

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIE
Facultad de
Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética

TRABAJO DE DIPLOMA

Estudio exploratorio sobre la generación de biogás a partir de las excretas del ganado y de la generación eléctrica con biogás y su posible utilización en la Empresa Pecuaria Managuaco

Autor: Marcos Ernesto Iriondo Pérez

Tutor: M.Sc. Luis Alberto Hernández Lugones
Dr.C Julio Pedraza Gárciga

Santa Clara, diciembre del 2021
Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIE
Facultad de
Ingeniería Eléctrica

ElectroenergeticDepartment

TRABAJO DE DIPLOMA

Author: Marcos Ernesto Iriondo Pérez

Thesis Director: M.Sc. Luis A Hernández Lugones

Dr.C Julio Pedraza Gárciga

Santa Clara, december 2021
Copyright©UCLV

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 Lubian” 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

Pensamiento

“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como la oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber”

Albert Einstein

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mis padres, los cuales pusieron todo su empeño en mi formación como profesional

Agradecimientos

Quisiera agradecer al claustro de profesores, los cuales jugaron un papel decisivo en mi formación, en esta última etapa de estudio agradecer a mis tutores ya que fueron un pilar muy importante en el desarrollo de este trabajo, agradecer también a mi familia en general porque todos aportaron algo durante todo este proceso de formación y a mis amigos incondicionales Luis Enrique, José Herlán y Eduardo que fueron una familia más desde el primer día

RESUMEN

El uso excesivo de combustibles fósiles y la crisis ambiental a nivel mundial han activado una señal de alerta, por lo que los países han comenzado a considerar medidas de mitigación y Cuba no es la excepción. Por ello se busca desarrollar nuevas alternativas de abastecimiento energético como son las fuentes renovables de energía. Tal es el caso de los sistemas de generación de biogás en las empresas pecuarias, considerando el potencial de obtención de grandes volúmenes de estiércol que a través de la descomposición anaeróbica y por su alto contenido de metano, constituyen fuentes casi inagotables de energía limpia. Por tales razones el objetivo principal de esta investigación consiste en realizar un estudio exploratorio sobre la generación de biogás a partir de las excretas del ganado y de la generación eléctrica con biogás y su posible utilización en la Empresa Pecuaria Managuaco. Sus resultados muestran el gran impacto positivo en el cuidado del medioambiente y la independencia energética, contribuyendo así al desarrollo sostenible del país.

Palabras Clave: generación con biogás, biodigestor, descomposición anaeróbica, metano.

SUMMARY

The excessive use of fossil fuels and the global environmental crisis have triggered a warning signal, so countries have begun to consider mitigation measures and Cuba is no exception. For this reason, it seeks to develop new energy supply alternatives such as renewable energy sources. Such is the case of biogas generation systems in livestock companies, considering the potential to obtain large volumes of manure that, through anaerobic decomposition and due to their high methane content, constitute almost inexhaustible sources of clean energy. For these reasons, the main objective of this research is to carry out an exploratory study on the generation of biogas from livestock excreta and electricity generation with biogas and its possible use in the Managuaco Livestock Company. Their results show the great positive impact on sustainability and energy independence, thus contributing to the sustainable development of the country.

Key Words: biogas generation, biodigester, anaerobic decomposition, methane.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	4
1.1 Comportamiento de la energía renovable	5
1.2 La Biomasa	5
1.2.1 Clasificación de la Biomasa.....	6
1.2.2 Biomasa como fuente de energía	7
1.2.3 Características de la biomasa obtenida del estiércol del ganado	8
1.3 La digestión anaeróbica	8
1.3.1 Principales características de los Biodigestores.	9
1.3.2 Condiciones necesarias para la biodigestión:.....	14
1.3.3 Poder Calorífico y energético del biogás	15
1.4. Composición del Biogás.....	15
1.4.1 Materias primas para producir biogás.....	16
1.4.3 Utilización del biogás	17
1.5 Compresores.....	18
1.5.1 Tipos de compresores	19
1.5.2 Utilización del compresor.....	19
1.6 Energía eléctrica a través del biogás como combustible.....	20
1.6.1 Eficiencia de conversión del Biogás en energía eléctrica	21
1.6.2 Experiencias internacionales en la generación de electricidad con biogás (Historia)	22
1.6.3 Sistemas de generación de electricidad con biogás más usados en cuba	23
1.7 Impacto Ambiental de la producción y generación eléctrica con Biogás.	23
Conclusiones.	24
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	25
Introducción:.....	25
2.1 Potencial de producción de Biogás en Cuba	25

