún tóxico no permite el desarrollo de alguna de las poblaciones.

Mientras que en las fases de hidrólisis y acidogénesis los microorganismos presentes suelen ser facultativos, para la fase metanogénica, los microorganismos presentes son estrictos y con tasas de crecimiento 5 veces menores a los de la etapa acidogénica, lo que lleva a que si estas bacterias metanogénicas presentan algún problema para su reproducción y consumir los ácidos, estos se acumularán causando un empeoramiento de las condiciones para los microorganismos encargados de la producción del metano.

En relación a la tasa de conversión del sustrato en biomasa bacteriana es del orden de cuatro veces inferiores a las tasas correspondientes a sistemas aerobios de eliminación de materia orgánica. Esto implica que el proceso anaerobio va a ser más lento, generalmente, necesitándose varias semanas de puesta en marcha para conseguir un equilibrio en las poblaciones del digestor.

Las transformaciones químicas y físicas que sufre la materia orgánica en estas etapas del proceso de DA no solo conducen a la producción de biogás, sino que además pueden generar un residuo estabilizado (digerido) o digestato que tiene propiedades adecuadas para ser utilizado como biofertilizante.

Según Casanovas et al. (2019) “la correcta aplicación de la tecnología permite alcanzar la máxima eficiencia en el proceso, la adecuada comprensión de las bases físicas, químicas y biológicas de la digestión anaeróbica puede determinar el éxito de los proyectos que se implementen”. La autora considera que cada una de las etapas de la digestión anaerobia desempeñan un papel primordial en la obtención del biogás, por lo que es necesario controlar cada parámetro de estas etapas, para obtener así un producto con mayor calidad.

1.4.1. Parámetros que influyen en el proceso: ambientales y de control

La DA va a venir condicionada en gran medida por los escenarios en los que se desarrolla el proceso, lo que lleva a tener en cuenta parámetros ambientales y de control. Entre los más relevantes se presentan:

a) Parámetros ambientales

- pH

El pH es una medida de la acidez o alcalinidad de una determinada solución. Guarda relación con la actividad de los iones hidrógeno y los procesos de generación y degradación de ácidos orgánicos dentro del biodigestor. El pH va a ser un parámetro fundamental para el desarrollo de la máxima actividad por los microorganismos que se identifican en cada una de las fases. Según (Babaee y Shayegan, 2011) referenciado por Casanovas et al. (2019) un pH óptimo se encuentra en el rango de 7,0 a 7,8.

Para el mantenimiento del pH va a ser de gran importancia el equilibrio del sistema formado por las diferentes formas de carbono inorgánico (dióxido de carbono, bicarbonato, carbónico). Los residuos orgánicos complejos, al presentar uno de los

valores de pH más elevados, van a ser capaces de autorregular permanentemente el pH en aquellas etapas en las que se genera una mayor concentración de ácidos, en caso de que esto no ocurriera, sería necesaria la regulación externa del parámetro.

Las mezclas de diferentes tipos de residuos pueden controlar más fácilmente la alcalinidad necesaria para alcanzar el nivel de pH idóneo. Se admite que una alcalinidad entre 2 y 3 g CaCO_3/L , es suficiente para su regulación.

- Potencial redox

El potencial redox debe presentar un valor suficientemente bajo para que así los microorganismos metanogénicos estrictos se puedan desarrollar a plena capacidad. Los valores de potencial redox necesarios oscilan entre -370 y -220 mV.

- Nutrientes

Los residuos a digerir deben presentar una relación adecuada que permita el desarrollo de los microorganismos que van a intervenir en el proceso. Los elementos más importantes a tener en cuenta son: nitrógeno (N), carbono (C) y fósforo (P).

La relación C/N debe de estar comprendida entre 15/1 y 45/1, siendo el valor recomendable 30/1, ya que valores inferiores disminuyen la velocidad de reacción. Mientras que la relación C/P debe de ser igual 150/1, valores inferiores no van a crear problemas de inhibición.

- Tóxicos e inhibidores

Existe una gran cantidad de compuestos biológicos y/o químicos que en determinadas concentraciones pueden inhibir el proceso de biodigestión (Ver tabla 1.1, anexo 1). Un aumento de estos compuestos en el biodigestor puede elevar la inactividad de los microorganismos encargados de llevar a cabo la digestión anaerobia produciéndose una alteración de la cinética de degradación de la materia orgánica y un aumento de las concentraciones de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) en el efluente, pudiendo llegar a su duplicación y, por tanto, a la reducción a la mitad del porcentaje de metano en el biogás producido.

Por lo que trabajar con efluentes o residuos que pueden tener altas concentraciones de químicos, inhibidores de los procesos biológicos, especialmente los derivados de animales como el ganado vacuno, donde se emplean dietas ricas en enzimas, puede

constituir un problema. Si estas enzimas llegan al estiércol que se destina a un biodigestor pueden provocar que la producción de biogás no sea la esperada.

b) Parámetros de control

- Temperatura de operación

Tiene una influencia decisiva en el proceso anaerobio, ya que de este parámetro van a depender mucho las velocidades de reacción con las que se lleve a cabo la DA, la composición del biogás, debido a la dependencia de la solubilidad de los diferentes gases con la temperatura, y el daño que se puede causar a algunos de los microorganismos del medio por ciertos valores que se alcancen.

La temperatura depende de muchas variables, como el tipo de tecnología del biodigestor, los materiales usados en su construcción, la región y el clima en donde se encuentre, y la temperatura de la mezcla utilizada para su alimentación. El rango de temperatura en el que se puede producir el proceso de biodigestión es bastante amplio, entre 10 y 55 °C. Autores como Casanovas et al. (2019) opinan que según la temperatura, los biodigestores y los procesos pueden agruparse dentro de tres grupos principales:

- Psicrofílicos: operan en un rango de 10 a 25 °C.
- Mesofílicos: operan en un rango de 25 a 40 °C.
- Termofílicos: operan en un rango de 40 a 55 °C.

Por su parte, Suluda and Inácio (2006) plantean que las tasas de crecimiento y reacción aumentan conforme lo hace el rango de temperatura, y en el rango termofílico se consigue una mayor destrucción de patógenos, lo cual resumen en datos importantes asociados a estos rangos de temperatura (Ver tabla 1.2, anexo 2).

La temperatura a la que se vaya a trabajar es un factor importante a tener en cuenta desde el punto de vista técnico y económico, ya que al trabajar con temperaturas de un rango termofílico los equipos, tuberías, válvulas y accesorios en general serán más costosos, y también se necesitará un gasto mayor de energía en el propio proceso.

Sin embargo, en muchos casos estos costos adicionales son asimilables, mientras que la alternativa de construir biodigestores mesofílicos o psicrofílicos, más grandes –ya que a mayores temperaturas en menor tiempo puede procesarse más cantidad de material, puede implicar inversiones superiores debido a la necesidad de redimensionar los digestores o de contar con superficies extensas para su localización.

A distintos rangos de temperatura trabajan grupos de microorganismos diferentes, por eso muchas veces no es primordial intentar operar a la más alta temperatura posible, sino garantizar que esta sea estable dentro del biodigestor. Si varía, difícilmente las poblaciones de microorganismos puedan colonizar el medio de forma permanente y, en consecuencia, la producción de biogás no será constante.

En general, con la temperatura se favorecen las formas no ionizadas, que resultan más tóxicas para los microorganismos (NH_3 y AGV - no ionizados). Y la viscosidad de sólidos y semisólidos disminuye al aumentar la temperatura, lo que implica menores necesidades de agitación.

- Agitación/mezclado

Mantener un grado de agitación en el medio en el que se da la digestión anaerobia es necesaria, debido a que:

- Con el mezclado se consigue un homogenizado del sustrato de alimentación con el sustrato en digestión.
- Se alcanza una distribución uniforme del calor para mantener una isoterminia correcta.
- Se evita la formación de espumas y la sedimentación.
- Se favorece la transferencia de gases que pueden formar burbujas en el sustrato.

En función del volumen, de las características del digestor y del residuo, la potencia necesaria para cubrir la demanda energética de la agitación va a variar. Normalmente son valores comprendidos entre 10 y 100 $\text{W}\cdot\text{h}/\text{m}^3\cdot\text{día}$. Se suele recomendar valores superiores a 30 $\text{W}\cdot\text{h}/\text{m}^3\cdot\text{día}$.

La agitación puede ser mecánica o neumática (a través del burbujeo del gas recirculado a la presión adecuada), y nunca será violenta, ya que puede destruir los agregados de bacterias, necesarios para mantener un proceso estable.

- Tiempo de retención

El tiempo de retención va a ser el cociente entre el volumen del reactor y el caudal diario de carga, es decir, es el tiempo medio de permanencia del sustrato en el reactor sometido a la acción de los microorganismos.

Esta variable determina el volumen del reactor y se encuentra directamente relacionada con la temperatura y, en consecuencia, con la tecnología a utilizar. Para producir una

determinada cantidad de biogás en rangos psicrófilicos se requieren valores de TRH mayores que en rangos mesófilicos o termófilicos. A mayor temperatura, menor TRH.

Para los distintos procesos, los TRH pueden ser muy variables:

- Psicrófilicos: de 50 a 120 días.
- Mesófilicos: de 25 a 50 días.
- Termófilicos: de 15 a 25 días.

Por su parte, Blanco et al. (2012) proponen los siguientes rangos de temperatura dentro de un biodigestor según el tiempo de retención:

Temperatura ambiente (°C)	Tiempo de retención (días)
12-15	60
15-20	50
> 20	40

Para dimensionar un biodigestor resulta necesario conocer la tasa diaria de alimentación y el TRH. Esta última variable guardará una relación directa con la temperatura de operación elegida.

$\text{TRH (días)} \times \text{Cantidad de carga (m}^3/\text{día)} = \text{Volumen útil del biodigestor (m}^3\text{)}$

Los biodigestores utilitarios suelen tener una alimentación continua o semicontinua, es decir que son alimentados todos los días o regularmente. Cada vez que ingresa al biodigestor un sustrato, sale prácticamente el mismo volumen, con grados variables de digestión. El volumen dentro del biodigestor es siempre estable.

La degradación de la materia orgánica en un sistema anaeróbico sigue una tendencia asintótica, con una eliminación completa a tiempo infinito, y una producción de gas por unidad de volumen de reactor con un máximo para un tiempo de retención correspondiente a una eliminación de sustrato de entre el 40 y el 60% (masa/masa) (Fedailaine et al., 2015).

La velocidad de carga orgánica (OLR) dependerá del tipo de sustrato orgánico utilizado, ya que este determina el nivel de actividad bioquímica que ocurre dentro del biodigestor. Valores bajos de OLR implican elevados tiempos de retención hidráulica (TRH) y/o baja concentración de sólidos volátiles (SV) en el influente, mientras que incrementos en la OLR conllevan una reducción en la producción de biogás por unidad de SV introducida.

La OLR óptima deberá determinarse para cada instalación y sustrato a utilizar, para optimizar la operación técnica y económica del biodigestor.

1.5. Generación de residuales en matadero

En Cuba las actividades de trabajo y sacrificio de animales para la obtención de carne para consumo humano se realizan en instalaciones especiales denominadas mataderos. Estos establecimientos proveen y garantizan la calidad de la carne para su comercialización y consumo.

A pesar de la importancia de esta actividad, en estas instalaciones se generan aguas residuales con impactos negativos, que incluyen la presencia de fauna nociva dentro y en los alrededores del matadero, malos olores y afectación de la calidad de vida de las zonas habitadas aledañas, gases de efecto invernadero, disminución del oxígeno disuelto de los cuerpos de agua donde se descargan las aguas residuales, así como la alteración drástica de la flora y fauna acuática, razón que obliga a la búsqueda de alternativas de tratamiento a esos residuales.

Durante el proceso de sacrificio se generan subproductos (sangre, residuos de carne, piel y contenido ruminal), y agua residual en las etapas de matanza y despojo de animales, además de gases de combustión y vapor de agua. La recolección del agua residual debe considerar los puntos de origen y recolectarse de manera individual en drenajes particulares: para la sangre; desagües de los corrales y del estiércol de las tripas (contenido ruminal); desagüe de las áreas de la matanza, los subproductos y su tratamiento; y drenaje de residuos domésticos (López-López, 2007); (Veall, 1997).

La generación de aguas residuales varía considerablemente de un matadero a otro; principalmente en función del tipo de animal sacrificado, del tamaño del establecimiento, de la antigüedad del mismo, del nivel de automatización, del mantenimiento de las instalaciones, de las tecnologías más o menos eficientes en el consumo de agua y las medidas de ahorro implantadas; y especialmente de las prácticas de los operarios en la limpieza y desinfección (Becerra, 2016); (López Navaja, 2015); (Rivero, 2013); (Arroqui, 2011); (Cruz, 2019).

El volumen de agua necesario para convertir un animal en carne (en canal) depende del grado de tratamiento de los subproductos realizado en el matadero. En Cuba el consumo de agua de un matadero es de 900 litros/cabeza de ganado mayor, según norma la R.247

(INRH, 2013). Las actividades que se realizan en un matadero y que son fuentes generadoras de agua residual y de otros desechos, son las siguientes: recepción de los animales vivos/estabulación, sacrificio, desangrado, desollado, acondicionamiento, lavado durante el proceso y lavado final de la planta de proceso y equipos.

En resumen, el agua arrastra moderadas cantidades de purines, restos de carne, sangre, pelos, trozos de vísceras y grasa superficial, entre otros residuos, que en su conjunto hacen que el agua tenga un elevado contenido de materia orgánica, materias en suspensión, aceites y grasas, nitrógeno (amoniaco y orgánico), fosfatos y detergentes y desinfectantes de las limpiezas.

1.5.1. Digestión anaerobia de residuales en mataderos

La generación de aguas residuales de un matadero es el aspecto ambiental más significativo, tanto por los elevados volúmenes generados, como por la carga contaminante asociada a las mismas. Las aguas residuales procedentes de estas instalaciones representan entre el 80 y el 95% del agua total consumida (López Navaja, 2015) y Vidal, 2010), ya que prácticamente no existe incorporación de agua al producto final (Canales, 2005). Se estima que la cantidad de agua residual provenga de 10 a 15% del salado y procesado de las vísceras, 20 al 25% de la fabricación de embutidos y del 60 al 70% de agua de limpieza (Rivero, 2013). El volumen de efluentes generados es un reflejo de los volúmenes de agua utilizados, el cual varía considerablemente, pero según Vidal (2010) puede estimarse una media de agua residual entre pequeños y grandes animales de 1 m³ por cabeza.

Los parámetros importantes a evaluar en las aguas residuales provenientes de los mataderos son DBO₅, pH, SST, Aceites y Grasa, Coliformes Totales, Amoniac, Turbiedad, SDT, Color; Tóxicos. Los valores de los parámetros de calidad para el efluente total son: Cloruro 1 g/l, grasa de 700 a 1000 mg/l, contaminación orgánica de 100 a 1900 mg DBO₅/l y DBO₅ promedio de 18 kg/l del producto final (Muñoz, 2005).

1.5.2. Características fisicoquímica de los residuos que se generan

El nivel de contaminación del agua residual de los mataderos es alto. Presentan concentraciones significativas de materia orgánica (DQO ~ 2500 mgO₂ dm³) y nitrógeno (NKT~250 mgN dm³). Estas aguas residuales se caracterizan por su alto contenido de materia orgánica expresada como DQO, sólidos suspendidos, grasas, nitrógeno y

fósforo, su color va de rojo oscuro a café, además de presentar una alta concentración de microorganismos patógenos (López-López et al., 2010, López-López, 2007); Del Nery, 2001 citado por Vallejo et al. (2019).

Estos residuales se caracterizan principalmente por presentar un elevado contenido orgánico, tanto disuelto como en suspensión, debido a la presencia de sangre, fragmentos de carne, vísceras y piel, grasa, contenido estomacal, excretas y orina de ganado vacuno y porcino de los procesos de estabulación en corrales y sacrificio. Además, contienen pelos, huesos, proteínas, especias, almidones, aditivos, detergentes, desinfectantes, presencia de nitrógeno y fósforo, y las sales utilizadas en la fabricación como (ClNa, Polifosfatos, NO_3K , NO_2Na). (Envitech, 2015); (Cárcel and Grau C, 2014); (Ríos V. and Ramírez H., 2012); (Bongiorno, 2010); (Chaux et al., 2009); (Salas C. and Condorhuamán C., 2008); (Canales, 2005).

A las aguas residuales de industrias cárnicas se les miden parámetros ambientales que permiten evaluar su grado de contaminación, dentro de los más significativos se encuentran los sólidos en suspensión (SS), la carga orgánica expresada como demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda biológica de oxígeno a los cinco días (DBO5), los aceites y grasas (A y G), el nitrógeno y fósforo totales (NT y PT), las sales, así como los detergentes y desinfectantes.

Existe una amplia bibliografía referida a los valores de parámetros de contaminación en aguas residuales de la industria cárnica, con una gran disparidad de datos, que se muestran en la tabla 1.3 (Ver anexo 3). Se puede entender, que es complejo establecer un rango concreto que caracterice las aguas residuales debido a las distintas formas de operación y la heterogeneidad de las especies sacrificadas en una industria cárnica; incluso para una misma industria, día a día y, para cada día, hora a hora, el vertido que se produce es distinto. Al respecto, se asume la propuesta de Cruz (2019) con los valores para industrias cárnicas (Ver tabla 1.4, anexo 4). Este autor opina que, para mataderos vacunos y porcinos se puede establecer el grado de contaminación a partir del valor relativo de algunos parámetros respecto al peso de las bandas de carne producidas, como se muestra en la tabla 1.5 (anexo 5).

Los límites máximos permisibles para todos estos parámetros del grado de contaminación de las aguas de residuales una vez que son tratadas y en dependencia

del lugar a verter (alcantarillados, río, arroyo, lago, embalse, acuífero) que recibe directa o indirectamente la descarga o efectos contaminantes suelen ser diferentes en cada país, según normativas y resoluciones. En Cuba se rige por la norma NC:27:2012, (Normalización, 2012) que establece los siguientes límites máximos permisibles de parámetros del grado de contaminación de las aguas residuales en la industria cárnica (Ver tabla 1.6, anexo 6)

Para lograr obtener los valores establecidos de los parámetros del grado de contaminación, según resoluciones y normas de cada país, es necesario que toda industria cuente con un sistema de tratamiento de residuales adecuados que elimine tan elevadas cargas contaminantes.

1.5.3. Tratamiento de aguas residuales en mataderos

El tratamiento de las aguas residuales se produce por la combinación de procesos físicos, químicos y/o biológicos. El diseño de cada una de estas operaciones depende del tipo de agua residual que se debe tratar, de sus características, del volumen y de la calidad del efluente requerida (Vega, 2010).