2.2 Descripción del tipo y potencial de residuos	26
2.2.1 Descripción del sistema de tratamiento de residuales.....	27
2.3 Caracterización de la empresa	28
2.4 Descripción del proceso de generación y distribución del biogás	29
2.5 Análisis del proceso en la Red 1	31
2.6 Caracterización del valor energético del Biogás	32
2.7 Descripción de los sistemas de generación eléctrica con biogás instalados en Cuba	34
2.8 Evaluación del potencial de producción de biogás.....	35
2.9 Descripción del tipo de generador eléctrico.	36
2.10 Evaluación de la eficiencia de tratamiento de residuales.....	36
2.11 Evaluación de la calidad del biogás	37
2.12 Evaluación del impacto ambiental de la generación eléctrica con combustible biogás	37
CONCLUSIONES.....	39
RECOMENDACIONES	40
BIBLIOGRAFÍA	41
ANEXOS	43

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la sociedad humana está basado en el consumo de grandes cantidades de energía. La mayor parte de esta energía que se utiliza procede de los recursos naturales existentes en nuestro planeta, principalmente del carbón y del petróleo, los cuales son limitados y, por lo tanto, pueden agotarse, además, su utilización provoca un gran impacto ambiental en la biosfera al contaminar el aire, el agua y el suelo. Estos hechos han generado un interés creciente por el desarrollo de nuevas tecnologías para la utilización de fuentes renovables de energía (FRE).

Actualmente el mundo atraviesa una grave situación económica y un clima cada vez más cambiante, que ha impactado todas las esferas de las sociedades en mayor y en menor cuantía. Esto unido al bloqueo económico impuesto por Estados Unidos a Cuba, ha provocado dificultades en muchas áreas de la economía. Es imposible pensar en desarrollo contemporáneo y en desarrollo sostenible, sin tener en cuenta el factor energía, la energía en su mayor parte se produce con combustibles fósiles como el petróleo y el carbón. Estas son llamadas fuentes convencionales porque son recursos no renovables que han sido tradicionalmente usados para producir energía eléctrica. Las mismas están caracterizadas por su carácter finito, su disponibilidad geográfica limitada y su baja tasa de generación en función de su velocidad de consumo y la contaminación ambiental asociada a su extracción y conversión a otros tipos de energías. Sin embargo, el empleo y perfeccionamiento de la utilización de las fuentes renovables de energía podría ser considerado como el inicio de una tercera "Revolución Industrial" la transición a una economía de baja emisión de dióxido de carbono permite dar un giro trascendental en la lucha contra el cambio climático, mejorar la seguridad energética, y reducir significativamente las tensiones geopolíticas del presente. El incremento de la utilización de las fuentes renovables de energías constituye un lineamiento de la política energética de Cuba[1].

Tal y como aseguran los expertos, el mundo se está convirtiendo en una inmensa despensa, de utilidades bastantes dudosas. Estudios realizados afirman que durante el año 2020 y los meses iniciales del actual, Cuba aumentó la generación eléctrica con fuentes renovables en 62,5 GW/h, lo que garantiza mediante estas fuentes el 4,5 por ciento de la electricidad que demanda la nación y prevé llegar al 6,3 por ciento al finalizar diciembre. Según datos del

Ministerio de Energía y Minas (MINEM), en 2021 esa producción eléctrica ahorrará 280 000 toneladas de combustibles fósiles.

No nos damos cuenta, pero el volumen de energía que consumimos es inmenso, por ello que gobiernos y administraciones en los últimos años han venido implementando un conjunto de nuevas tecnologías que utiliza la biomasa como combustible, generando un porcentaje de energía limpia, el cual reduce los gases de efecto invernadero que tanto daño está causando a nuestro planeta. Uno de los procesos de investigación e innovación tecnológica que se desarrollan está relacionado con la producción del biogás a partir de los efluentes de biodigestores en el contextos de las fincas donde se produce alimentos y energía de forma integrada[2].

El biogás es una mezcla de diferentes gases producidos por la descomposición anaeróbica de materia orgánica como el estiércol y las basuras orgánicas.

En América Latina se trabaja para obtener energía eléctrica mediante lagunas tapadas consideradas a grandes escalas y un factor de ahorro de combustible en especial Brasil, México, Colombia, Nicaragua, Costa Rica, El Salvador, Chile y Guatemala.