El tratamiento de las aguas residuales en un matadero comienza en la planta donde se debe hacer todo lo posible por adoptar una recuperación eficiente de los subproductos y una limpieza en seco, la cual reduce significativamente el consumo. Por lo que se recomienda diseñar un sistema de tratamiento que considere un pretratamiento (rejas y trampas de grasas) que eliminen los sólidos gruesos y finos, seguido de un tratamiento primario (físico o físico-químico) y por último, un tratamiento secundario (biológico) el cual será el responsable de eliminar la materia orgánica y el nitrógeno (Envitech, 2015). A continuación, se describen brevemente los tratamientos que pueden utilizarse para la industria de la carne (Pre-tratamiento, Tratamiento Primario y Tratamiento Secundario). El Pre-tratamiento, es la primera operación a la que se someten los residuos líquidos (Portillo, 2014). Consiste en retener los sólidos y grasas que arrastra el agua y que podrían por su tamaño y características entorpecer el normal funcionamiento de las plantas de tratamiento (López Navaja, 2015). Los sistemas más comunes para dicho pretratamiento son las rejas, tamices y las trampas de grasas cuya eficiencia garantiza el buen funcionamiento de los procesos posteriores.

El tratamiento primario consiste en la remoción de una cantidad importante de los sólidos suspendidos y otros que pueden sedimentar, contenidos en las aguas residuales, mediante procesos físicos y/o químicos. Los sistemas de tratamiento primario más comunes son: el estanque homogeneizador, la flotación por aire disuelto o disperso (DAF), el sedimentador y las tecnologías de membranas.

El tratamiento secundario, ya sean anaerobio o aeróbico tienen el propósito de eliminar la materia orgánica biodegradable presente en los residuos líquidos. Para escoger un sistema de tratamiento secundario, hay que considerar un gran número de factores, entre los que se pueden: requerimientos del efluente (estándares de descarga), sistema de pretratamiento escogido, la disponibilidad del terreno, regulaciones ambientales locales y factibilidad económica de una planta de proceso.

En el tratamiento anaeróbico los efluentes provenientes de un matadero pueden ser tratados en lagunas o reactores cerrados. Este tipo de tratamiento requiere poco espacio, tiene un bajo costo de operación y genera biogás, que puede ser utilizado en el proceso productivo o comercializado.

Según Nakasima et al. (2011), las lagunas anaerobias están diseñadas para la remoción de materia orgánica suspendida y parte de la fracción soluble de la misma. Operan en serie con lagunas facultativas o de maduración. Este tratamiento tiene un buen rendimiento para aguas residuales con alto contenido orgánico, pero dentro de sus desventajas se encuentra el trabajar a bajas temperaturas y largos periodos de retención, además deben ser construidas a distancias considerables de los límites urbanos.

Todos los métodos de tratamiento aeróbico existentes, pueden ser aplicados a los efluentes de la industria de la carne: lodos activados, lagunas aireadas, filtros de goteo o contactores biológicos rotatorios. El caso de la UEB Comercializadora de Productos Agropecuarios o Matadero de la Empresa Pecuaria Managuaco, en Sancti Spíritus, se utiliza la laguna aireada, que es un pozo de tratamiento artificial de agua por medio de la aireación para promover la oxidación biológica de las aguas residuales.

1.5.4. Beneficios de la valorización de residuos en la digestión anaerobia en mataderos

La digestión anaerobia es un proceso que puede ser utilizado como un método para recuperar energía y nutrientes contenidos en la fracción biodegradable de la materia

orgánica, lo que representa beneficios económicos, sociales y ambientales. El proceso está mediado por la acción de un grupo de bacterias específicas que, en ausencia de oxígeno, transforman la materia orgánica en una mezcla de gases, fundamentalmente metano y CO₂, conocida como biogás y en un residuo denominado digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación (Fig. 2).

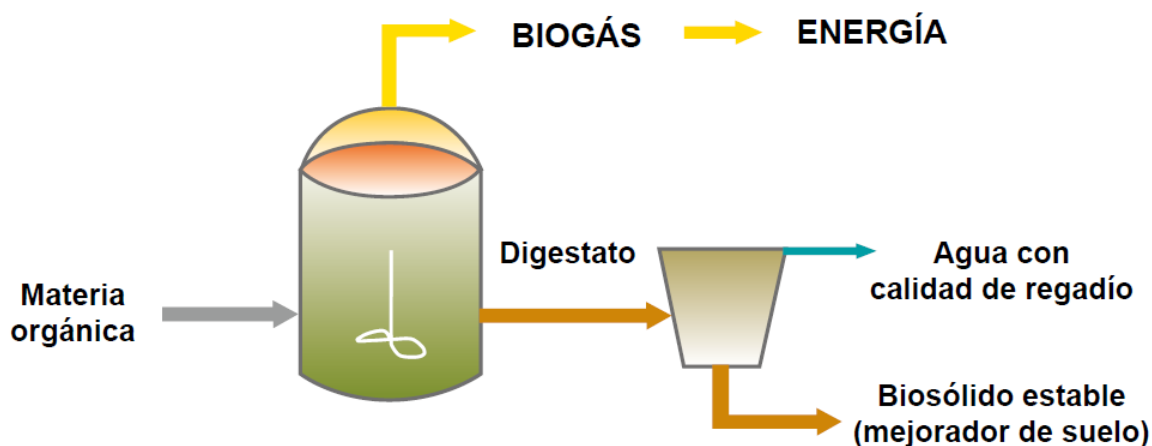


Fig. 2. Esquema básico del proceso de digestión anaerobia

Fuente: MINENERGÍA/GIZ (2012)

La digestión anaerobia puede aplicarse, entre otros, a residuos ganaderos y agrícolas, así como a los residuos de las industrias de transformación de productos agropecuarios. También es un proceso adecuado para el tratamiento de aguas residuales de alta carga orgánica, como las producidas en muchas industrias agroalimentarias.

1.5.4.1. Biogás

Es una mezcla de gases cuyos principales componentes son el metano y el dióxido de carbono, el cual se produce como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno por la acción de un grupo de microorganismos que interactúan con otros factores. La composición del biogás puede variar de acuerdo con el tipo de material orgánico utilizado en la carga del biodigestor y con el tiempo que se utilice en el proceso de biodigestión.

El biogás está compuesto por: metano (CH₄) entre 55% -70%, dióxido de carbono (CO₂) entre 35% – 40%, hidrógeno (H₂) entre 1% – 3%, nitrógeno (N₂) entre 0,50% – 3%, sulfuro de hidrógeno H₂S (g) alrededor del 0,10% y trazas de vapor de agua (Montes, 2008). El

biogás es un poco más liviano que el aire y posee una temperatura de inflamación de 650 - 750°C. Con un contenido de metano mucho menor de 50%, el biogás deja de ser inflamable. Su poder calorífico promedio es de 5000 kcal. Un metro cúbico de biogás permite generar entre 1,30-1,60 kWh de electricidad, que equivalen a medio litro de petróleo, aproximadamente.

De los componentes que integran el biogás el Metano (CH_4) es un gas incoloro, inodoro, más ligero que el aire que se disuelve poco en agua. Se licua a presión atmosférica a $-161,5^\circ\text{C}$ mediante un proceso que requiere mucha energía. El dióxido de carbono (CO_2) es un gas incoloro, inodoro, que pesa 1,5 veces más que el aire y no es combustible. Un alto porcentaje de éste en la composición del biogás reducirá su calidad. El sulfuro de hidrógeno (H_2S), es un gas incoloro, no combustible que representa un porcentaje pequeño en el compuesto, es extremadamente tóxico e irritante. Es el compuesto que le da el olor característico de huevo podrido a estos gases, es inflamable y extremadamente peligroso (Viquez, 2010).

El biogás, además de metano tiene otra serie de compuestos que se comportan como impurezas: agua, sulfuro de hidrógeno, monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles como hidrocarburos halogenados, entre otros. Por tanto, es necesaria la limpieza del combustible, dependiendo del uso final.

Según MINENERGÍA/GIZ (2012) el valor energético del biogás depende directamente del contenido de metano que varía entre 50% y 75% (18 y 27 MJ/m³ o 0,017 y 0,026 MMBTU/m³). Otros autores como Cepero et al. (2012) establecen variaciones en el porcentaje de la composición del biogás, tales como: metano (40-70%), Dióxido de carbono (30-60%), Hidrógeno (0,1%), Nitrógeno (0,5%), Monóxido de carbono (0,1%), Oxígeno (0,1%) y, Sulfuro de hidrógeno (0,1%).

Salvo por el contenido en H_2S , el biogás es un combustible ideal conocido como combustible ecológico, con equivalencias con otros combustibles, que se muestran en la figura 3.

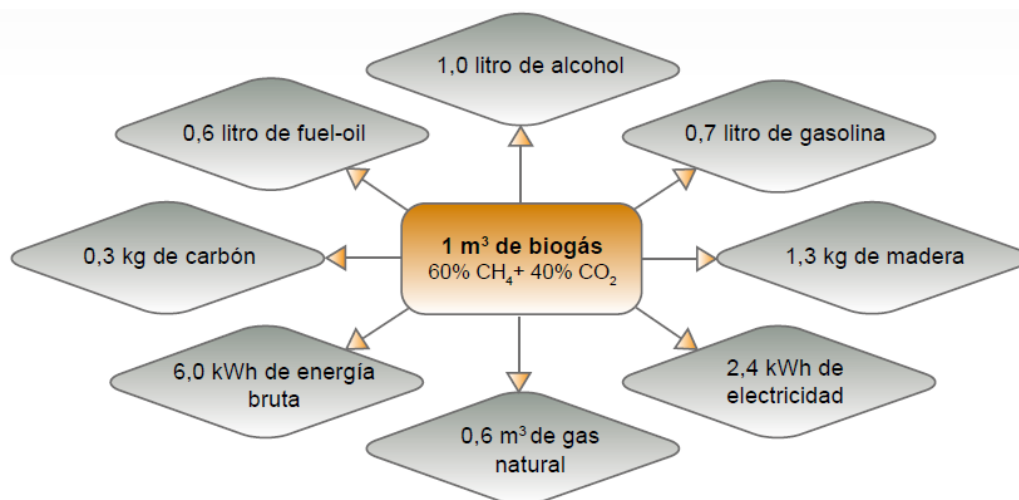


Fig. 3. Equivalencia del biogás con otros combustibles

Fuente: MINENERGÍA/GIZ (2012)

El biogás producido en procesos de digestión anaerobia puede tener diferentes usos, tales como: para una caldera de generación de calor o electricidad, en motores o turbinas para generar electricidad, en pilas de combustible, previa realización de una limpieza de H_2S y otros contaminantes de las membranas, purificarlo y añadir los aditivos necesarios para introducirlo en una red de transporte de gas natural, uso como material base para la síntesis de productos de elevado valor añadido, como es el metanol o el gas natural licuado y como combustible de automoción.

Una aplicación tipo de la digestión anaerobia es en las granjas de ganado bovino y porcino de gran tamaño o como planta de gestión de residuos en zonas de alta concentración de ganado estabulado, por el gran problema que generan los purines. En este caso se puede proponer y proyectar una planta de digestión anaerobia de producción de biogás como autoabastecimiento energético, según las necesidades.

1.5.4.2. Digestato

Como producto de la digestión anaerobia de la materia orgánica se obtiene biogás de elevado poder energético, y un producto estabilizado, mezcla de agua y sólidos, que se conoce como lodo digerido o digestato resultante del crecimiento microbiano, que contiene materia no orgánica, materia orgánica no digerida, biomasa bacteriana y los nutrientes que se encuentran en la materia orgánica digerida. Este digestato puede tener

uso en la agricultura como fertilizante orgánico (biofertilizante) o en la recuperación de suelos degradados.

1.6. Biodigestor

Los biodigestores son reactores especialmente diseñados para maximizar la eficiencia de conversión de los sustratos en la energía del biogás, y obtener subproductos con valor agregado, como biofertilizantes (Casanovas et al., 2019). Los biodigestores pueden tener tecnologías muy variadas, que incluyen desde construcciones caseras con diversos materiales, hasta plantas con tecnología de punta completamente automatizadas. Según Casanovas et al. (2019) no existe una tecnología mejor que otra, sino tecnologías que se adaptan mejor a una situación que otras, y su elección depende del objetivo que se persiga, de los recursos de que se disponga, del tipo de financiamiento para realizar la inversión, y de la clase de sustrato que alimentará al biodigestor, entre los aspectos más relevantes.

A nivel mundial se han empleado diferentes tecnologías (biodigestores) a pequeña y a gran escala. Estas tecnologías difieren en cuanto a sus costos de inversión, sus parámetros de operación, por ejemplo: la demanda química de oxígeno (DQO), temperatura, tiempo de retención hidráulica (TRH), productividad volumétrica (Pv), la carga orgánica volumétrica (COV) y sus impactos ambientales. Estas tecnologías deben ser seleccionadas cuidadosamente en función del contexto donde se apliquen.

1.6.1. Elementos que componen un biodigestor

Los biodigestores están integrados por una serie de componentes cada uno desarrollando una función específica, los cuales son: (Campos, 2011).

1. Tanque de digestión: Es el que define la denominación del biodigestor. El mismo está compuesto por la cámara de fermentación y la cúpula. En la cámara de fermentación anaeróbica el material a descomponer permanece un determinado tiempo, llamado tiempo de retención, en el cual ocurre la degradación y liberación del biogás. Su geometría es cilíndrica y su capacidad está dada por el volumen de material a degradar. La función de la cúpula es almacenar el gas en los momentos que no existe consumo, pues la producción de gas es ininterrumpida a lo largo de todo el día. La capacidad de almacenaje de la cúpula depende del volumen de la cámara de fermentación.

2. Laguna de compensación: En ella se acumula el material ya fermentado (digerido), donde puede recogerse. La capacidad de la laguna está en dependencia del volumen del biodigestor (un tercio del mismo) y puede tener diferentes formas (cuadrada, circular, rectangular) y construirse encima de la cúpula o al lado del tanque de fermentación.
3. Registro de carga: Puede tener variadas formas y su tamaño depende del diseño del digestor. En el mismo se introduce el material a fermentar, mezclándose con agua en las proporciones adecuadas y homogenizándose.
4. Conducto de carga: Comunica el registro de carga con el tanque de fermentación.

1.6.2. Purificación del biogás

El sistema de purificación garantiza el acondicionamiento del biogás para su uso posterior. Uno de los elementos del biogás más indeseable es el sulfuro de hidrógeno (H_2S). La reducción del contenido de H_2S en el biogás, por su alto poder corrosivo, contribuye a alargar la vida útil de los equipos. Algunos autores consideran que en pequeñas concentraciones (menor del 1%) no es imprescindible la eliminación del H_2S . Sin embargo, los límites de tolerancia de H_2S en el biogás, a escala industrial, son inferiores al 0,1%. Existen numerosos métodos para eliminar el sulfuro de hidrógeno (H_2S) del biogás, dentro de ellos se pueden mencionar: proceso seco de oxidación y proceso de oxidación en fase líquida. El proceso seco de oxidación con Fe_2O_3 es el más simple y económico

1.6.3. Biodigestores de uso agropecuario

A. Criterios de Diseño típico.

El espacio determina principalmente la decisión de si el fermentador se sitúa por encima del suelo o subterráneo, si es que se construye como un cilindro en posición vertical o como una planta horizontal (se suelen usar digestores horizontales cuando hay sustratos ricos en materia seca como la cama de los animales).

Las estructuras existentes en la explotación ganadera pueden ser utilizadas, como un depósito de estiércol líquido, una sala vacía o un recipiente de acero. Para reducir los costos, puede ser necesario ajustar el diseño de la planta a estas estructuras. Minimizar los costos puede ser un parámetro de diseño importante, especialmente cuando los beneficios monetarios se espera que sean bajos. En este caso una cubierta flexible del

digestor es generalmente la solución más barata. La minimización de los costos a menudo se opone a maximizar el rendimiento del gas.

El sustrato disponible determina no sólo la forma del recipiente de mezcla, sino también, el volumen del digestor (tiempo de retención) y los dispositivos de calentamiento y agitación. La agitación a través de inyección de gas sólo es factible con un sustrato homogéneo y un contenido de materia seca por debajo del 5%. Sin embargo, la agitación mecánica puede ser problemática en sustratos con más del 10% de materia seca.

B. Principales tipos de biodigestores.

✓ **Sistema de cúpula fija** (Fig. 4)

Este tipo de planta contiene un depósito de gas fijo que se sitúa en la cima del digestor, el sustrato en digestión se desplaza al tanque de compensación. La presión del gas aumenta con el volumen de gas almacenado y con la diferencia de altura entre el digestor y la suspensión en el tanque de compensación.

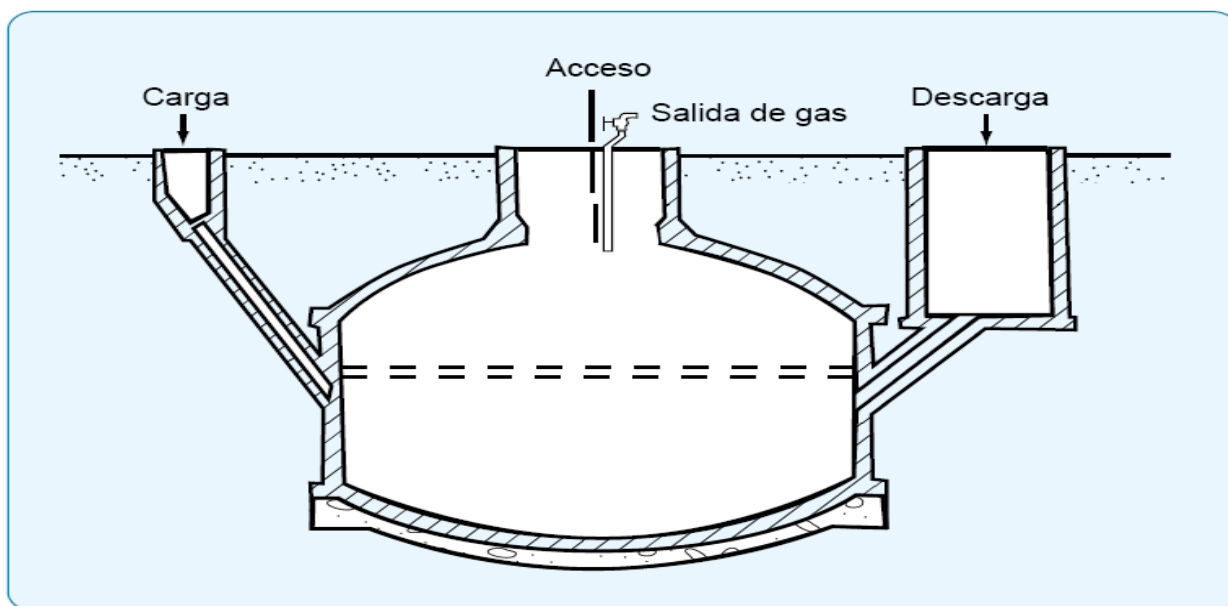


Fig. 4. Biodigestor de cúpula fija. **Fuente:** Nodar, 2012, citado por (Paiva, 2016)

Este tipo de digestores se sitúa bajo el suelo, es más barato ya que no tiene piezas móviles y además de larga duración (hasta 20 años) porque no está expuesto a daños físicos, sol y temperatura extrema. Además, permite el mejor aprovechamiento del espacio.

✓ **Sistema de tambor flotante.** (Fig. 5)

Consiste en un digestor bajo tierra y una campana de gas móvil. La camisa de gas flota, ya sea directamente sobre la suspensión de fermentación o sobre una camisa de agua propia. El gas se recoge en el tambor que se levanta o se mueve hacia abajo, de acuerdo con la cantidad de gas almacenado. Un bastidor de guía impide la inclinación del tambor de gas. Si el tambor flota sobre una camisa de agua no puede atascarse, incluso si el sustrato tiene alto contenido en sólidos.

En este tipo de plantas la presión de gas se mantiene constante y el volumen de gas es fácilmente perceptible por la posición del tambor. No hay problemas de estanqueidad siempre y cuando el gasómetro se desoxide y se pinte con regularidad. Los principales inconvenientes son que el tambor de acero es caro y requiere un mantenimiento intensivo, además, el tiempo de vida es relativamente corto en función del clima de la zona y con el uso de sustratos fibrosos pueden producirse atascos.

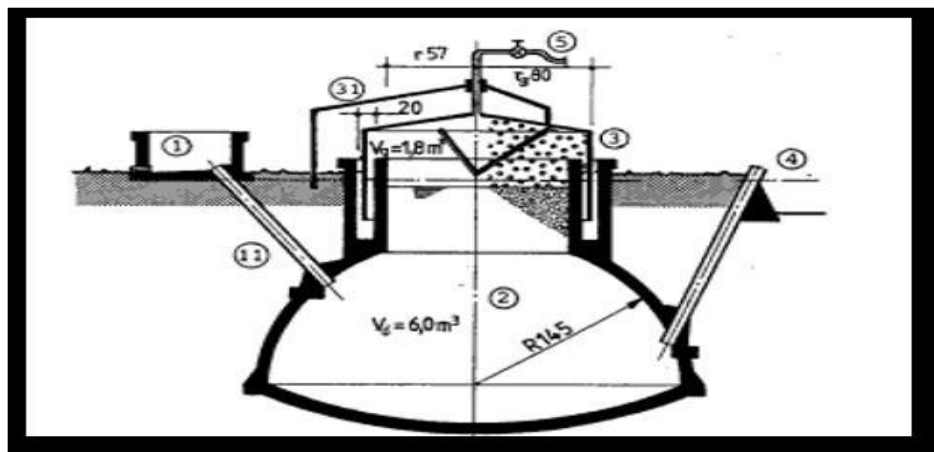


Fig. 5. Biodigestor de Tambor flotante: 1) Pozo de mezcla; 11) Tubo de llenado; 2) Digestor; 3) Gasómetro; 31) Guía de encuadre; 4) Depósito de la suspensión; 5) Tubería de gas.

Fuente: Nodar, 2012, citado por (Paiva, 2016)

✓ Sistema balón o biodigestor tubular (Fig. 6)

La planta de balón se compone de un tubular de material plástico (polietileno, PVC, plastilona, entre otros, y una combinación de éstos) completamente sellado, la entrada y la salida están sujetas directamente a las paredes de la planta. La parte inferior de la planta, en un 75% del volumen constituye la masa de fermentación, y en la parte superior, el 25% restante, se almacena el biogás. Este tipo de planta se recomienda para aquellos sitios donde predominan las temperaturas altas y constantes.

Entre sus ventajas, están que sus materiales de construcción son de fácil transporte; su instalación y adecuación del sitio son sencillas; es apropiado en sitios con nivel freático alto, por su construcción horizontal; y entre los tipos de biodigestores, es el menor costo de construcción y operación. Son desventajas, la baja presión de gas; una vida útil corta, entre 5 y 12 años, dependiendo del material que se seleccione; debe protegerse contra los rayos solares; y el material plástico está sujeto a daños, siendo necesario en lo posible encerrarse el área adyacente al biodigestor.

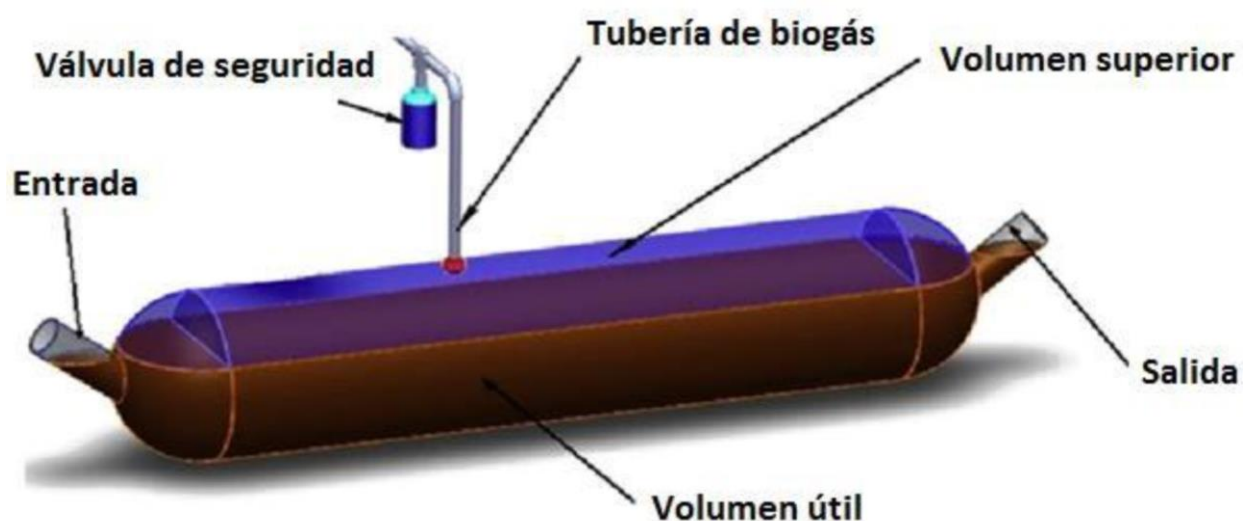


Fig. 6. Biodigestor Tubular o de flujo pistón

Fuente: Saavedra et al. (2017)

✓ **Biodigestor Tipo Laguna Cubierta** (Fig. 7)

En este tipo de sistemas, la entrada de la materia prima ocurre por gravedad o uso de bombas. Normalmente grandes flujos de excremento o desechos de rastros drenan hacia grandes contenedores donde los residuos son tratados y metabolizados por alrededor de 40 días. Estos biodigestores están contruidos a partir del recubrimiento de grandes zanjas o pozos con materiales aislantes fabricados a partir de plástico, geomembrana que cubren el piso y que proveen la condición anaeróbica necesaria.

En función de la densidad de la materia prima utilizada será necesario construir paredes interiores que artificialmente alarguen el trayecto que la materia prima realizará dentro de ellos, con el fin de proveer las condiciones necesarias para su total tratamiento y consecuente producción de biogás.

En estos sistemas, una fase gaseosa de biogás rica en metano es formada en la parte superior del biodigestor. Tras la generación de biogás, este es distribuido a través de tuberías a un medidor de gas hacia el punto final de utilización del gas, que puede ser con fines caloríficos o generación de electricidad. Alternativamente la distribución del biogás irá hacia una llama de combustión de biogás donde será quemado, produciendo dióxido de carbono como subproducto. Este CO_2 en comparación al metano, es prácticamente inocuo, pues tiene 21 veces menos poder contaminante (considerado en una escala de tiempo de 100 años) y por lo tanto disminuye el potencial de generación de gases efecto invernadero del proceso productivo.



Fig. 7. Biodigestor Tipo Laguna Cubierta

Fuente: Moncayo (2014)

Cada sistema de biodigestión es único puesto que la materia prima puede provenir de diferentes tipos de animales y diferentes combinaciones entre ellas, y a la vez el ganado es alimentado a partir de diferentes fuentes nutricionales. Adicionalmente la ubicación y el clima juegan un rol importante. Es por esto que cada sistema debe estudiarse por separado para asegurar su adecuado funcionamiento.

Los parámetros de operación recopilados proporcionan información valiosa que apoya la toma de decisión a favor del diseño de un biodigestor de laguna tapada, tecnología capaz de asimilar mayores cargas orgánicas y de lograr las mayores productividades volumétricas y eficiencias de remoción.

Según (Moncayo, 2014), las características básicas de un biodigestor apropiado para clima tropical son las siguientes: uso extensivo de materiales de construcción existentes en cada país, aprovechamiento del clima y radiación solar para maximizar la producción de biogás, bajos costos de construcción y fácil de operar y mantener

1.6.4. Beneficios en la economía, la sociedad y el medio ambiente

Los biodigestores, además de producir biogás, permiten reducir la emisión descontrolada de metano y CO₂ a la atmósfera, ambos gases de efecto invernadero, provenientes de la ganadería. También la emisión de óxido nitroso y amoníaco productos de abonos artificiales, al aplicar como bioabono los efluentes del biodigestor, los cuales están compuestos por nitrógeno y fósforo.

Asimismo, cada 380,0 L de metano (CH₄), formados en un digestor de biogás a presión de 101 325 Pa y 25 °C de temperatura, reducen la carga contaminante en 1,00 kg de Demanda Química de Oxígeno (DQO) (Blanco et al., 2015). De manera que, se puede afirmar que la tecnología del biogás aporta una serie de beneficios de carácter medioambiental y económico, ya que a partir de darle tratamiento a un residual se obtiene un combustible que sustituye en parte a los combustibles fósiles.

Según Guardado (2011), (Guardado, 2013) los beneficios que aporta una planta de biogás son múltiples:

- Trata los desechos orgánicos o residuales contaminantes, por lo que se elimina su efecto perjudicial para la salud, los malos olores y la contaminación del entorno.
- Aprovecha el biogás producido para emplearlo en las necesidades energéticas en la cocción de alimentos y eliminar así el empleo de combustibles fósiles.
- Aprovecha el biogás en el alumbrado de viviendas o en instalaciones o locales que requieran iluminación nocturna, lo que sustituye el empleo de energía eléctrica.
- Aprovecha el biogás producido como combustible en equipos que posean motores de combustión.
- Recupera inmediata del mejoramiento de las condiciones del medio ambiente, con un evidente beneficio ecológico e impide la contaminación de mantos acuíferos.
- Incrementa en más de 25% el rendimiento de las cosechas o huertos, con el empleo del material o lodo que se extrae del biodigestor (bioabono).

- Aprovecha el material extraído del biodigestor, o sea, el bioabono, como componente nutritivo importante para la alimentación de aves de corral, peces, ganado, etc.
- Logra independencia como consumidor energético y de fertilizantes químicos, con integración total de los recursos aprovechables, dentro del ciclo productivo y social.
- Es una energía renovable y sustentable, que fomenta el desarrollo sustentable.
- Crea empleos especializados.
- Crea la posibilidad de incursionar en un proyecto de vanguardia.

La autora considera que el biogás es una tecnología importante, ya que como cualquier combustible posee ventajas y desventajas, pero se trata de una fuente renovable de energía, que posee valor energético, le da tratamiento a los residuales y entrega un excelente bioabono para prácticas agroecológicas.

1.7. Metodología de Evaluación Económica

Según Suárez et al. (2007) la evaluación económica de un proyecto tiene como objetivos: determinar su viabilidad económica, considerando el flujo real de los recursos valorados en función del costo de oportunidad. Definir la viabilidad financiera, identificando y cuantificando las fuentes de financiamiento para definir la mejor combinación de recursos para el proyecto.

Los métodos de evaluación económica que se presentan a continuación se basan en la consideración de que el valor del dinero en el tiempo es diferente. Cuando se habla del valor del dinero en el tiempo, es posible pensar en el valor futuro de una cifra disponible en el presente, o en el valor que tendría en el presente una cifra disponible en el futuro. El Valor Actualizado Neto (VAN) consiste en calcular el valor presente de las erogaciones e ingresos que se generen a lo largo de la duración de la inversión. Esta determinación se realiza mediante la utilización de la fórmula básica del interés compuesto.

Una inversión será conveniente si la suma de saldos actualizados netos o VAN es mayor que cero. Es decir, cuando los ingresos del proyecto alcancen para cubrir las erogaciones y los costos de oportunidad. El VAN mide, en valor monetario actual, el beneficio atribuible a invertir en el proyecto, en lugar de hacerlo en la alternativa cuyo retorno es la tasa de descuento utilizada en el cálculo. El VAN da una idea de la ganancia generada por el proyecto, pero no es una "medida absoluta", ya que depende de la tasa de descuento que se utilice.

La Tasa Interna de Retorno (TIR) representa la tasa de rentabilidad promedio anual del proyecto de inversión. Es decir, la tasa de ganancia promedio anual que se obtendría en una inversión que requiere egresos y aporta ingresos en el tiempo. Es la tasa calculatoria que hace que el valor actualizado neto de la inversión tome un valor nulo. El método se emplea principalmente cuando se desea conocer la rentabilidad de una inversión y comparar la tasa obtenida con la que rige en el mercado o en otra alternativa. Por supuesto, una inversión es conveniente cuando la tasa interna de retorno es superior a la tasa de interés calculatoria utilizada para el cálculo del VAN. También se puede utilizar para establecer un orden de prioridad cuando las inversiones sean no excluyentes y existan restricciones presupuestarias. Si las alternativas son excluyentes la prioridad se establece sobre la base del VAN.

El Período de Recuperación al Decontado (PRD) de una inversión se calcula contando el número de años que se demora hasta que los flujos efectivos acumulados igualen a la inversión inicial. Esta determinación se podrá realizar considerando flujos efectivos con o sin actualización.

1.8. Conclusiones parciales del capítulo

1. La industria cárnica es uno de los sectores productivos con mayor consumo de agua, debido a los altos estándares de higiene y calidad que le son exigidos y por tanto mayor productor de aguas residuales con mayor impacto sobre el medio ambiente.
2. El impacto ambiental del residual líquido de la industria cárnica y su reducción es un tema actual y frecuentemente tratado en la literatura especializada.
3. Las oportunidades de aprovechamiento de los residuos de la industria cárnica tienen una gran aplicación en la actualidad.
4. De los tipos de biodigestores analizados, en los últimos años se ha incrementado el uso de lagunas tapadas en Cuba, por la alta eficiencia de eliminación de DQO.

CAPÍTULO 2. DISEÑO DEL SISTEMA DE BIODIGESTIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS.

2.1. Introducción

En el capítulo se explican los procedimientos para la obtención de datos y el diseño del biodigestor. En un primer momento se caracteriza brevemente el Matadero de la Empresa Pecuaria Managuaco y se describe el proceso productivo que realiza como base para la propuesta del sistema de biodigestión elegido para la obtención de biogás y el tratamiento de las aguas residuales generadas en el Matadero.

2.2. Caracterización general de la UEB Comercializadora de Productos Agropecuarios de la Empresa Pecuaria Managuaco en Sancti Spíritus.

La Empresa Pecuaria Managuaco fue creada en el año 1976 por Resolución 302/76, emitida por el ministro de la Agricultura Rafael Francia Mestre. La misma se encuentra ubicada al este de la ciudad de Sancti Spíritus, perteneciente al municipio y provincia de mismo nombre, con una extensión de 12 091,7 ha, de ellas 8461,7 ha pertenecen al sector estatal y 3630 ha al sector privado con un área agrícola de 11 374 ha, de ellas dedicadas a la ganadería 10 446 ha y 928 ha a los cultivos varios.

La Empresa en su estructura cuenta con una dirección de Regulación y Control y 6 Unidades Económicas de Base (UEB), de las cuales 2 de ellas son Productivas: UEB Genética Dos Ríos, la cual tiene como objeto principal el desarrollo Genético del Siboney de Cuba, y cuenta con dos colectivos laborales Niña Bonita y Sabanilla, y la UEB Genética Quemadito, que desarrolla el Búfalo de río y cuenta también con el colectivo Palma. Otras 4 UEB complementan el proceso productivo con la comercialización, logística y prestación de servicios tanto de maquinaria y transporte, como el de veterinaria y reproducción. Además, atienden 5 Cooperativa de Créditos y Servicios (CCS) asociadas en áreas de la empresa, con la cantidad de 798 socios de ellos 153 mujeres, 7 profesionales, de los cuales 4 son mujeres, 15 técnicos medios, con 7 mujeres y 5 obreros calificados.

La UEB Comercializadora de Productos Agropecuarios, conocida como “Matadero” fue creada en enero del año 2018, a partir de aquí se nombrará Matadero. Comenzó a comercializar con las ventas al turismo y a la población entre otras ventas en la empresa

insertada en el Sistema de Atención al hombre. Debido al crecimiento en la comercialización y en la creación de un nuevo proyecto para el año 2021 se decide crear la nueva área de preparación de carne que se completa a finales de año. Cuenta con el área de la Dirección, Colectivo Cárnico, Colectivo Carbón, Pecuario y embarcadero.

La **misión** de la UEB Comercializadora de Productos Agropecuarios garantiza los niveles de producción de Carne, Carbón y Embutidos, teniendo en cuenta el acelerado ritmo de desarrollo tecnológico y la globalización del mercado a nivel nacional y mundial. Garantizando ventas a la población y al turismo. Con un desarrollo integral y una gestión eficaz, veraz y oportuna para la conformidad permanente de los clientes, tanto internos como externos, de todos los recursos que dispone la UEB, además de un capital humano preparado, cuenta con un nivel de gestión operacional y con los medios tecnológicos, técnicos, los equipos, los recursos humanos, y de decisión necesarios y motivado para mantener la calidad de los servicios sustentados en un Sistema Integrado de Gestión de la Calidad.

La **visión** apunta a: “Somos una UEB que la comercialización constituye la base para la solución de nuestros problemas internos y externos, distinguida por la profesionalidad, experiencia y calificación de sus trabajadores y la satisfacción de sus clientes. Aspiramos a una producción con la calidad requerida por las normas cubanas y lograr la entrada al mercado en USD” (Managuaco, 2021).

El colectivo laboral está integrado por 40 personas, 10 de ellas conforman el consejo de dirección. Trabajan de lunes a sábado.

2.3. Procedimiento para la recolección de datos

La obtención de datos se realiza a partir de una visita comentada por la analista A Ing. Barbarita Martín Castillo en el Matadero, donde se pudo observar el proceso integrado de sacrificio, producción de carne y subproductos que se lleva a cabo. A continuación, se aplica una entrevista a los trabajadores del local con el objetivo de alcanzar mayor detalle en los datos previos para realizar el diseño del biodigestor.

La entrevista obedeció a los siguientes tópicos:

- Cantidad de ganado que se sacrifica diariamente.
- Consumo aproximado de agua por animal en un día.

- Tipo de residuales que genera el Matadero.
- Método de tratamiento de los residuales.
- Flujograma del proceso que desarrollan.
- Dificultades que enfrentan durante el proceso.

2.4. Descripción del proceso productivo actual en el Matadero

Se inicia el proceso en el área de recepción, cuando el ganado se aloja en corrales de depósito (el ganado que está planificado para ser sacrificado y aquellos recogidos en la vía) alrededor de 8 horas antes de ser sacrificados, en espera del ayuno para que defequen. Actualmente, en estos corrales se recoge la excreta manualmente y se deposita en una pila a la intemperie, contaminando el medioambiente. Este residuo es importante para el trabajo del biodigestor.

A continuación, el ganado pasa al área de sacrificio y despojo del animal, donde se bañan para retirarles del cuerpo el polvo y las excretas. Se aturden con corriente, son apuñalados en el corazón antes de que pase el efecto del aturdimiento y se procede a al desangrado, desollado y eviscerado para lo cual son colocados en líneas de procesamiento, suspendidos de sus patas traseras y lavados. El primer estómago o panza, las patas y la cabeza son vaciados en una sección al aire libre, donde se lavan también. Se genera gran cantidad de agua residual contaminada con subproductos (polvo, pérdidas de sangre, restos de carne, grasa, piel y contenido ruminal). La sangre y los restos más grandes son retirados en seco para su comercialización, mientras que el agua residual es arrastrada por la corriente del lavado de los pisos y pasa a través de rejillas a dos canales de drenaje soterrado que van directamente a un tanque séptico ubicado fuera de la instalación y tienen registros para ser revisados.