Cuba atendiendo al alto consumo de combustibles se ha insertado a esta nueva experiencia de utilización de fuentes renovables para la generación de energía a través de Biodigestores en los diferentes sectores de la agronomía, tal es el caso de la Empresa pecuaria de Managuaco, en la provincia de Sancti Spíritus, en la que mediante un proyecto de desarrollo local se pretende el aprovechamiento de las excretas porcinas y bovinas para la generación de biogás.

Con la creciente entrega de tierras a pequeños productores, el incremento de las pequeñas y medianas producciones de cerdos, el programa de inversiones proyectado para la recuperación ganadera es alto y los indicadores muestran que son factibles a ejecutar con los niveles productivos planificados, con ello el aumento de la contaminación hídrica, y los elevados precios que ha alcanzado la energía en el país, la utilización del biogás se muestra como una alternativa apropiada. Los productores están motivados y las normas ambientales son más rigurosas, por lo que la demanda de digestores está en aumento, sólo limitada por los costos y la disponibilidad de los materiales; todo ello ha creado un ambiente favorable para el desarrollo del biogás, que es una solución inteligente para el tratamiento de las excretas animales que se generan.

Problema científico:

Conocer la potencialidad existente en la empresa para la generación de biogás a partir del aprovechamiento de las excretas del ganado y del comportamiento del proceso de generación de electricidad con un motogenerador que su combustible sea el biogás.

Para darle solución a este problema científico se planteó el siguiente **objetivo general**:

Realizar un estudio exploratorio sobre la generación de biogás a partir de las excretas del ganado y de la generación eléctrica con biogás y su posible utilización en la Empresa Pecuaria Managuaco.

De este objetivo general se derivan los **objetivos específicos** siguientes:

- Estudiar la generación de Biogás y su utilización.
- Revisar ejemplos de aplicación en Cuba de motogeneradores para la generación eléctrica utilizando biogás como combustible.
- Evaluar potencial de utilización del biogás en la Empresa Pecuaria Managuaco.
- Redactar informe de investigación.

Tareas Técnicas:

- Fundamentación teórica sobre la generación y uso del biogás.
- Revisión de casos donde se emplee en Cuba el biogás para la generación de electricidad.
- Evaluación del potencial de utilización del biogás en la Empresa Pecuaria Managuaco
- Redacción del informe de investigación.

Organización del Informe:

El siguiente trabajo está organizado en dos capítulos, conclusiones y recomendaciones. En el capítulo 1 se realiza la fundamentación teórica sobre la generación y uso del biogás, principales tipos de tecnologías existentes para la generación y explotación de sus aplicaciones. En el capítulo 2, materiales y métodos, se describe y caracteriza la Empresa Pecuaria Managuaco, se analizan el potencial para la producción de biogás y un ejemplo de uso del biogás en Cuba para la generación de electricidad.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

Introducción:

La contaminación del medio ambiente sugiere la necesidad de asumir una nueva actitud de administración y desarrollo sostenible, para conservar y al mismo tiempo mantener la sostenibilidad de los recursos[3].

La situación actual de la generación eléctrica en el país se caracteriza por una baja utilización de las Fuentes Renovables de Energía (FRE) en la generación de electricidad, produciendo con ellas sólo el 4,3 % de la energía eléctrica del país, baja eficiencia en la producción y el consumo de energía eléctrica, lo que afecta directamente la competitividad de la economía nacional, alta dependencia de los combustibles fósiles importados (58 %), lo que representa un alto riesgo para el país desde el punto de vista económico y estratégico.

Las características actuales de la curva de carga diaria limitan la eficiencia de la generación del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) y la utilización del potencial de las FRE, provocado por el alto peso de la demanda del sector residencial durante el horario pico alrededor del 77%.

Por otra parte, no existen capacidades para la acumulación de energía y la ausencia de un marco regulatorio para regir el empleo de estas energías en las diferentes actividades económicas, unido a la falta de incentivos económicos para la introducción de las FRE y el mejoramiento de la eficiencia en las empresas y en el sector residencial.

Atendiendo a estas problemáticas es primordial la necesidad de alternativas de producción energética, mediante la implementación de prácticas amigables con el ambiente y el aprovechamiento de los recursos disponibles, crear un clima favorable para la promoción e implementación de la tecnología de biodigestores, obteniendo como beneficio la producción de biogás. Por tanto, aprovechar de manera eficiente este combustible que es de gran importancia para sustituir las tradicionales fuentes de energía no renovables, escasas y costosas, convirtiendo la explotación agropecuaria en una actividad económica más rentable y menos contaminante[4].