El tanque séptico está dividido en dos partes, en una parte, se queda el sólido y al otro lado pasa el líquido por decantación y de ahí a la laguna de oxidación. Los residuales sólidos grandes se recogen manualmente y se depositan en un camión y los pequeños quedan en el tanque séptico, que cada cierto tiempo se limpia.

Existen 3 lagunas aerobias que están interconectadas y van recibiendo las aguas residuales por decantación. En estos momentos, el pre tratamiento que se les da a las aguas residuales consiste en depositar las mismas, en el tanque séptico, de manera que

todo el material sólido de gran tamaño flota y el agua residual corre hacia la primera laguna de oxidación, de ahí por decantación a una segunda laguna facultativa y a una tercera laguna de estabilización, para más tarde pasar a una cañada.

El sacrificio del ganado vacuno permite aprovechar más del 90% de la res. Sin embargo, en el Matadero aún no se logran aprovechar todas las partes no comercializables para el consumo humano. Solo se comercializa la piel, el cebo, la panza, los mondongos (para alimento animal), y se recolecta la sangre de manera independiente, para comercializar con el Grupo Empresarial LABIOFAM, y no se descarga junto con el agua residual.

En el área de elaboración el animal es cortado en dos piezas grandes, llamadas canales y se pasa a la sala de despiece donde se separan las piezas, se clasifican en 7 cortes, hasta que queda convertido cada animal en un producto comercializable, o continúa a la sala de preparación de carne, donde se hace picadillo, chorizo, ahumados o tasajo. Estas dos salas también generan gran cantidad de agua para el lavado durante el proceso (enjuague de utensilios, piso y canales de reses) y la limpieza final de la planta de proceso y los equipos.

El agua que se utiliza proviene de un pozo ubicado a unos 10 metros de la planta y es bombeada por una bomba alimentada por un sistema de paneles solares fotovoltaicos. La descripción del proceso productivo del Matadero se evidencia en las siguientes imágenes contenidas en la fig. 8.



a) Corrales de depósito



b) Pasarela de corrales a área de sacrificio



c) Laguna aeróbica 1



e) Laguna aeróbica 2



d) Tanque séptico



e) Área de despiece

Fig. 8. Representación del proceso productivo en el Matadero

Fuente: Tomadas por la autora durante la visita al Matadero

2.5. Propuesta del sistema de biodigestión elegido para la obtención de biogás y tratamiento de las aguas residuales generadas en el Matadero.

2.5.1. Descripción del sistema de biodigestión propuesto. Tratamiento preliminar.

Diferentes clases de sustratos requerirán de tratamientos diferentes, dependiendo de la consistencia de dichos sustratos (que tan sólidos o líquidos son). El pre tratamiento que se le da a un sistema de biodigestión, es la adición de agua, dependiendo del sustrato a añadir y del sistema de manejo de excretas con el que cuenta la unidad productiva.

Según SAGARPA (2013), se podrá considerar una adición mínima de relación entre el agua de lavado y sólidos (excretas) de 3:1 y máxima de 9:1. Para el Matadero no es necesaria la adición de agua a las excretas (se aprovechará la recogida manual del área de depósito y se adicionarán al tanque de alimentación), esto se debe a que el sistema

de manejo de residuales es mediante el lavado de los pisos de las áreas productivas; es decir, las excretas ya tendrán agregada agua mediante esta limpieza.

Es importante también mantener el tanque séptico que ofrece un pre tratamiento de desbaste, con función de separador por decantación, ya que, al decir de la analista del Matadero, al realizar la limpieza de los pisos del área de sacrificio, estas aguas arrastran restos de materiales sólidos como tarros, pezuñas, etc. que pueden ser perjudiciales para el biodigestor. Este tanque séptico debe tener mantenimiento periódico.

Tanque de alimentación.

Antes de ingresar al biodigestor, las aguas residuales llegarán a un tanque de alimentación, para contener el volumen diario con el cual se cargará el biodigestor. Este tanque de alimentación debe construirse para mezclar las excretas que provienen de los corrales de depósito, con las aguas residuales de la planta. La mezcla se realizará una vez al día y se programará para que toda esta carga se alimente al biodigestor en 24 horas en forma manual y por gravedad, para lo cual se reorientará la conexión entre el tanque séptico y la laguna de oxidación hacia el tanque de alimentación.

Este volumen incluirá el volumen de la masa y del agua residual, en este caso la masa serían las excretas del ganado. Este tanque de alimentación servirá para sedimentar los materiales pesados (piedra, tierra, etc.) y materiales sobrenadantes, que proporciona un fluido libre de materiales extraños. Se construirá y ubicará una rejilla a la salida del tanque de alimentación para evitar que los sólidos groseros no entren al biodigestor.

Tratamiento secundario

Después de pasar por el tanque de alimentación y el desbaste, estas aguas residuales sin materiales sólidos de gran tamaño, irán al biodigestor en donde se realizará el proceso de digestión anaeróbica.

Las aguas residuales que se almacenan en el biodigestor tipo laguna cubierta, pasan un determinado tiempo (tiempo de retención hidráulica) para poder fermentarse y producir biogás. Mayormente sus tiempos de retención son en días, como mínimo 10 días y un máximo de 45 días (Suluda and Inácio, 2006) y (Blanco et al., 2012), dependiendo de la temperatura ambiental y del tipo de sustrato. Transcurrido el tiempo de retención, se obtendrá biogás producto de la fermentación, almacenándose en la cubierta del biodigestor.

Este biogás pasará por una etapa de desulfuración, donde se eliminará el H_2S . Se utilizará como materiales filtrantes pellets de Fe_2O_3 , carbón activado, virutas de acero y carbón vegetal (preferiblemente de marabú) para absorber el sulfuro de hidrogeno. Los pellets y el carbón activado serán comprados por el proyecto FRE local.

El efluente que sale del biodigestor, se almacenará en una laguna de descarga, que existe como laguna estabilizadora. Para los lodos que se extraen del biodigestor, mediante bombas, se recomienda secarlos para su utilización como fertilizante orgánico.

2.5.2. Diagrama de flujo y de proceso para la obtención de biogás

El siguiente diagrama de flujo representa las etapas que se proponen para la obtención de biogás en el Matadero.

En la primera etapa, **recepción de la excreta y el agua residual**, ingresarán la excreta y el agua residual, producida en el proceso de sacrificio de 40 reses (perspectiva inmediata del Matadero) al tanque de alimentación, que servirá para controlar el caudal diario, con que se alimentará al biodigestor.

En la segunda etapa, **desbaste por rejillas** (se encuentran dentro del tanque de alimentación), servirá para retener el material sólido de grandes tamaños, que pueda ser perjudicial para el funcionamiento del biodigestor.

La tercera etapa, **digestión anaeróbica**, es la etapa más importante en todo el proceso de obtención de biogás, ya que es donde la materia orgánica se fermentará para poder producir biogás.

La cuarta etapa, el biogás que se generó en la tercera etapa, pasará por una **desulfuración**, para eliminar el ácido sulfhídrico (H_2S) presente en el biogás, ya que es altamente corrosivo.

Finalmente, se extraerá el digestato hacia la laguna de descarga.

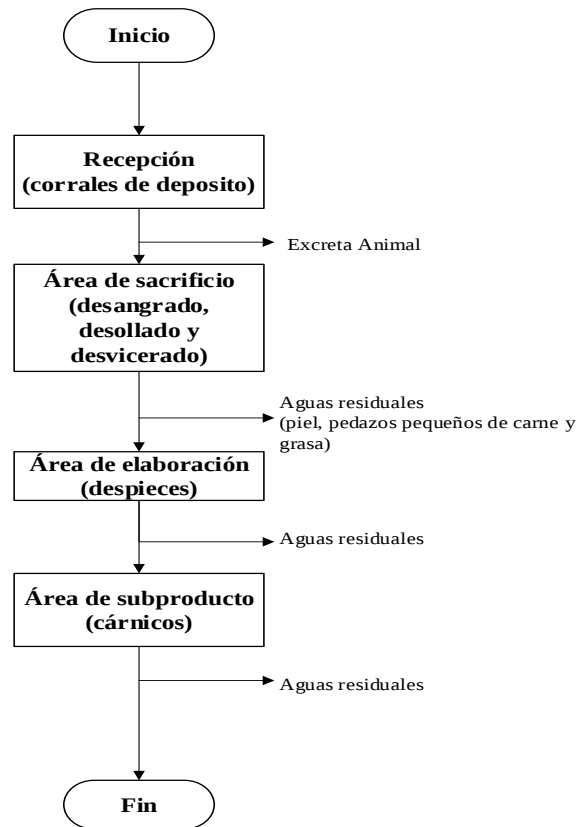


Fig. 9. Diagrama de flujo para la obtención de biogás

Fuente: Elaboración propia

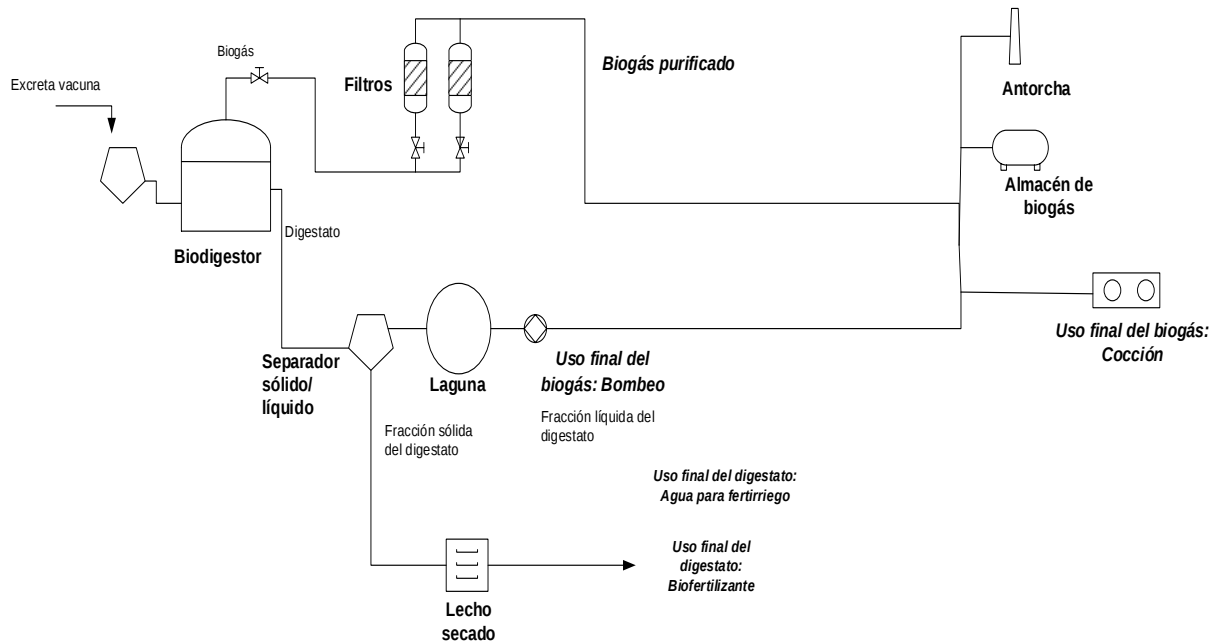


Fig. 10. Diagrama de proceso para la obtención de biogás

Fuente: Elaboración propia

2.6. Diseño del sistema propuesto para la obtención de biogás

En las zonas tropicales es importante aprovechar al máximo las altas temperaturas ambientales y el fuerte sol para lograr una óptima degradación de la materia orgánica y una máxima producción de biogás. Por esta razón, se propone el sistema de biodigestión, con un biodigestor tropicalizado tipo laguna cubierta, para que el sol irradie sobre la superficie del biodigestor y caliente la biomasa dentro, acelere su degradación y maximice la producción de biogás.

El concepto básico de diseño es la construcción de una laguna semienterrada o bajo tierra y de un muro perimetral donde se sujeta la membrana. El fondo de la laguna, es revestido con un material impermeable y sobre la cubierta de la laguna se coloca una geomembrana flexible de Polietileno de Alta Densidad (PEAD), con 1,5 mm de espesor que almacena el biogás.

2.6.1. Especificaciones del tanque de alimentación

Los tanques de alimentación, se dimensionan para el volumen diario de alimentación al biodigestor. Este tanque servirá para hacer la mezcla. En este caso las excretas entrarán al tanque de alimentación ya diluidas con las aguas residuales.

El volumen del tanque dependerá de la continuidad en la alimentación. En algunos casos se prefiere dimensionar el tanque de alimentación para que almacene la mezcla de biomasa con agua requerida en un periodo de 1 a 2 horas. En el Matadero se dimensionará el tanque de alimentación para que almacene el flujo de una hora. Se dimensionará el tanque de alimentación con el caudal máximo al día ($m^3/día$) de agua residual, para una norma de sacrificio de 40 bovinos por día. Moncayo (2014) recomienda que al caudal definido se le añada un 20% adicional, para soportar picos de cargas orgánicas. Caudal máximo $36,4 m^3/día$:

$$Q = 36,4 \frac{m^3}{día} * 1,2 = 43,68 \frac{m^3}{día}$$

Por otro lado, sabiendo que la limpieza de los pisos de las diferentes áreas productivas del Matadero se realiza en un máximo de 6 horas; es decir para un día se consideran 6 horas de limpieza, donde se genera agua residual; y como se mencionó anteriormente

que se dimensionará el tanque de alimentación para que almacene el flujo de una hora, por tanto, se realizó el siguiente cálculo:

$$Q = 43,68 \frac{m^3}{día} * \frac{día}{6h} = 7,28 \frac{m^3}{h}$$

Por lo tanto, el volumen útil del tanque de alimentación será de 7,28 m³.

No existe una regla definida para dimensionar estos tanques de alimentación. Pueden ser de forma cilíndrica, cuadrangular o rectangular. En este proyecto se optó por dimensionar el tanque de forma rectangular, asumiendo que el largo será dos veces mayor que el ancho para así disminuir el número de rejillas que se utilizaran dentro del tanque de alimentación.

Se le añadió un borde o altura libre al tanque de alimentación de 0,30 metros, para evitar derramamientos, y una altura de 1,5 metros. Considerando el borde o altura libre, el volumen total del tanque de alimentación será de 7,53 m³. Para determinar sus dimensiones se realizó el siguiente cálculo y se puede observar en la tabla 2.1 el resultado:

$$V = a * b * c$$

$$V = 1,56 * 3,12 * 0,30$$

$$V = 1,46 m^3$$

Donde:

$$7,28 m^3 = 2a^2 * 1,5 m$$

$$7,28 m^3 = a * 2a * 1,5 m$$

$$a = \sqrt{\frac{7,28}{2 * 1,5}}$$

$$a = 1,56 m$$

$$b = 2a$$

$$b = 2 * 1,56 m$$

$$b = 3,12 m$$

$$c = 0,30 m$$

$$V_{Total} = 1,46 m^3 + 7,28 m^3$$

$$V_{Total} = 8,74 m^3$$

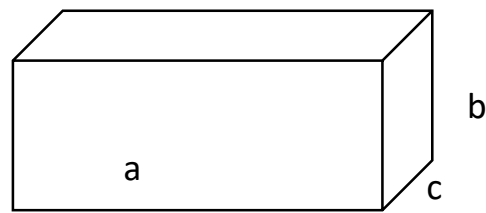


Tabla 2.1. Dimensiones del tanque de alimentación

Dimensiones	Valores
Volumen total	8,74 m ³
Volumen útil	7,28 m ³
Altura	1,5 m
Borde libre	0,30 m
Largo	3,12 m
Ancho	1,56 m

Fuente: Elaboración propia

Desbaste por rejilla

Se colocarán rejillas gruesas combinadas con barras horizontales y verticales dentro del tanque de alimentación, justo antes de que pasen a las tuberías de descarga hacia el biodigestor, como se muestra en la figura 10.



Figura 10. Rejillas para tanques de alimentación de sistemas de biodigestión

Fuente: Paiva (2016)

Según Reynolds y Richard (1996) las normas de diseño para rejillas recomendadas son las siguientes:

- *Ancho de la rejilla (a_b):*

El ancho de la rejilla recomendada = 10 mm.

- *Abertura de la rejilla (e_b):*

La abertura de la rejilla recomendada = 50 mm

Se asume que las rejillas serán colocadas a 1 metro de distancia de las tuberías de alimentación al biodigestor, que se encuentran dentro del tanque de alimentación, y a una altura por debajo del borde libre (0,30 metros).

Se consideran rejillas con pletinas cilíndricas de 2" *1/4" (50 mm*10 mm). El resumen de las dimensiones de las rejillas se refleja en la siguiente tabla 2.2.

Tabla 2.2. Dimensiones del sistema de rejillas

Ancho del canal o tanque de alimentación (a_{canal})	1560 mm
Altura del canal o tanque de alimentación (h_{canal})	1500 mm
Diámetro de pletina	10 mm
Separación entre ejes de pletina (e)	60 mm
Número de pletinas verticales ($n = a_{\text{canal}} / e$)	26 unid
Número de pletinas horizontales ($n = h_{\text{canal}} / e$)	25 unid

Fuente: Elaboración propia

2.6.2. Especificaciones del biodigestor tipo laguna cubierta

A. Selección del tiempo de retención hidráulico (TRH)

En digestores continuos y semicontinuos el tiempo de retención se define como el valor en días del cociente entre el volumen de biodigestor y el volumen de carga diaria. De acuerdo al diseño del digestor, el mezclado y la forma de extracción de los efluentes pueden existir variables diferencias entre los tiempos de retención de líquidos y sólidos, debido a lo cual suelen determinarse ambos valores.

La fracción de materia orgánica degradada aumenta al aumentarse el TRH, sin embargo, la producción volumétrica de metano (producción por unidad de digestor) disminuye, una vez superado el óptimo. Por eso para determinar el TRH que optimiza el proceso de digestión, nos basamos en referencias de plantas de biogás existentes que trabajan con este tipo de sustrato.

El TRH se determina en base a la temperatura de la biomasa y la temperatura promedio ambiental de la zona. La zona donde se ubicará el sistema de biodigestión está en el municipio de Sancti Spíritus que posee un clima tropical. En este año 2021, en el municipio se registró una temperatura mínima de 17 °C, temperatura promedio de 25,1 °C y una temperatura máxima de 32 °C (Spíritus, 2021). A menor temperatura ambiental

mayor será el TRH necesario para la degradación de la materia orgánica. A mayor temperatura ambiental, menor TRH. En la siguiente tabla 2.3 se muestra el TRH con que se trabajará:

Tabla 2.3. Tiempo de retención hidráulica (TRH) en relación a la temperatura ambiental

Temperatura ambiental (° C)	TRH (días)
12-15	60
15-20	50
> 20	40

Fuente: Blanco et al. (2012)

Es por ello que se seleccionó un tiempo de retención hidráulica de 30 días para este tipo de sustrato, debido que el agua residual se encuentra a temperatura ambiente, ya que no existe un tratamiento previo que eleve su temperatura, porque solo es una disolución de las excretas al combinarse con las aguas residuales. La temperatura promedio que se encuentra en Sancti Spíritus es de 25,1 °C.