1.1 Comportamiento de las fuentes renovables de energía

La disponibilidad de combustibles fósiles es limitada y existen problemas globales que están vinculados al uso de estos combustibles; la distribución porcentual de las principales fuentes energéticas que se utilizan para cubrir la demanda mundial en la actualidad corresponden a: combustibles fósiles (80 %), energía nuclear (6 %) y el resto a las fuentes renovables, fundamentalmente biomasa, energía hidráulica y otras.

En los próximos 20 años se calcula que la demanda mundial de energía se multiplicará por tres. Durante este tiempo, se espera que las principales fuentes de producción de electricidad (a saber, los combustibles fósiles como por ejemplo el carbón, el petróleo o el gas natural) deberán disminuir su distribución para cumplir con las exigencias del protocolo de Kyoto: una reducción del 12 % aproximadamente.

En cuanto a las tendencias evolutivas del entorno energético existen varias reflexiones, por un lado, se prevé un incremento de la participación del gas, la continuidad de la participación del petróleo y el carbón, una disminución de la participación de la energía nuclear y un incremento del aporte de las fuentes renovables de energía, por lo que se necesita contar con herramientas para el desarrollo de proyectos con estos fines.

Las experiencias demuestran que el tratamiento de estiércoles y otros residuos orgánicos en plantas de biogás es una alternativa beneficiosa, ya que reduce los efectos negativos de los sectores agrícola, industrial y energético sobre el medio ambiente. Esto es válido para la situación cubana, sumando los beneficios económicos y sociales a nivel local y regional.

La biomasa puede llegar a ser uno de los combustibles más importantes en el futuro. En los próximos veinte años podría suministrar un octavo del presupuesto energético mundial. La obtención de biogás en digestores a partir de residuos ganaderos reducirá las emisiones de metano y está promocionada con el fin de reducir la contaminación, obtener fertilizantes y producir energía.

1.2 La Biomasa

Se entiende por Biomasa, a toda la materia orgánica derivada de un proceso biológico, como son la de los árboles, plantas como resultado de la conversión fotosintética y asimilación de nutrientes y minerales del suelo, o la derivada de los animales (estiércol), todos los desechos orgánicos que pueden ser convertidos en energía; o los provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz, papas, frijoles), de aserraderos (podas, ramas, aserrín,

cortezas) y de los residuos urbanos (aguas residuales, basura orgánica y otros). En términos energéticos, un combustible procedente de productos y residuos naturales, tales como los provenientes de la agricultura (incluyendo tanto sustancias vegetales y animales), los provenientes de la actividad forestal e industrias ligadas a los bosques, y la fracción biodegradable de los residuos industriales y urbanos[5].

“En abreviatura es la masa biológica y resulta el conjunto de la materia orgánica de origen vegetal o animal”[1].

Reseña histórica

La biomasa ha sido el primer combustible empleado por el hombre y el principal hasta la revolución industrial. Se utilizaba para cocinar, para calentar el hogar, para hacer cerámica y, posteriormente, para producir metales y para alimentar las máquinas de vapor. Fueron precisamente estos nuevos usos, que progresivamente requerían mayor cantidad de energía en un espacio cada vez más reducido, los que promocionaron el uso del carbón como combustible sustitutivo, a mediados del siglo XVIII.

En las aldeas de las Américas, Asia y Europa era común alojar a los animales bajo las casas; esto tenía la función de mantener las casas un poco más calientes por medio del calor corporal de los animales y también por el calor producido por los microorganismos durante el proceso de descomposición del estiércol. Ambos son ejemplos de biomasa. La biomasa aún continúa jugando un papel destacado como fuente energética en diferentes aplicaciones industriales y domésticas.

1.2.1 Clasificación de la Biomasa

Es indudable la existencia de numerosas fuentes y tipos, pero podemos diferenciar dos grandes grupos: por un lado, la biomasa procedente de plantaciones energéticas y por otro la biomasa procedente de residuos o restos de actividades humanas[6].

En la clasificación comúnmente utilizada para el estudio de la biomasa se basa en el modo en el que de ella se puede obtener energía, según este criterio los tipos de biomasa son:

- Biocombustibles sólidos, también llamada, biomasa sólida. Son las extracciones de ecosistemas naturales directamente orientadas a energía, otras fuentes, los restos generados en la actividad agrícola (las podas o las pajas) y los residuos de los procesos de la madera y/o agroalimentaria.

- Biomasa residual húmeda: es aquella con alto contenido de humedad, las fuentes son, principalmente, los residuos urbanos, como la parte orgánica de la basura o las aguas residuales y también las aguas o flujos residuales con alta carga orgánica de empresas que procesan materia orgánica con fines agrícolas, ganaderos y alimenticios.
- Biocarburantes, son aquellos con alto poder calorífico que pueden ser utilizados en sistemas térmicos como los motores de combustión interna, estos no se obtienen directamente de un ecosistema natural, es decir que son biomasa procesada.[7]

1.2.2 Biomasa como fuente de energía

La biomasa abarca todo un conjunto heterogéneo de materias orgánicas, tanto por su origen como por su naturaleza. En el contexto energético, el término biomasa se emplea para denominar a una fuente de energía renovable basada en la utilización de la materia orgánica formada por vía biológica en un pasado inmediato o de los productos derivados de ésta. También tienen consideración de biomasa la materia orgánica de las aguas residuales y los lodos de depuradora, así como la fracción orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU). La misma tiene carácter de fuente renovable de energía ya que su contenido energético procede en última instancia de la energía solar fijada por los vegetales en el proceso fotosintético. Esta energía se libera al romper los enlaces de los compuestos orgánicos en el proceso de combustión, dando como productos finales dióxido de carbono y agua[8].

Esta fuente de energía renovable puede proporcionar energía mediante su transformación en materiales sólidos, líquidos y gaseosos. Los productos procedentes de la biomasa que se utilizan para fines energéticos se denominan, en general, biocombustibles y específicamente, a todos aquellos, generalmente sólidos y gases, que se aplican con fines térmicos y eléctricos[9].

Hay dos razones por lo que la biomasa es una excelente alternativa energética. La primera es que, a partir de ella se pueden obtener una gran diversidad de productos; la segunda, se adapta perfectamente a todos los campos de utilización actual de los combustibles tradicionales. Así, mediante procesos específicos, se puede obtener toda una serie de combustibles que pueden ser aplicados para cubrir las necesidades energéticas de confort, transporte, cocinado, industria y electricidad, o servir de materia prima para la industria[8]. El aprovechamiento energético de la biomasa contribuye a la diversificación energética, la sostenibilidad y disminución de la contaminación ambiental que es uno de los objetivos

marcados por los planes energéticos, tanto a escala nacional como mundial permitiendo el desplazamiento de energía eléctrica fósil por energías renovables.

1.2.3 Características de la biomasa obtenida del estiércol del ganado

La biomasa obtenida del estiércol del ganado no es un abono de composición fija, esta depende de la edad de los animales de que procede, de la alimentación a que están sometidos, trabajo que realizan, aptitud, naturaleza y composición de camas, etc. Un animal joven consume mayor cantidad de nitrógeno y fósforo que un animal viejo; las deyecciones que de aquel proceden contienen, pues, menor cantidad de esos elementos. Los animales viejos habiendo cesado de crecer, asimilan de los alimentos únicamente las cantidades necesarias para cubrir las pérdidas y dan estiércoles más ricos en elementos fertilizantes.

Las diversas especies animales producen excremento de composición química diferente. Resulta que los orines del ganado abundan en nitrógeno (N) y, sobre todo en potasio (K), y en cambio apenas contienen ácido fosfórico, que se encuentra sobre todo en las deyecciones sólidas.

En la composición de la biomasa húmeda influye también la composición de las raciones alimentarias. Cuantas más ricas son estas en un determinado elemento, mayor es la cantidad que de ese elemento se encuentra en los excrementos. Las camas que se juntan con el estiércol, también influyen según su composición y cantidad.

1.3 La digestión anaeróbica

El tratamiento anaerobio constituye una gran alternativa de depuración biológica de la biomasa húmeda como son los residuales provenientes de la ganadería, aguas residuales, en general de residuos orgánicos fermentables. Sin embargo, el hecho de no necesitar ventilación y la posibilidad de generación de biogás, que es un combustible apropiado la hace más competitiva respecto a los diferentes tratamientos aeróbicos, esta tecnología tiene un mayor índice de degradación y aprovechamiento de los aportes que puede dar la biomasa en su proceso de degradación, los mismos tienen un mayor impacto ambiental, energético, social y económico. También estos tratamientos o tecnologías limpias permiten que las plantas solventen sus necesidades energéticas y puedan comercializar el resto de la producida que siempre es mayor que la que estas demandan en su funcionamiento lo que hace que la digestión anaerobia resulte mucho más favorable económicamente, permitiendo en muchos casos la autonomía o autosuficiencia de las plantas de tratamiento[10].