B. Carga diaria para alimentar al biodigestor

Para poder dimensionar el biodigestor se trabajó con el caudal diario máximo (36,4 m³/día). El biodigestor requerirá un espacio horizontal, será construido a base de concreto, geomembranas, tuberías de PVC, para una vida útil, aproximadamente de 12 a 15 años. El tipo de flujo será continuo, con una capacidad alta. Requerirá un mantenimiento estable para la limpieza de carga y descarga e inspección de la superficie de la geomembrana.

C. Construcción de la laguna para el biodigestor

La laguna es la parte más importante de un biodigestor de laguna cubierta. La excavación para el biodigestor se realizará con medios manuales y maquinaria. El suelo debe ser apisonado y compactado previo a la colocación de la membrana. La rasante, será uniforme y libre de cualquier objeto afilado, piedras o con puntas que puedan dañar la geomembrana. La rasante del biodigestor se debe construir plana, uniforme y sin huecos. El fondo y taludes, serán revestidos de una capa delgada de 4 cm de hormigón para igualar las irregularidades del suelo. La capa de hormigón servirá para estabilizar el talud. El dimensionamiento geométrico del sistema se calcula a partir del volumen total del

biodigestor, utilizando la ecuación con la que se estima un cuerpo geométrico de forma trapezoidal cuadrangular o rectangular (pirámide invertida truncada). La fórmula es la siguiente:

$$V_{BD} = \frac{h}{3} * (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 * A_2})$$

Donde:

V_{BD} = Volumen útil de biodigestor

h = Altura del biodigestor

A_1 = Área del piso

A_2 = Área del nivel máximo de agua o de la corona

Para este caso se dimensionó el biodigestor a partir de la fórmula de la pirámide invertida truncada de forma rectangular.

Cálculo del volumen útil del biodigestor

Se calculó el volumen útil del biodigestor multiplicando la carga diaria de alimentación (caudal máximo) por el tiempo de retención hidráulico dado para este sistema.

Caudal diario de alimentación = 36,4 m³/día

Tiempo de retención hidráulica (TRH) = 40 días

V_{BD} = Carga diaria de alimentación * TRH

V_{BD} = 36,4 m³/día * 40 días

V_{BD} = 1456 m³

Según el “Manual de dimensionamiento y diseño de biodigestores industriales para clima tropical. Biodigestores tropicalizados (2014)”, al volumen calculado se le debe dar un 20% de volumen adicional (volumen de seguridad) para soportar picos de carga orgánica. Entonces se realizará el siguiente cálculo:

V_{BD} = 1456 m³ * 1,2

V_{BD} = 1747,2 m³

Cálculo de las áreas del biodigestor

Según Moncayo (2014), la altura debe estar entre 3 a 4 metros. Para este proyecto se eligió una altura de 3 metros. El talud de las paredes del biodigestor deberá ser entre 1:1 y 1:3 (Fig. 11) para la colocación de la geomembrana. Si los taludes aumentan a 1:1 las

paredes se volverán inestables, sin embargo se utilizó para este biodigestor un talud de 1:1, ya que es el recomendado por SAGARPA (2013).

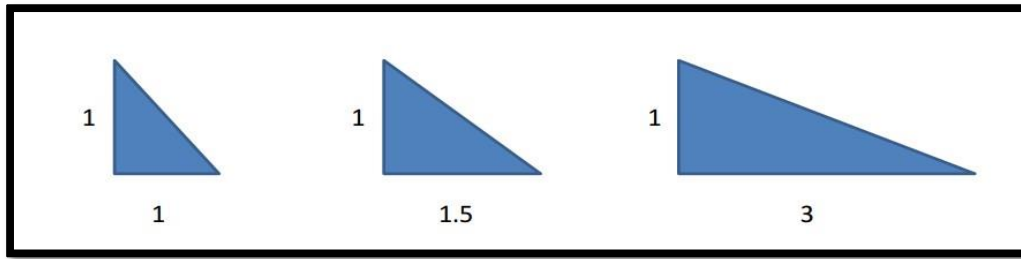


Figura 11. Medidas de los taludes para biodigestores de laguna cubierta

Fuente: SAGARPA (2013)

Por lo tanto, conociendo la altura (3 metros), el volumen del biodigestor ($1747,2 \text{ m}^3$) y conociendo que es de forma pirámide truncada rectangular, se calcularon las medidas del área del piso (A_1) y las medidas de la corona (A_2).

De acuerdo al “Manual de Construcción y Operación de Planta de Biogás” del Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial (s/f), el largo del piso y de la corona deben ser 3 veces el ancho de los mismos (figura 12).

Es decir: Largo = $3x$ y Ancho = x

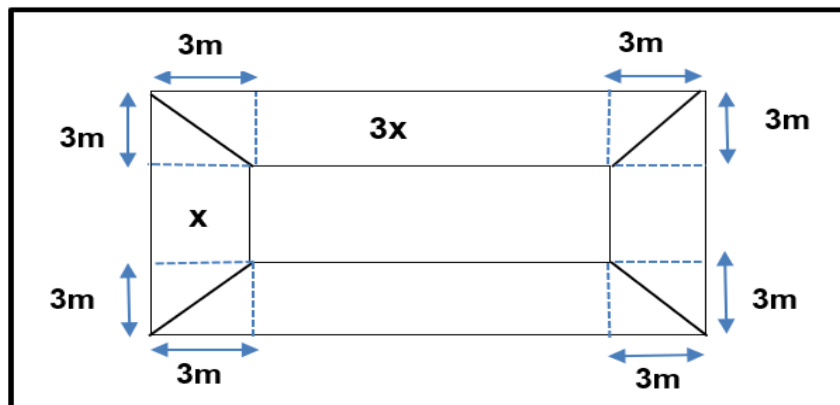


Figura 12. Vista superior de una pirámide truncada rectangular

Fuente: Elaboración Propia

Donde:

$h = 3$ metros

$$A_1 = 3x^2$$

$$A_2 = (6+3x)(6+x) = 3x^2 + 24x + 36$$

Entonces se procede a realizar los cálculos respectivos:

$$V_{BD} = \frac{h}{3} * (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 * A_2})$$

$$1747,2 \text{ m}^3 = \frac{3 \text{ m}}{3} * (3x^2 + 3x^2 + 24x + 36 + \sqrt{(3x^2 + 24x + 36) * 3x^2})$$

$$1747,2 = 6x^2 + 24x + 36 + \sqrt{9x^4 + 72x^3 + 108x^2}$$

$$1711,2 = 6x^2 + 24x + \sqrt{9x^4 + 72x^3 + 108x^2}$$

$$x = 11,95 \text{ m}$$

Entonces, reemplazando tenemos el cálculo de las áreas correspondientes de la laguna del biodigestor.

Donde:

$$A_1 = 3 * 11,95^2 = 428,41 \text{ m}^2$$

$$A_2 = (6 + 3 * 11,95) * (6 + 11,95) = 751,21 \text{ m}^2$$

Los datos de las medidas de la laguna del biodigestor se reflejarán en la siguiente tabla:

Tabla 2.4. Dimensiones de la laguna del biodigestor tipo laguna cubierta

Partes	Medidas	
	Volumen	1747,2 m ³
	Altura	3 m
Piso de la laguna del biodigestor	Largo 1	35,85 m
	Ancho 1	11,95 m
Corona del biodigestor	Largo 2	41,85 m
	Ancho 2	17,95 m

Fuente: Elaboración propia

D. Muro perimetral para sujetar la membrana de cubierta

La membrana de cubierta del biodigestor se sujeta en un muro perimetral de hormigón armado, ladrillo o bloque de hormigón reforzado con varillas de acero y sobre ella se realiza la unión por medio de las platinas y de los pernos de anclaje. Dependiendo del tamaño del biodigestor y de la altura del muro se requiere de una cimentación en forma de zapata corrida sencilla.

Existen varias alternativas para la construcción del muro perimetral. No hay una receta válida para todos los casos. Para cada proyecto se debe analizar cuál es la opción más

favorable. Según el “Manual de dimensionamiento y diseño de biodigestores industriales para clima tropical” (2014), se usará un muro perimetral de bloques reforzado con varillas de acero, levantado sobre cimentación en forma de zapata corrida. Las especificaciones son las siguientes:

- El ancho de la pared será de 0,40 metros.
- La altura es de 1 metro.
- Bloques de 0,20*0,20*0,40 metros, reforzadas con varillas de acero.

SAGARPA (2013) recomienda las siguientes especificaciones para la zanja de anclaje, las cuales fueron tomadas para el desarrollo de este proyecto.

- A un metro de distancia del inicio del talud.
- Ancho de 0,50 metros.
- Profundidad de 0,90 metros.

E. Material para cubrir el fondo y cubierta del biodigestor

El fondo del biodigestor y la cubierta en donde se almacenará el biogás, será recubierto con geomembrana de Polietileno de Alta Densidad (PEAD), ya que la membrana debe ser de un material resistente y durable. A continuación, se detallan las características que deben tener las membranas de cubierta para biodigestores:

- Resistente a los químicos.
- Alta capacidad de fuerza.
- Flexibilidad inherente sin aditivos.
- Resistente al clima y sus condiciones que permitan una subsistencia displicente al exterior.
- Capacidad de ser fusionado a soldaduras por medio de métodos termales, en lugar de usar adhesivos o solventes.
- Resistencia a los rayos UV.
- Alta vida útil.

Las membranas de PEAD, tienen larga vida útil debido a sus características físico químicas, como la resistencia a aguas agresivas, biogás, humedad, elongación, rasgado, etc. La vida útil de estas membranas es de 30 a 50 años. Las membranas de este material tienen una elongación de 130% de su tamaño sin sufrir daños.



Figura 13. Membrana PEAD para biodigestores de laguna cubierta

Fuente: Moncayo (2014)

El consumo de geomembrana de PEAD, que se requerirá para el fondo del biodigestor, se detalla en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Dimensiones de la geomembrana PEAD para impermeabilizar la laguna del biodigestor

Dimensiones de la geomembrana para impermeabilizar		
	Largo (m)	Ancho (m)
Piso del biodigestor	35,85	11,95
Desarrollo de Talud	8	8
Vereda antes del muro perimetral	1	1
Muro perimetral	1	1
Dimensiones de la geomembrana para impermeabilizar	45,85	21,95
Desperdicio de geomembrana (13% más)	6	3
Dimensión total de geomembrana para impermeabilizar	51,81	24,80
Área total de geomembrana para impermeabilizar (m²)	1284,89	

Fuente: Elaboración propia

Por tanto, las dimensiones de la geomembrana PEAD, para cubrir el biodigestor y captar el biogás producido, se detalla en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Dimensiones de la geomembrana PEAD para cubierta del biodigestor

Dimensiones de la geomembrana para cubierta del biodigestor		
	Largo (m)	Ancho (m)
Corona del biodigestor	41,85	17,95
Vereda antes del muro perimetral	1	1
Espesor del muro perimetral	0,5	0,5
Dimensiones de la geomembrana para cubierta	43,35	19,45
Desperdicio de geomembrana (13% más)	6	3
Dimensión total de geomembrana para cubierta.	48,99	21,98
Área total de geomembrana para cubierta (m²)	1076,80	

Fuente: Elaboración propia

En las tablas 2.5 y 2.6, para hallar las dimensiones totales de la geomembrana PEAD para la cubierta y el fondo del biodigestor, se considera un porcentaje del 13% por desperdicios de geomembrana que se pueda generar a la hora de colocarlos en el biodigestor. Se considera este 13% más, según las especificaciones de los especialistas de la empresa CIDELSA, dedicada a la construcción de biodigestores en Perú.

2.6.3. Especificaciones de la laguna de descarga

La laguna de descarga, se dimensionó para que almacene el efluente del biodigestor. Teóricamente el 75% de la DQO se degrada en el biodigestor, por lo que el 25% debe degradarse en la laguna de descarga para cumplir con la normativa de los Límites Mínimos Permitidos (LMP) para plantas agroindustriales.

El efluente de la laguna de descarga, dependerá del volumen del afluente al biodigestor y, del aprovechamiento del afluente, como fertilizante en la agricultura o de su comercialización, y de la normativa de descarga que se tenga que cumplir.

Se aprovecharán las lagunas existentes (facultativa y estabilizadora) hasta el momento, para ser usadas como lagunas de descarga que se encuentran ubicadas en una zona baja del terreno, aguas abajo del biodigestor. La profundidad de las lagunas debe ser de 1 a 2 metros; en este caso se consideró la altura máxima de 1,5 metros, por lo que estas lagunas deben ser rellenadas para su aprovechamiento por poseer profundidades mayores (4 y 2,5 m respectivamente).

El talud a usarse para la laguna de descarga será en relación de 1:2, para evitar que crezcan plantas en el fondo. La forma geométrica que tendrá la laguna de descarga será la de pirámide truncada cuadrangular.

Entonces se dimensionó la laguna de descarga para cumplir la normativa.

$$h_{\text{laguna aeróbica}} = 1,5 \text{ m}$$

$$\text{TRH} = 15 \text{ días}$$

$$\text{Efluente de descarga del biodigestor: } Q = 33 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Donde:

V_{TD} = Volumen del tanque de descarga

$$Q * \text{THR} = 33 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * 15 \text{ días} = 495 \text{ m}^3$$

Al igual que el biodigestor se le da un 20% para contrarrestar cargas máximas

$$V_{TD} = 495 \text{ m}^3 * 1.2 = 594 \text{ m}^3$$

Este volumen se dividirá en dos partes para aprovechar las 2 lagunas

V_{LD} = Volumen de laguna de descarga

$$\frac{V_{LD}}{2} = \frac{594 \text{ m}^3}{2} = 297 \text{ m}^3$$

$$V_{TD} = \frac{\pi * D^2}{4} * h_{la}$$

$$594 \text{ m}^3 = \frac{3,14 * D^2}{4} * 1,5 \text{ m}$$

$$\frac{594 \text{ m}^3 * 4}{1,5 \text{ m} * 3,14} = D^2$$

$$\sqrt{\frac{2376 \text{ m}^3}{4,71 \text{ m}}} = D$$

$$D = 22,46 \text{ m}$$

2.6.4. Estructuras auxiliares

2.6.4.1. Tuberías de alimentación y descarga

Los biodigestores, deben tener un sistema de alimentación y uno de descarga. Dependiendo del tipo de sustrato y del grado de seguridad que se desea obtener se deben instalar solamente una tubería de captación y una de descarga. Pero para este

proyecto debido al volumen del biodigestor y de las lagunas de descarga se utilizarán 2 tuberías de alimentación y dos tuberías de descarga.

Se utilizarán tuberías que se emplean para agua potable. A pesar de las bajas presiones con las que trabajan las tuberías de alimentación, es recomendable, utilizar este tipo de tuberías debido al espesor de la pared del tubo y su alta resistencia y durabilidad.

A. Tuberías de alimentación

Las tuberías de alimentación conducen la biomasa desde el tanque de alimentación de control hacia el fondo del biodigestor. Estas tuberías descargan a 1 metro del fondo del biodigestor. Por lo menos deben de descargar más abajo del 50% de la profundidad del biodigestor. Son rectas y no se añadirán codos para facilitar la limpieza en caso de taponamientos. El diámetro de la tubería será de 200 mm (el más recomendable). Se utilizarán dos tuberías de alimentación. Primero, se realiza la excavación, se fijan las tuberías de tal forma que no se muevan durante la colocación del enlucido con cemento y, después se cubre el talud con la membrana.

B. Tuberías de descarga

Las tuberías de descarga extraerán el biol (componente líquido) o digestato degradado del biodigestor. Se instalarán la misma cantidad de tuberías (PVC) que en el tanque de alimentación (2 tuberías) con un diámetro de 200 mm.

Pozo de control del efluente del biodigestor

Las tuberías de descarga, siempre deben de descargar en un pozo de control del biol, que sirve para acceder a la tubería en caso de obstrucciones (figura 2.6).



Figura 14. Pozo de control para la descarga del efluente del biodigestor.

Fuente: Moncayo (2014)

Es por ello que se dimensionaron dos pozos de control (una para cada tubería). Los pozos de control, deben tener las dimensiones adecuadas para que una persona entre al pozo y pueda introducir una varilla o manguera para la limpieza de las tuberías. Según Moncayo (2014), nos da las siguientes medidas (tabla 2.7) para los pozos de control:

Tabla 2.7. Dimensionamiento de los pozos de control de biol.

Dimensiones	
Altura	1 metro
Ancho	1 metros
Largo	1 metros
Espesor	0,15 metros

Fuente: Moncayo (2014)

La captación de las tuberías de descarga, se le colocará a la mitad de la profundidad del biodigestor. Es decir, a 2 metros del piso del biodigestor.

Tuberías de captación de biogás.

La captación del biogás que se produce en el biodigestor se realizará por medio de tuberías. El material seleccionado para las tuberías es de PVC, para evitar corrosiones y reemplazos constantes de las mismas, ya que el inconveniente adicional del biogás es que está saturado por un 100% de vapor de agua y contiene ácido sulfhídrico.

Se ha previsto al menos dos puntos de captación de biogás ubicados en lados opuestos. Para biodigestores con un volumen mayor a 1000 m³, se deben instalar tuberías con un diámetro de 100 mm.

Se ubicarán las tuberías de captación de biogás en el tramo del muro perimetral que sella la membrana. Se usará la siguiente alternativa (fig. 15) para la captación de biogás, a través del muro perimetral. Se pondrá mucha atención para que la tubería quede bien sellada y no haya fugas de biogás. La distancia mínima de la captación de biogás debe de ser de 0,3 metros sobre el nivel máximo de llenado del biodigestor.



Figura 15. Diagrama esquemático de captación de biogás

Fuente: Moncayo (2014)

2.6.4.2. Sistema de agitación

Se seleccionarán agitadores de acero inoxidable, diseñados expresamente para biodigestores. El pozo de los motores del agitador, deben de ubicarse a los costados del biodigestor. Debido al ancho del biodigestor, se deberá instalar un agitador a cada lado, tal como se ve en la siguiente fig. 16.

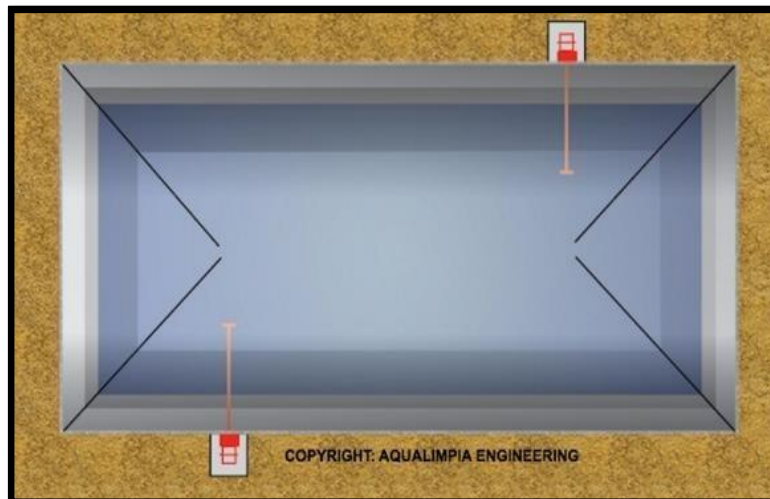


Figura 16. Ubicación de los agitadores en el biodigestor

Fuente: Moncayo (2014)

Por razones mecánicas y estructurales, se debe limitar la longitud del eje del agitador a un máximo de 6 m. Longitudes mayores, requieren de una mayor fuerza de torsión para el giro del agitador.

Generalmente, se calcula de 1 a 3 kW de potencia por cada 100 m³ de biodigestor (Moncayo. 2014). Se usó para este caso una potencia media de 2 kW por cada 100 m³ de biodigestor.

Mediante una regla de tres simple, se calculó la potencia del motor de los agitadores para poder remover toda el agua residual o excreta de bovino en el biodigestor propuesto:

(1310,4 m³)

Por lo tanto, si:

2 kW → 100 m³

x → 1747,2 m³

$$x = \frac{1747,2 \text{ m}^3 * 2 \text{ kW}}{100 \text{ m}^3} = 34,94 \text{ kW}$$

Entonces se necesitan 34,94 kW para poder remover los 1747,2 m³ de agua residual en el biodigestor, pero sabiendo que se deben instalar por lo menos 2 agitadores en biodigestores mayores o iguales a 1000 m³. Por lo que cada agitador tendrá una potencia de 17,47 kW.

La ficha técnica del agitador que se ajusta a este biodigestor, se refleja en la tabla 2.8.

Tabla 2.8. Ficha técnica del agitador AG-1, a usarse en el biodigestor.

Ficha técnica del agitador AG-1	
Modelo de agitador gigante	Modelo AG-1 de 3 paletas
Potencia nominal	11-20 kW
Frecuencia (Hz)	60 Hz
RPM	480
Longitud de eje	4 m
Ajuste horizontal y vertical	+/- 25°
Material	acero inoxidable

Fuente: Suma, 2015



Figura 17. Agitador AG-1 para usarse en el biodigestor

Fuente: Moncayo (2014)

En la siguiente figura, se presenta un ejemplo de cómo se debe instalar un agitador, en el muro perimétrico del biodigestor.



Figura 18. Ubicación conceptual de agitador en el muro perimetral

Fuente: Moncayo. 2014

2.6.4.3. Antorcha o quemador de biogás

Es necesario, que siempre se instale una antorcha para quemar el biogás en exceso o cuando se están manteniendo y/o reparando los equipos que aprovechen el biogás.

La antorcha se dimensionó para abarcar el caudal máximo diario de biogás en m^3/h , conociendo que se generan 125 m^3 biogás al día. Entonces el volumen de la antorcha será de:

*Caudal entrante.antorcha = 125 m³ biogás/día*6 horas/día*

Caudal entrante.antorcha = 20 m³ biogás/hora

La antorcha (fig. 19) solo debe estar encendida cuando el biodigestor alcance su máxima presión de operación y se apagará cuando el biodigestor este vacío o la presión este al mínimo.



Figura 19. Antorcha o quemador de biogás

Fuente: Moncayo. 2014

Debe ubicarse a 30 metros de distancia del biodigestor, por razones de seguridad. Se fabricará de acero inoxidable, con un diámetro mínimo de 0,46 m y una altura de 3,5 m, conteniendo un elemento aislante en el interior de la cámara de combustión que resista temperaturas superiores, a las que se pueden alcanzar durante la combustión del gas (SAGARPA, 2013).

2.6.4.4. Filtro de retención de ácido sulfhídrico (H₂S)

Para este proyecto se deberá instalar un filtro para la retención de ácido sulfhídrico, ya que el aprovechamiento del biogás es para energía térmica. Este ácido es precursor del ácido sulfúrico, el mismo que corroe las partes metálicas y acorta el tiempo de vida útil de los equipos. El tamaño del filtro y su capacidad estará en función del volumen de biogás producido y de la concentración del ácido sulfhídrico que piensa ser retenido (SAGARPA. 2013).

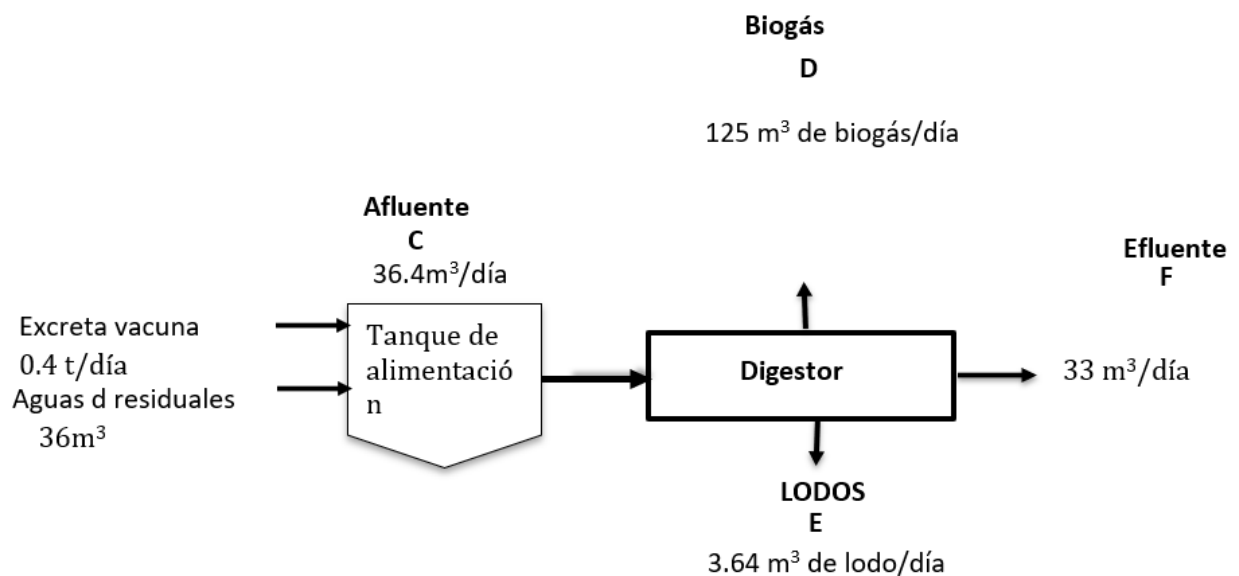
Es necesario destacar que el material filtrante que se usará es de virutas de acero, que será recogido como desecho de talleres de maquinado que existen en el territorio. El tratamiento previo parte de un lavado de las virutas, con detergente, para eliminar la grasa y otras suciedades, y se dejan secar. Posteriormente las virutas se sumergen en una

solución de HCl al 5,0% durante 5-10 minutos, se extraen y se secan al aire; por último, son sumergidas en una solución de NaOH al 5,0%, por 5 a 10 minutos, y de nuevo se dejan secar al aire. Como resultado, las virutas se convierten en Fe_2O_3 , compuesto que reacciona rápidamente con el H_2S , cuyo límite de absorción en Fe_2O_3 es 56% (Díaz, 2008).

2.7. Balance de materiales

Se realizó un balance de materiales del proceso de biodigestión.

A. Proceso de biodigestión



Consumo de agua de un matadero 900 litro/cabeza (ganado mayor) y 250 litro/cabeza (porcino) R.247 INRH.

LODOS: Según SAGARPA (2013), señala que el 10% de la carga que entra diariamente al biodigestor, se convierte en lodo.

Densidad del lodo en el pretratamiento= 1003 kg/m^3 (Según Ferrer, 2008)

Datos:

PB (Producción de Biogás) =?

PB_{EV} (Producción de biogás de excreta vacuno) =?

PB_{AR} (PB de aguas residuales) =?

M_{EV} (Masa de excreta vacuno) =?

IB (Índice de Biogás) = $30 \text{ m}^3/\text{t}$

V_{AR} (Volumen de agua residual) =?

IB_{AR} (Índice de Biogás del agua de residual) = $ST \cdot Efic \text{ remoción} \cdot Q_{O\text{eliminación}} = 3,15$
 $m^3/día = 3,0996 \text{ t/día}$

Cant. excreta/animal = 10 kg animal/día

Cant. animal/día = 40

Vol. de H_2O /animal = 900 L

Densidad del lodo en el pretratamiento = 1003 kg/m^3

Densidad del biogás = 12 kg/m^3

Balance de Masa:

$PB = PBEV + PBAR$

$PB = 12 \text{ m}^3/día + 113 \text{ m}^3/día$

$PB = 125 \text{ m}^3/día$

$PBEV = MEV \cdot IB = 0,4 \text{ t/día} \cdot 30 \text{ m}^3/t = 12 \text{ m}^3/día$

$MEV = \text{Cant excreta/animal} \cdot \text{Cant animal/día}$

$MEV = 10 \text{ kg animal/día} \cdot 40 \text{ vacas} \cdot 1 \text{ t/1000 kg}$

$MEV = 0,4 \text{ t/día}$

$PBAR = VAR \cdot IBAR = 36 \text{ m}^3 \cdot 3,15 = 113 \text{ m}^3/día$

$VAR = \text{Vol de } H_2O/\text{animal} \cdot \text{Cant animal/día}$

$VAR = 900 \text{ L} \cdot 40 \text{ vacas} \cdot 1 \text{ m}^3/1000\text{L}$

$VAR = 36 \text{ m}^3$

Lodo = 10% del afluente = $0,1 \cdot 36,4 \text{ m}^3/día = 3,64 \text{ m}^3/día$

Conversión a Toneladas.

Afluente = $36,4 \text{ m}^3/día \sim 35,824 \text{ t/día}$

Lodo = $3,64 \text{ m}^3/día \cdot 1003 \text{ kg/m}^3 \cdot 1 \text{ t/1000kg} = 3,65 \text{ t/día}$

Biogás = $125 \text{ m}^3/día \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot 1\text{t/1000kg} = 0,15 \text{ t/día}$

Balance para el Efluente

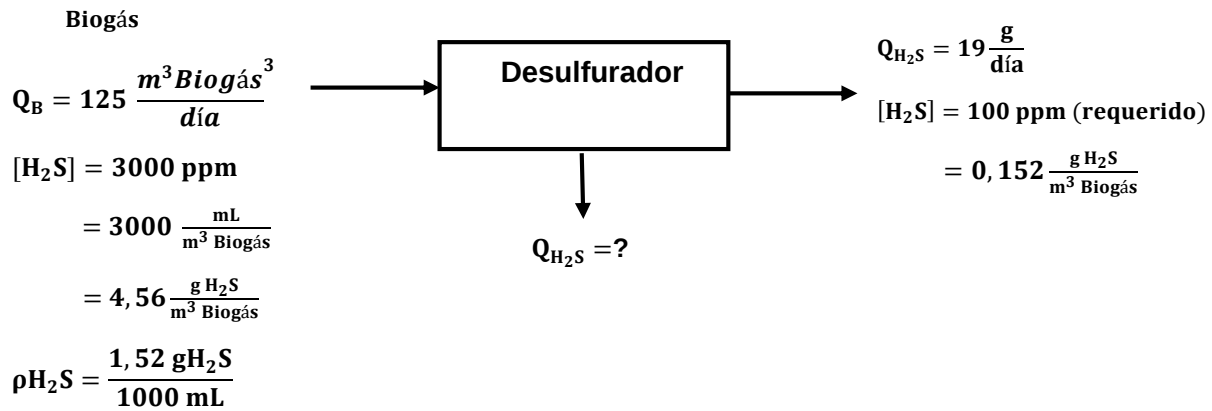
Efluente = Afluente – (toneladas de lodo + toneladas de biogás)

Efluente = $35,824 - (3,64 \text{ t/día} + 0,15 \text{ t/día})$

Efluente = $32,024 \text{ t/día} \sim 33 \text{ m}^3/día$

B. Etapa de desulfuración

Balance en el filtro para remover H_2S (g)



Entrada:

$$3000 \frac{mL H_2S}{m^3 \text{ Biogás}} * \frac{1,52 g H_2S}{1000 mL H_2S} = 4,56 \frac{g H_2S}{m^3 \text{ Biogás}}$$

Para $125 \frac{m^3 \text{ Biogás}}{\text{día}}$

$$Q_m(H_2S) = 125 \frac{m^3 \text{ Biogás}}{\text{día}} * 4,56 \frac{g H_2S}{m^3 \text{ Biogás}} = 570 \frac{g H_2S}{\text{día}}$$

Salida:

$$100 \frac{mL H_2S}{m^3 \text{ Biogás}} * \frac{1,52 g H_2S}{1000 mL H_2S} = 0,152 \frac{g H_2S}{m^3 \text{ Biogás}}$$

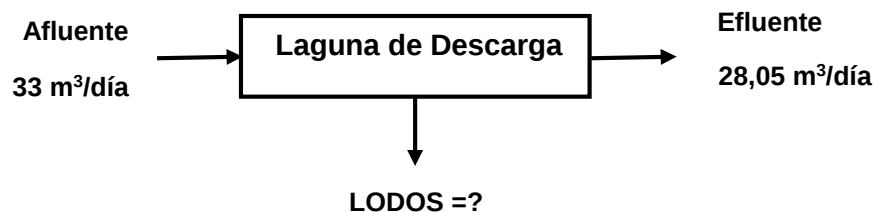
Para $125 \frac{m^3 \text{ Biogás}}{\text{día}}$

$$Q_m(H_2S) = 125 \frac{m^3 \text{ Biogás}}{\text{día}} * 0,152 \frac{g H_2S}{m^3 \text{ Biogás}} = 19 \frac{g H_2S}{\text{día}}$$

$$(Q_{H_2S})_{entra} - (Q_{H_2S})_{sale} = (Q_{H_2S})_{removido}$$

$$570 \frac{g H_2S}{\text{día}} - 19 \frac{g H_2S}{\text{día}} = 551 \frac{g H_2S}{\text{día}}$$

C. Laguna de descarga



LODOS: Según Romero (2008), señala que el 15% de la carga que entra diariamente al biodigestor, se convierte en lodo.

$$L = 33 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * 0,15 = 4,95 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \text{ de lodo}$$

Según Orozco (2005) la densidad del lodo es igual a $110 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$$L = 4,95 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \text{ de lodo} * 110 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 544,5 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \text{ de lodo}$$

2.8. Demanda energética a cubrir

Según la guía de planificación para proyectos de biogás en Chile (MINENERGÍA/GIZ, 2012) indica que 1 m³ de biogás con 60% CH₄ + 40% CO₂, equivale energéticamente a 0,6 litros de diésel. Entonces:

$$1\text{m}^3 \text{ biogás} \rightarrow 0,6 \text{ litros de diésel}$$

$$125 \text{ m}^3 \text{ biogás} \rightarrow x$$

$$x = 75 \text{ litros de diésel/día}$$

Por lo tanto, los 125 m³/día de metano, equivalen energéticamente a 75 litros de diésel/día. Al año se ahorran 27 375 litros de diésel.

2.9. Conclusiones parciales del capítulo

1. La propuesta tecnológica de un sistema de biodigestión para la obtención de biogás y tratamiento de las excretas y las aguas residuales generadas en el Matadero, se basan en un biodigestor de laguna tapada, con una alta eficiencia en la remoción de materia orgánica.
2. El diseño del sistema de biodigestión permitirá a la Empresa Pecuaria Managuaco, ampliar su matriz energética a partir del uso de la biomasa animal como fuente de energía renovable.

CAPÍTULO 3. FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN LA UEB COMERCIALIZADORA DE PRODUCTOS AGROPECUARIOS

3.1. Introducción

En el capítulo se desarrollan los aspectos técnicos, necesarios a tener en cuenta a la hora de determinar la factibilidad técnica y económica de la planta de producción de biogás, tipo laguna tapada, en la UEB Comercializadora de Productos Agropecuarios de la Empresa Pecuaria Managuaco en Sancti Spíritus y la valoración ambiental que supone su puesta en funcionamiento.

3.2. Estimación del costo de la inversión

La valoración económica es parte fundamental del Análisis Complejo de Procesos y en la mayoría de los casos es quien determina si se debe o no acometer una inversión. El análisis técnico-económico permite determinar si la inversión proyectada es capaz de satisfacer los requerimientos que la han originado y si la misma es factible económicamente, valorando objetivamente los resultados y determinando cuáles son los factores que más afectan su eficiencia económica.

Para realizar el análisis de los costos del equipamiento se utilizó la información disponible de las Solicitudes de Adquisición del proyecto FRE local, referidas a los costos reales en el año actual 2021.

Tabla 3.1: Inversión en equipamiento

Equipos y accesorios	Costos (USD)*
Geomembrana (468 m²)	7189,22
Geotextil (270 m²)	3506,67
Bobina de hilo (20)	1280,06
Filtros (2)	1130,00
Antorcha (1)	10 955,35
Bala (1)	5737,01
Agitadores (2)	24 860,00
TOTAL	54 658,31

*Ofertas de la Corporación Granda SA de CV, México, y Boitex, China. 2021

Para que una planta de biogás comience a operar regularmente, es necesario garantizar un alto capital para la compra del equipamiento requerido, su instalación, la adquisición del terreno donde se construirá la planta (si fuera necesario), así como las tuberías de proceso, servicios, etc.; así como para el pago de los gastos de operación iniciales. A este capital requerido para garantizar las necesidades de operación y las facilidades en planta, se denomina capital fijo de inversión y es necesario para los gastos de operación iniciales, capital de trabajo (Peters, 1991). La suma del capital fijo de inversión y el capital de trabajo, se conoce como costo de inversión total.

El costo de inversión requerido para la instalación de la planta de biogás, fue calculado por el método de Peters (1991). Se utilizó como referencia la oferta realizada por la Corporación Granda SA de CV (México) y Boitex (China) al proyecto FRE local de \$ 54 658,31 para el costo del equipamiento para un volumen total del biodigestor de 1747,2 m³. En la tabla 3.2 se muestra el desglose del capital total invertido en United States Dollars (USD).

Tabla 3.2 Costos directos e indirectos de inversión.

Costos Directos		
	% Costo IF	Costo (\$)
Costo adquisición del equipamiento		54 658,31
Costo instalación del equipamiento	35	19 130,4
Instalación instrumentación y control	6	3279,5
Tuberías	10	5465,83
Instalación eléctrica	8	4372,66
Preparación del terreno	2	1093,17
Requerimientos y servicios auxiliares	10	5465,83
Costo total (\$)		93 465,7
Costos indirectos		
	% Costo IF	Costo (\$)
Ingeniería y supervisión	5	2732,92
Gastos en construcción	7	3826,08

Contingencias	5%CFI	-----
Costo total (\$)		6559

Capital fijo invertido: CFI

$$\text{CFI} = \text{CD} + \text{CI}$$

$$= \$ 93\,465,7 + \$ 6559 + 5\% \text{CFI}$$

$$= \$ 100\,024,7 + 5\% \text{CFI}$$

$$\text{CFI} = \$ 105\,289,16$$

$$\text{Capital de trabajo} = 10\% \text{CTI}$$

Costo Total Invertido: CTI

$$\text{CTI} = \text{CFI} + 10\% \text{CTI}$$

$$\text{CTI} = \$ 116\,987,96$$

Costo de producción de la planta de Biogás

Costos directos: CD

$$\text{CD} = \Sigma (\text{mo} + \text{superv} + \text{utilid} + \text{mtto y reparaci} + \text{suministros})$$

1 - Utilidades

- Electricidad = 1148 \$/a

2- Mano de obra: M.O

- 1 operario = 1920 \$/a

$$3\text{-supervisiones} = 10\% \text{MO} = 192 \$/a$$

$$1\text{- Mantenimiento y reparación} = 2\% \text{CFI} = 2105,78 \$/a$$

$$2\text{- Suministros} = 10\% \text{ de mtto y reparac} = 210,58 \$/a$$

$$3\text{- Seguros e impuestos} = 1\% \text{CTP}$$

$$\text{CD} = 5576,36 \$/a + 1\% \text{CTP}$$

Cargos fijos: CF

$$1\text{- Depreciación} = 10\% \text{CFI} = \$ 10\,528,91$$

$$2\text{- Seguros} = 1\% \text{CFI} = \$ 1052,89$$

$$3\text{- Impuestos} = 0,4\% \text{CFI} = \$ 421,16$$

$$\text{CF} = \$ 12\,002,95$$

Costos Indirectos: CI

CI = 50% (MO+Supervis + Mtto)

CI = \$ 2108,89

Gastos Generales: G.G

1- Administración =15%(MO+ Supervis + Mtto)= \$ 632,667

2- Distribución y venta = 2%CTP

3- Investigación y desarrollo = 5%CTP

CTP = 22 087,89 \$/a

Costos Operacionales = CTP – Depreciación – Impuestos

CO = 22 087,89 - 10 528,92 – 421,16 = 11 137,81

Valor de producción del Biogás como sustituto del diésel:

VP = 27 375 litros/año * 0,961 \$/litros = \$ 26 307,38

Valor de producción del Digestato:

Digestato= 544,5 kg/día*365/1000= 198,74 t/año

VP = 198,74 t/año*120 \$/t = \$ 23 848,80

VP total = \$ 50 156,18

3.3. Análisis de los indicadores de eficiencia económica.

El análisis de rentabilidad de la inversión propuesta se realizan a través de los métodos dinámicos de análisis es decir por medio del cálculo del VAN y la TIR; para esto es necesario el valor de la inversión y el costo de producción para cada año de explotación de la planta, además se necesita conocer el tiempo de vida útil del proyecto, el capital disponible por la empresa, el préstamo que se obtiene del banco y el período en que se paga dicho préstamo, para lo que se propone una tasa de interés.

La vida útil para una planta de biogás se toma como 10 años. Se consideró que la empresa no cuenta con el capital para la inversión, el cual se obtendrá por un préstamo a pagar en un período de 4 años, según convenios, utilizándose una tasa de interés de un 12%. Con estos datos se calcula el valor que cada año debe regresar al banco (devolución financiera), a partir de la siguiente ecuación:

$$V_f = \frac{V_p (1+i)^n + i}{(1+i)^n - 1}$$

donde: V_f , devolución financiera; V_p , valor del préstamo; i , tasa de interés; n , años convenidos para el pago.

Este valor fluye en los flujos de caja de cada año del proyecto, hasta que se pague la suma total que constituye el préstamo.

El valor actual neto o valor capital de una inversión (VAN), es el valor actualizado de todos los flujos de cajas esperados, es decir, es igual a la diferencia entre el valor de los cobros menos el valor actualizado de los pagos, el mismo se calcula por la siguiente ecuación:

$$VAN = \sum_{i=1}^n \frac{F_{mi}}{(1+r)^i} - C_o$$

donde: C_o , costo inicial de la inversión o préstamo que se obtiene del banco; F_{mi} , flujo de caja neto correspondiente al año i ; r , tasa de interés; n , número de años

En términos absolutos, se podrá afirmar que un proyecto tiene que tener valor actual neto positivo para ser deseable, siendo la variante que tenga mayor VAN la preferible.

La tasa de rendimiento interno (TIR) es el tipo de descuento que hace equivalente los valores actuales de los flujos netos y el costo de inversión. Se trata de hallar el valor de r para el cual se cumple que:

$$VAN = \sum_{i=1}^n \frac{F_{mi}}{(1+r)^i} - C_o = 0$$

donde: r , es el tipo de rendimiento interno en %.

Si $TIR >$ tasa de descuento, es favorable hacer el proyecto.

Si $TIR <$ tasa de descuento, no es favorable.

Si $TIR =$ tasa de descuento, es indiferente.

Mediante una Hoja de cálculo del programa Microsoft Excel (Ver Anexo 2) se calcularon esos indicadores financieros, obteniéndose los siguientes resultados:

VAN = \$ 5920,22

TIR = 13%

PRD = 6,5 años

De acuerdo a estos valores, como se puede observar la inversión en una Planta para la producción de biogás en la Empresa Pecuaria Managuaco se justifica y contribuiría a la

diversificación de su matriz energética mediante el uso de la biomasa como fuente de energía renovable.

3.4. Análisis Ambiental del tratamiento de los residuales provenientes del biodigestor.

El biodigestor diseñado tiene una capacidad total de digestión de 1747,2 m³ y generará producciones de 125 m³/día de biogás, que se utilizarán en la cocción de los alimentos para un comedor obrero, en la generación de energía para cubrir la limpieza, el procesamiento de la carne, y la elaboración de productos derivados como los embutidos. También, el biodigestor producirá 3,25 t/día de digestato que puede ser convertido en bioabono y empleado para la mejora de la fertilidad de 928 ha de suelos de la Empresa Pecuaria Managuaco dedicados a la producción de cultivos varios.

El biodigestor producirá biogás con un contenido de energía en 1 m³ de biogás (60% CH₄ y 40% CO₂) que resulta aproximadamente 6 kWh/m³ según Hilbert (2003). Además, permitirá reducir la emisión descontrolada de metano proveniente de la ganadería y la concentración de CO₂ en la atmósfera –ambos, gases de efecto invernadero–, la emisión de óxido nitroso y amoníaco al aplicar como bioabono los efluentes del biodigestor, y los contaminantes orgánicos presentes en los estiércoles, al ser descompuestos en la digestión anaerobia. Asimismo, cada 380 L de metano (CH₄), formados en un digestor de biogás a presión de una atmósfera y 25 °C de temperatura, se reduce la carga contaminante en 1 kg de demanda química de oxígeno (DQO) (Cepero et al., 2012).

En este sentido, se logrará eliminar, mediante la construcción del biodigestor, la contaminación generada por las excretas vacunas, lo cual generará un impacto ambiental positivo, incrementado con la utilización de sus efluentes como bioabonos.

Para la determinación de las emisiones resultantes de la gestión del ganado y del estiércol se utilizaron los índices propuestos en las directrices del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, citado por López-González et al. (2019). Los factores se muestran en la Tabla 3.3.

Las emisiones de CO₂ provocadas por el ganado no se estiman porque se supone que las emisiones anuales netas de CO₂ equivalen a cero, el CO₂ de la fotosíntesis de los vegetales se devuelve a la atmósfera como CO₂ respirado (IPCC, 2006)

La producción de ganado puede traer como resultado emisiones de metano (CH_4) resultante de la fermentación entérica y emisiones de CH_4 y de óxido nitroso (N_2O) de los sistemas de gestión del estiércol del ganado. Las emisiones de óxido nitroso resultantes de la gestión del estiércol varían significativamente entre los tipos de sistemas de gestión utilizados y, además, pueden provocar emisiones indirectas debidas a otras formas de pérdida de nitrógeno del sistema.

-Emisiones de CH_4 : Incluyen las emisiones de CH_4 entérico y las emisiones por la gestión del estiércol.

Emisiones de CH_4 entérico: Las emisiones de CH_4 entérico se producen como resultado de la fermentación de los componentes de la dieta. La mayor producción de CH_4 por fermentación ocurre en el retículo-rumen (85-90%), y es expulsado principalmente por eructación; en tanto que la mayoría del CH_4 que surge de la fermentación en el intestino grueso es absorbido en la sangre y exhalado con los gases respiratorios, de manera que los flatos presentan menos del 2% de la fermentación entérica total.

Emisiones por la gestión del estiércol: Se consideran las emisiones durante deposiciones que realizan los animales a campo para el caso del vacuno, y de acuerdo a su manejo y disposición para el estiércol.

-Emisiones de N_2O : Se consideraron las emisiones por almacenaje de sólidos para el residuo vacuno.

Almacenaje de sólidos: Almacenamiento de estiércol, habitualmente por períodos de varios meses, en pilas no confinadas.

Tabla 3.3. Factores de emisión

Tipo de emisión	Factor de emisión	Referencia
Emisiones de CH_4		
Gestión del estiércol vacuno lechero	0,1 m ³ CH_4 /kg SV	IPCC 2006
Emisión por fermentación entérica del estiércol vacuno lechero	64 kg CH_4 /cabeza/año	IPCC 2006
Emisiones de N_2O		

Gestión del estiércol vacuno lechero (Almacenaje de sólidos)	0,005 kg N ₂ O/kg Nexcretado	IPCC 2006
--	---	-----------

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se exponen los cálculos que representan la cantidad de emisiones reducidas o dejadas de emitirse a la atmósfera con el empleo del biodigestor:

Emisiones de CH₄ por gestión del estiércol vacuno lechero

$$120\,000 \frac{\text{kgexct}}{\text{año}} * 16 \% \text{SV} = 19\,200 \frac{\text{kgSV}}{\text{año}}$$

$$19\,200 \frac{\text{kgSV}}{\text{año}} * 0,1 \frac{\text{m}^3 \text{CH}_4}{\text{kgSV}} = 1920 \frac{\text{m}^3 \text{CH}_4}{\text{año}} = 1261,44 \frac{\text{kgCH}_4}{\text{año}}$$

Emisión por fermentación entérica del estiércol vacuno lechero

$$64 \frac{\text{kgCH}_4}{\text{cabz/año}} * 40 \text{ cabezas} = 2560 \frac{\text{kgCH}_4}{\text{año}}$$

Emisiones de N₂O por gestión del estiércol vacuno lechero

$$0,005 \frac{\text{kgN}_2\text{O}}{\text{kg Nexcretado}} * 120\,000 \frac{\text{kgexct}}{\text{año}} * 1,5 = 900 \frac{\text{kgN}_2\text{O}}{\text{año}}$$

Como se puede apreciar en los cálculos anteriores mediante la digestión anaerobia se evitan las emisiones de metano a la atmósfera, en el orden de 1261,44 kgCH₄/año, así como 900 kgN₂O/año, contribuyendo a la disminución de los efectos ambientales de estos gases de efecto invernadero.

También, es importante recordar que las trazas de sulfuro de hidrógeno (H₂S) que contiene el biogás y que le confieren el desagradable olor a desagüe, serán eliminadas de su corriente antes de emplearlo como combustible; para ello se hará pasar el flujo de biogás a través de un filtro relleno con virutas de hierro tratadas, provenientes de los talleres de maquinado, como fue explicado en el capítulo 2.

Una de las razones por las que es necesaria la eliminación del H₂S es el carácter corrosivo de los equipos de metal, especialmente en las condiciones de alta temperatura y presión (por ejemplo, con acero el nivel erosivo de H₂S es 2,5 mm/año).

CONCLUSIONES GENERALES

1.- La producción de biogás en el Matadero de la Empresa Pecuaria Managuaco, es una opción real que permite utilizar una fuente de energía renovable, como lo es la biomasa, para diferentes usos energéticos (cocción de alimentos, limpieza y desinfección, usos en el proceso productivo, etc.), permitiendo diversificar la matriz energética de esta importante empresa de la provincia de Sancti Spíritus.

2.- La construcción de una laguna tapada para la producción de biogás, mediante la construcción de un biodigestor híbrido cubano, con cubierta de Polietileno de Alta Densidad (PEAD), es una solución novedosa que permitirá ahorrar materiales de construcción deficitarios en el país, tales como las cabillas corrugadas, cemento y áridos.

3.- El proceso de producción de biogás y bioabono en el Matadero de la Empresa Pecuaria Managuaco, es factible desde el punto de vista económico, obteniéndose valores del **VAN** = \$ 5920,22, una **TIR** = 13% y un **PRD** = 6,5 años, valores favorables todos, que, aunque bajos, se justifican por el bajo nivel del capital invertido, así como el nivel de ingresos, avalados lo anterior por la producción de sólo 125 m³/día.

4.- Mediante la digestión anaerobia de los residuales del Matadero, se evitan las emisiones de metano a la atmósfera, en el orden de $1261,44 \frac{\text{kgCH}_4}{\text{año}}$, así como $900 \frac{\text{kgN}_2\text{O}}{\text{año}}$, contribuyendo a la disminución de los impactos ambientales de estos gases de efecto invernadero.

RECOMENDACIONES

- Darle mantenimiento a la cámara de rejillas para que de esta manera se evite la acumulación de sólidos impidiendo el correcto funcionamiento de la planta de obtención de biogás
- Cuando se realice la limpieza de los lodos que se encuentran al fondo del biodigestor, estos sean vertidos a un lecho de secado de lodos, para que puedan ser tratados y obtener así un excelente bioabono para su uso en la empresa o para la venta a otras entidades del territorio.
- Regular el consumo de agua destinada para la limpieza de los pisos de las diferentes áreas productivas del matadero.
- Cubrir el tanque de alimentación con un techo de protección, ya que si entra agua de lluvia al biodigestor se puede inhibir el proceso de producción de biogás.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARBOLEDA, J. A. 2008. *Manual de evaluación de impacto ambiental de proyectos, obras y actividades*.
- ARROQUI VIDARRUETA, C. 2011. Criterios generales para una gestión sostenible del agua en la industria agroalimentaria. *In: ESPAÑA (ed.)*.
- BECERRA ACUÑA, E. R. 2016. *Evaluación de Producción más Limpia en el área de matadero de la Empresa Cárnica Cienfuegos*. Tesis de Maestría, Universidad de Cienfuegos.
- BLANCO, D., MARTÍN, G., CEPERO, L., PIÑÓN, M. & SUÁREZ, J. 2012. *Manual de diseño, montaje y operación de digestores plásticos de bajo costo. Una alternativa para Cuba*.
- BLANCO, D., SUÁREZ, J., JIMÉNEZ, J., GONZÁLEZ, F., ÁLVAREZ, L. M., CABEZA, E. & VERDE, J. 2015. Eficiencia del tratamiento de residuales porcinos en digestores de laguna tapada. *Pastos y Forrajes*, 38, núm. 4, octubre-diciembre, 441-447.
- BONGIORNO, M. 2010. *Buenas Prácticas Ambientales en la Industria Cárnica*. [Online]. [Accessed www.produccion-animal.com.ar].
- BONMANTI, A, FLOTATS, X, MATEN, L & CAMPOS, E 2001. Study of thermal hidrolisis as a pretreatment to mesophilic anaerobic digestion of pig slurry. *Water Science and Technology*, 4, 109-116.
- CANALES CANALES, C. 2005. *Guía de Mejores Técnicas*. España: Centro de Publicaciones, Ministerio de Medio Ambiente.
- CÁRCEL, F. J. & GRAU C, J. 2014. THE EFFICIENT USE OF WATER RESOURCES IN THE MEAT INDUSTRY. *3C Tecnología*, Diciembre '14 - marzo'15, 2014.
- CASANOVAS, G., VECCHIA, F. D., REYMUNDO, F. & SERAFINI, R. 2019. *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores. Colección Documentos Técnicos N° 12*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Buenos Aires, Argentina.
- CEPERO, L., SAVRAN, V., BLANCO, D., DÍAZ PIÑÓN, M. R., SUÁREZ, J. & PALACIOS, A. 2012. Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores. *Pastos y Forrajes*, 35, No. 2, abril-junio, 219-226.

COMANDO SULUDA, A. I. 2006. *Optimación del compostaje de residuos sólidos urbanos en proceso de serie anaerobio-aerobio*. Caminos.

CRUZ MORALES, Z. 2019. *Evaluación de producción más limpia del ciclo del agua en la Empresa Cárnica Cienfuegos (ECC)*. Tesis Maestría en Producción Más Limpia, Universidad de Cienfuegos

CUBAENERGÍA. 2019. *Estadísticas Energéticas* [Online]. [Accessed <https://www.cubaenergia.cu/estadisticas-energeticas>].

CHAUX, G., ROJAS, G. L. & BOLAÑOS, L. 2009. Producción más limpia y viabilidad de tratamiento biológico para efluentes de mataderos.

ELÉCTRICA, U. 2019. Programa General para el Desarrollo local en el uso del BIOGÁS como fuente energética y de disminución de la Contaminación Ambiental en Sancti Spíritus. OBE Sancti Spíritus. Cuba.

ENVITECH, C. 2015. *Tratamiento de emulsiones y aguas residuales aceitosas*.

FEDAILAINE, M., MOUSSI, K., KHITOUS, M. & ABADA., S. 2015. Modeling of the anaerobic digestion of organic waste for biogas production. *Procedia Computer Science* N.º 52. .

FLOTATS, X., BONMATÍ, A., CAMPOS, E. & ANTÚNEZ, M. 1997. Codigestión anaerobia termofílica de purines de cerdo y lodos de planta depuradora de aguas residuales, (Anaerobic thermophilic co-digestion of pig manure and sewage sludge from municipal wastewater plants), V Congreso de Ingeniería Ambiental PROMA'97. Bilbao.

GUARDADO, J. A. 2011. Remoción de barreras con biogás. *CUBASOLAR, Cuba*.

GUARDADO, J. A. El uso de biodigestores de cúpula fija en el tratamiento de residuales porcinos. Experiencias y lecciones aprendidas en Cuba. Taller Transferencia de tecnología para el tratamiento anaeróbico de pequeñas y medianas instalaciones porcinas, 2013. La Habana, PNUD.

ININ, O. N. D. N. 2012. Vertimiento de Aguas Residuales a las Aguas Terrestres y al Alcantarillado. Especificaciones.

INRH, I. N. D. R. H. 2013. Determinación de la demanda de agua potable

LEIS, S., DRESCH, P., PEINTNER, U., FLIEGEROVÁ, K., SANDBICHLER, A. M., INSAM, H. & PODMIRSEG, S. M. 2014. Finding a robust strain for biomethanation:

anaerobic fungi (Neocallimastigomycota) from the Alpine ibex (*Capra ibex*) and their associated methanogens. *Anaerobe*, 29, 34-43.

LÓPEZ-LÓPEZ, A. 2007a. Proyecto ejecutivo diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para rastro municipal. Clave proyecto: GTO-2005-CO2-62: Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. (CIATEJ). Guadalajara, Jal., Méx.

LÓPEZ-LÓPEZ, A., VALLEJO-RODRÍGUEZ, R. & MÉNDEZ-ROMERO, D.-C. 2010. Evaluation of a combined anaerobic and aerobic system for the treatment of slaughterhouse wastewater. *Environ. Technol*, 31, 319-326.

LÓPEZ NAVAJA, R. 2015. *Diseño de un Sistema de tratamiento de agua de una Industria Cárnica*. Tesis de Maestría, Universidad de Carlos III. Madrid, España.

MANAGUACO, E. P. D. 2021. Estrategia de Desarrollo de la UEB Comercializadora de Productos Agropecuarios. Empresa Pecuaria Managuaco. Sancti Spíritus

MINENERGÍA/GIZ, P. E. R. N. C. 2012. Guía de planificación para proyectos de biogás en Chile. *In*: CHILE, M. D. E. (ed.).

MONCAYO, G. 2014. Manual de dimensionamiento y diseño de biodigestores industriales para clima tropical. Biodigestores tropicalizados *In*: ALEMANIA, A. E.

MUÑOZ MUÑOZ, D. 2005. Sistema de tratamiento de aguas residuales de matadero. *Proceso y Energía*, 12.

NAKASIMA LÓPEZ, M. O., VELÁZQUEZ LIMÓN, N. & OJEDA BENÍTEZ, S. 2011. Tecnologías para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos del sector residencial y su aprovechamiento como fuente de energía.

NIELSEN, H., UELLEND AHL, H. & AHRING, B. 2007. Regulation and optimization of the biogas process: Propionate as a key parameter. *Biomass and Bioenergy*, 31 (11-12), 820-830.

NOA-ORTIZ, D., MONTERO-LAURENCIO, R., LABRADA-SANTOS, E. P. & COLUMBIE-SUAREZ, K. 2021. Perspectivas sostenibles de las fuentes renovables de energía en comunidades rurales aisladas. *Ciencia & Futuro*, 11, 82-100.

OLADE 2021. Situación del consumo energético a nivel mundial para América Latina y el Caribe y sus perspectivas.

PAIVA, P. F. 2016. *Propuesta de aprovechamiento del biogás obtenido a partir del tratamiento de las aguas residuales generadas en la empresa Rico Cerdo f&g S.A.C., para su uso como biocombustible en los sistemas de calefacción de las áreas de maternidad*. Trabajo de Diploma, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo

PORTILLO, S. N. 2014. Tratamiento de Efluentes Líquidos en la Industria Frigorífica. *Universidad Nacional de la Plata. Argentina*.

RÍOS V., M. & RAMÍREZ H., L. 2012. Aprovechamiento del contenido ruminal bovino para ceba cunícola, como estrategia para diezmar la contaminación generada por el matadero en San Alberto. *Prospect*, Vol. 10, No. 2, 56-63.

RIVERO MUÑIZ, S. 2013. *Rediseño del Sistema de Tratamiento de los Residuales Líquidos en el Matadero-Empacadora de la Empresa Pecuaria Macún*. Tesis de Maestría en Saneamiento Ambiental, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

RUJAS, N. M. & ROMERO, F. A. Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos:[1]. Los objetivos de desarrollo sostenible en la ciudad de Burgos, 2021. Universidad de Burgos, 251-254.

SAGARPA 2013. Especificaciones técnicas para biodigestores pequeños tipo laguna. México. Firco.

SALAS C., G. & CONDORHUAMÁN C., C. 2008. Tratamiento de las aguas residuales de un centro de beneficio o matadero de ganado. *Per. Quím. ing. Quím.*, vol. 11 n.º 1, 29-35.

SPÍRITUS, I. I. M. D. S. 2021. *Clima Sancti Spíritus. Cuba*. <https://es.climater-data.org> [Online]. [Accessed].

VALLEJO RODRÍGUEZ, R., LÓPEZ, A. L. & VÁLDEZ, J. G. 2019. Manejo integral de efluentes residuales generados en los rastros municipales. *In: A.C., C. D. I. Y. A. E. T. Y. D. D. E. D. J. (ed.) Primera edición: Diciembre 2019 ed.*

VEALL, F. 1997. Estructura y funcionamiento de los mataderos medianos en los países en desarrollo. *Producción y Sanidad animal*. Estudio FAO, Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

VEEKEN, A. & SANDERS, W. 2002. Analysis and optimization of the Anaerobic Digestion Of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste. USA.

VEGA, R. 2010. *Tecnologías de Tratamiento de agua para su Reutilización*.

- s/f. Manual de Construcción y Operación de Planta de Biogás del Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial.
- ARROQUI, C. 2011. Criterios generales para una gestión sostenible del agua en la industria agroalimentaria. In: ESPAÑA (ed.).
- BECERRA, E. R. 2016. *Evaluación de Producción más Limpia en el área de matadero de la Empresa Cárnica Cienfuegos*. Tesis de Maestría, Universidad de Cienfuegos.
- BLANCO, D., MARTÍN, G., CEPERO, L., PIÑÓN, M. & SUÁREZ, J. 2012. *Manual de diseño, montaje y operación de digestores plásticos de bajo costo. Una alternativa para Cuba*.
- BLANCO, D., SUÁREZ, J., JIMÉNEZ, J., GONZÁLEZ, F., ÁLVAREZ, L. M., CABEZA, E. & VERDE, J. 2015. Eficiencia del tratamiento de residuales porcinos en digestores de laguna tapada
- Pastos y Forrajes*, 38, núm. 4, octubre-diciembre, 441-447.
- BONGIORNO, M. 2010. *Buenas Practicas Ambientales en la Industria Cárnica*. [Online]. [Accessed www.produccion-animal.com.ar].
- BONMANTI, A., FLOTATS, X., MATEN, L. & CAMPOS, E. 2001. Study of thermal hidrolisis as a pretreatment to mesophilic anaerobic digestion of pig slurry. *Water Science and Technology*, 4, 109-116.
- CANALES, C. 2005. Guía de Mejores Técnicas. España: Centro de Publicaciones, Ministerio de Medio Ambiente.
- CÁRCEL, F. J. & GRAU C, J. 2014. THE EFFICIENT USE OF WATER RESOURCES IN THE MEAT INDUSTRY. . *3C Tecnología*, Diciembre '14 - marzo'15 2014.
- CASANOVAS, G., DELLA VECCHIA, F., REYMUNDO, F. & SERAFINI, R. 2019. Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores. *Colección Documentos Técnicos N° 12*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
- Buenos Aires, Argentina.
- CEPERO, L., SAVRAN, V., BLANCO, D., DÍAZ PIÑÓN, M. R., SUÁREZ, J. & PALACIOS, A. 2012. Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores. *Pastos y Forrajes*, 35, No. 2, abril-junio, 219-226.
- CRUZ, Z. 2019. *Evaluación de producción más limpia del ciclo del agua en la Empresa Cárnica Cienfuegos (ECC)*. Tesis Maestría en Producción Más Limpia, Universidad de Cienfuegos
- CUBAENERGÍA. 2019. *Estadísticas Energéticas* [Online]. [Accessed <https://www.cubaenergia.cu/estadisticas-energeticas>].
- CHAUX, G., ROJAS, G. L. & BOLAÑOS, L. 2009. Producción más limpia y viabilidad de tratamiento biológico para efluentes de mataderos.
- DÍAZ, M. R. 2008. Eliminación de H₂S en biogás. Caracterización, métodos y procedimientos. Grupo Provincial de Biogás, Las Tunas, Cuba. 12 p.

- ENVITECH, C. 2015. *Tratamiento de emulsiones y aguas residuales aceitosas*.
- FEDAILAINE, M., MOUSSI, K., KHITOUS, M. & ABADA, S. 2015. Modeling of the anaerobic digestion of organic waste for biogas production. *Procedia Computer Science* N.º 52. .
- FERRERO, J. C., BARGIELA, M., FERNÁNDEZ, G., RENDINA, A. E. & DE IORIO, A. F. Estimación del efecto de inhibidores para la producción de biogás a partir de desechos sólidos urbanos. *In: ALFONSO, M. A. D. S. & TORRES, M., eds. V Congreso Iberoamericano de física y química ambiental*
- 2008 Buenos Aires. Universidad Nacional de Gral. San Martín.
- FLOTATS, X., BONMATÍ, A., CAMPOS, E. & ANTÚNEZ, M. 1997. Codigestión anaerobia termofílica de purines de cerdo y lodos de planta depuradora de aguas residuales, (Anaerobic thermophilic co-digestion of pig manure and sewage sludge from municipal wastewater plants), V Congreso de Ingeniería Ambiental PROMA'97. Bilbao.
- GUARDADO, J. A. 2011. Remoción de barreras con biogás. *CUBASOLAR, Cuba*.
- GUARDADO, J. A. El uso de biodigestores de cúpula fija en el tratamiento de residuales porcinos. Experiencias y lecciones aprendidas en Cuba. Taller Transferencia de tecnología para el tratamiento anaeróbico de pequeñas y medianas instalaciones porcinas, 2013 La Habana. PNUD,.
- HILBERT, J. A. 2003. Manual para la producción de biogás. Instituto de Ingeniería Rural, INTA Castelar, Morón, Argentina. 54 p.
- INRH, I. N. D. R. H. 2013. Determinación de la demanda de agua potable
- IPCC, H. D. C., JOE MANGINO (ESTADOS UNIDOS) Y TIM A. MCALLISTER (CANADÁ) 2006. EMISIONES RESULTANTES DE LA GESTIÓN DEL GANADO Y DEL ESTIÉRCOL.
- LEIS, S., DRESCH, P., PEINTNER, U., FLIEGEROVÁ, K., SANDBICHLER, A. M., INSAM, H. & PODMIRSEG, S. M. 2014. Finding a robust strain for biomethanation: anaerobic fungi (Neocallimastigomycota) from the Alpine ibex (*Capra ibex*) and their associated methanogens. *Anaerobe*, 29, 34-43.
- LOCAL, F. 2019. Proyecto Fuentes Renovables de Energía como apoyo al Desarrollo Local. Project_ID = 00098897 / Output_ID = 00102087. .
- LÓPEZ-GONZÁLEZ, L. M., RUIZ-MANSO, J. M., CONTRERAS-VELÁSQUEZ, L. M., PEDRAZA-GARCIGA, J. P. & HERMIDA-GARCÍA, O. 2019. Codigestión anaerobia del residuo del secado del arroz y excreta porcina en sistema discontinuo *Revista Tecnología Química*, 39 (2),, 286-300.
- LÓPEZ-LÓPEZ, A. 2007. Proyecto ejecutivo diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para rastro municipal, . Clave proyecto: GTO-2005-CO2-62: Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. (CIATEJ). Guadalajara, Jal., Méx.
- LÓPEZ-LÓPEZ, A., VALLEJO, R. & MÉNDEZ, D. C. 2010. Evaluation of a combined anaerobic and aerobic system for the treatment of slaughterhouse wastewater. *Environ. Technol*, 31, 319-326.
- LÓPEZ NAVAJA, R. 2015. *Diseño de un Sistema de tratamiento de agua de una Industria Carnica*. . Tesis de Maestría, Universidad de Carlos II. Madrid.

- MANAGUACO, E. P. D. 2021. Extrategia de Desarrollo de la UEB Comercializadora de Productos Agropecuarios. Empresa Pecuaria de Managuaco. Sancti Spíritus
- MINENERGÍA/GIZ, P. E. R. N. C. 2012. Guía de planificación para proyectos de biogás en Chile. *In: CHILE, M. D. E. (ed.)*.
- MONCAYO, G. 2014. Manual de dimensionamiento y diseño de biodigestores industriales para clima tropical. Biodigestores tropicalizados *In: ALEMANIA, A. E. (ed.)*.
- MUÑOZ, D. 2005. Sistema de tratamiento de aguas residuales de matadero. *Proceso y Energía*, 12.
- NAKASIMA, M. O., VELÁZQUEZ, N. & OJEDA, S. 2011. Tecnologías para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos del sector residencial y su aprovechamiento como fuente de energía.
- NIELSEN, H., UELLEND AHL, H. & AHRING, B. 2007. Regulation and optimization of the biogas process: Propionate as a key parameter. *Biomass and Bioenergy*, 31 (11-12), 820-830.
- NOA, D., MONTERO, R., LABRADA, E. & COLUMBIE, K. 2021. Perspectivas sostenibles de las fuentes renovables de energía en comunidades rurales aisladas. *Ciencia & Futuro*, 11, 82-100.
- NORMALIZACIÓN, O. N. D. 2012. Vertimiento de Agua Residuales a las Aguas Terrestres y al Alcantarillado. Especificaciones.
- OLADE 2021. Situación del consumo energético a nivel mundial para América Latina y el Caribe y sus perspectivas.
- PAIVA, P. F. 2016. *Propuesta de aprovechamiento del biogás obtenido a partir del tratamiento de las aguas residuales generadas en la empresa rico cerdo f&g s.a.c., para su uso como biocombustible en los sistemas de calefacción de las áreas de maternidad*. Trabajo de Diploma, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
- PCC 2017. Bases del Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta el 2030: Visión de la Nación, Ejes y Sectores Estratégicos. *Documentos del 7mo Congreso del Partido aprobados por el III Pleno del Comité Central del PCC el 18 de mayo de 2017 y respaldados por la Asamblea Nacional del Poder Popular el 1 de junio de 2017, Parte I*. [http:// www.oneplanetnetwork.org](http://www.oneplanetnetwork.org)
- POPULAR, A. N. D. P. 2019. Constitución de la República de Cuba. La Habana: Asamblea Nacional. Disponible en: <http://media.cubadebate.cu/wp-content/uploads/2019/01/Constitucion-Cuba-2019.pdf>. Cuba.
- PORTILLO, S. N. 2014. Tratamiento de Efluentes Líquidos en la Industria Frigorífica. *Universidad Nacional de la Plata*.
- RÍOS V., M. & RAMÍREZ H., L. 2012. Aprovechamiento del contenido ruminal bovino para cebs cunicolas, como estrategia para diezmar la contaminación generada por el matadero en San Alberto. *Prospect*, Vol. 10, No. 2, 56-63.
- RIVERO, S. 2013. *Rediseño del Sistema de Tratamiento de los Residuales Líquidos en el Matadero-Empacadora de la Empresa Pecuaria Macún*. Tesis de Maestría en Saneamiento Ambiental, UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS.

- RUJAS, N. & ROMERO, F. Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos:[1]. Los objetivos de desarrollo sostenible en la ciudad de Burgos, 2021. Universidad de Burgos, 251-254.
- SAAVEDRA, R., ALAMO, M. A. & MARCELO, M. D. Diseño de un biodigestor tubular para zonas rurales de la región Piura. XXIV Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XXIV-SPES), 2017 Huaraz.
- SAGARPA 2013. Especificaciones técnicas para biodigestores pequeños tipo laguna. México. Firco.
- SALAS C., G. & CONDORHUAMÁN C., C. 2008. Tratamiento de las aguas residuales de un centro de beneficio o matadero de ganado. *Per. Quím. ing. Quím.*, vol. 11 n.º 1, 29-35.
- SPÍRITUS, I. M. D. S. 2021. *Clima Sancti Spíritus. Cuba*. <https://es.climater-data.org> [Online]. [Accessed].
- SULUDA, C. & INÁCIO, A. 2006. *Optimación del compostaje de residuos sólidos urbanos en proceso de serie anaerobio-aerobio*. Caminos.
- UNE, U. E. 2019. Programa General para el Desarrollo local en el uso del BIOGÁS como fuente energética y de disminución de la Contaminación Ambiental en Sancti Spíritus. . OBE Sancti Spíritus. Cuba.
- VALLEJO, R., LÓPEZ, A. & GALLARDO, J. 2019. Manejo integral de efluentes residuales generados en los rastros municipales. *In: A.C., C. D. I. Y. A. E. T. Y. D. D. E. D. J. (ed.) Primera edición: Diciembre 2019 ed.*
- VEALL, F. 1997. Estructura y funcionamiento de los mataderos medianos en los países en desarrollo. *Producción y Sanidad animal*. . Estudio FAO, Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- VEEKEN, A. & SANDERS, W. 2002. Analysis and optimization of the Anaerobic Digestion Of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste. USA.
- VEGA, R. 2010. *Tecnologías de Tratamiento de agua para su Reutilización*.

ANEXO 1

Tabla 1.1. Ejemplo de inhibidores y concentraciones inhibidoras.

Inhibidores	Concentración inhibidora
SO ₄	5000 ppm
NaCl	40 000 ppm
Nitrato	0,05 mg/ml
Cu	100 mg/ml
Cr	200 mg/ml
Ni	200 - 500 mg/ml
CN	25 mg/ml
ABS (detergente sintético)	20 - 40 mg/ml

Na	3500 – 5500 mg/ml
K	2500 – 4500 mg/ml
Ca	2500 – 4500 mg/ml
Mg	1000 – 1500 mg/ml

Fuente: Tomado de Ferrero et al. (2008)

ANEXO 2

Tabla 1.2. Intervalo de temperaturas en el que trabajan las bacterias anaerobias.

Bacterias	Rango de Temperaturas			Tiempo de retención (días)	Sensibilidad
	Mínimo	Óptimo	Máximo		
Psicrofílicas	4-10	15-18	25-30	>100	±2 °C/hora
Mesofílicas	15-20	28-33	35-45	30-60	±1 °C/hora
Termofílicas	25-45	50-60	75-80	10-16	±0,5 °C/hora

Fuente: (Suluda and Inácio, 2006)

ANEXO 3

Tabla 1.3. Valores típicos de parámetros del grado de contaminación en aguas residuales de industrias cárnicas a criterio de diferentes autores.

Autores	López, 2015	Condorchen Envitech, 2015	Rivero, 2013	Bongiorno, et.al, 2010	Chauxt, et.al, 2009	Muñoz, 2005
Parámetros	Valores típicos					
DQO (mg/L)	4200-8500	1000-35000	2938	2500-3000	3500-12000	1500
DBO (mg/L)	1600-3000	600-5500	1750	1000-1500	1200-7000	838
SS (mg/L)	1300-3400	300-5000	647	1400-1600	700-3000	-
A&G (mg/L)	100-200	60-1500	28	-	500-1500	108

N _T (mg/L)	50-110	50-750	73	-	-	145
F _T (mg/L)	20-30	15-80	29	-	-	-
pH	-	-		7-8	6-8,5	7
pH	-	-		7-8	6-8,5	7

Fuente: Tomado de (Cruz, 2019)

ANEXO 4

Tabla 1.4. Valores típicos de parámetros del grado de contaminación en aguas residuales de industrias cárnicas, según Cruz Morales.

Parámetros	Valores Típicos	Valores Promedio
DQO (mg/L)	1000 – 35 000	5215
DBO5 (mg/L)	600 - 7000	2165
Sólidos en Suspensión (mg/L)	300 - 5000	1770
Grasas y aceites (mg/L)	25 - 1500	235
Nitrógeno total (mg/L)	50 - 750	310
Fosfato total (mg/L)	15 - 80	30
pH	6 – 8,5	7

Fuente: Tomado de (Cruz, 2019)

ANEXO 5

Tabla 1.5. Valores del grado de contaminación en dependencia del peso de las bandas.

Matadero Vacuno			
Contaminante	Agua Vertida L/t cana	Emisión kg/t canal	Factor Emisión mg/L
DQO	4000 - 8000	4,0-40	500-1000
NT		0,172 - 1,84	21,5 - 460
PT		0,025 - 0,26	3,12 - 65

Fuente: (Cruz, 2019)

ANEXO 6

Tabla 1.6. Límites máximos permisibles de parámetros del grado de contaminación de las aguas residuales de industrias cárnicas en Cuba.

Parámetros	DQO (mg/L)	DBO5 (mg/L)	Grasas y aceites (mg/L)	pH	Sólidos Sedimentables (mg/L)	Conductividad	Temperatura
	< 700	< 300	< 50	6 - 9	< 10	< 4000	< 50

Fuente: (Normalización, 2012)

ANEXO 7. Ver adjunto excel