Entonces la digestión anaeróbica es un proceso natural biológico, microbiano que ocurre en forma espontánea en la biomasa (materia orgánica) en ausencia de oxígeno, involucra cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis[11].

HIDROLISIS: En esta etapa los compuestos orgánicos complejos (Lípidos, proteínas, y carbohidratos) son hidrolizados a compuestos de pesos moleculares más bajos como azúcares, aminoácidos, y péptidos mediante la acción de sustancias excretadas por las bacterias, de tal manera que los nuevos compuestos puedan ser asimilados por las bacterias.

FERMENTACION: Los productos del hidrólisis son consumidos por las bacterias fermentativas y luego excretadas principalmente en forma de ácidos grasos volátiles (AGV) como por ejemplo ácido acético, propiónico, butírico, láctico y valérico.

ACETOGENESIS: Los AGV son reducidos metabólicamente por asociaciones entre acetógenas productoras obligadas y consumidoras de H₂ y metanógenas, dando como productos principales ácido acético, hidrógeno y CO₂.

METANOGENESIS: Es la etapa más importante del proceso, pues en ella se produce la remoción de la materia orgánica y la recuperación de energía en forma de metano, además del correcto equilibrio de esta etapa y las anteriores depende la estabilidad del proceso[12].

1.3.1 Principales características de los Biodigestores.

Los biodigestores son depósitos cerrados herméticamente donde se permita la entrada de los afluentes (biomasa) de alta carga orgánica a permanecer un tiempo adecuado para que ocurra el proceso de degradación de la carga orgánica por un consorcio de bacterias y se descarguen los efluentes (bioabonos) ricos en nutrientes y materia orgánica estabilizada, además poseen un sistema de recolección y almacenamiento de biogás para su aprovechamiento energético[14].

Para analizar sus características tenemos que tener en cuenta dos factores fundamentales: Según el método de carga y según el método de construcción[15].

Los biodigestores se clasifican por su método de carga o flujo de operación de la siguiente forma:

Flujo por lote: Se carga en una sola tanda, una vez cargados no permiten extraer o añadir más sustratos hasta que finalice el proceso completo de biodegradación y de producción de biogás. El proceso finaliza cuando no se produce más biogás.

Régimen semi-continuo: Este tipo de digestor se carga por gravedad una vez al día, donde el volumen de la mezcla depende directamente del tiempo de retención. Producen una cantidad de gas constante al día.

Régimen continuo: Son de gran tamaño, reciben la carga permanentemente, y requieren una inversión tecnológica mayor, ya que es necesario el control y seguimiento continuo para su rápida degradación.

En Cuba, Las tecnologías seleccionadas para construir biodigestores anaeróbicos fueron la cúpula fija (modelo chino), el tubular plástico o de manga de polietileno con flujo continuo (tipo Taiwán) y la laguna anaeróbica cubierta con una geomembrana de polietileno de alta densidad (PAD).

Según el método de construcción en cuba los más difundidos son:

Biodigestor de cúpula fija, de origen chino, se asemeja a una esfera y el gas se almacena dentro de la campana fija a presión variable, la cual se obtiene desplazando el líquido en digestión hacia una cámara llamada hidropresor; los materiales de construcción son bloques y/o ladrillos, cemento y acero. Estos digestores se cargan en forma semi-continua: se realiza una primera carga con material celulósico y estiércol, además del inóculo correspondiente, hasta un 70% de la capacidad; después se sigue cargando como un digestor continuo; a los 120-180 días se descarga en forma total y se reinicia el ciclo[16].(Ver figura 1.1)

Biodigestor cúpula móvil:construido en mampostería o estructura de concreto y un depósito de gas móvil de acero laminado u otro material resistente y no tan pesado en forma de campana, la cual puede flotar directamente en la masa de fermentación o en un anillo de agua, dependiendo de la producción de biogás este podrá ocupar una mayor o menor altura en su depósito de gas[17].(Ver figura 1.2)

El biodigestor tubular plástico: consiste en una especie de bolsa elongada de polietileno, con una relación longitud-ancho de aproximadamente 5:1. Este biodigestor tiene mucho menor costo que el anterior, pero posee una vida útil inferior (menos de un 25%). (Ver figura 1.3)

La laguna anaeróbica cubierta con polietileno de alta densidad, caucho u otro material resistente y apropiado, es una tecnología desarrollada por diferentes instituciones y empresas a nivel mundial, el Centro de Tecnología de Biogás de Hanói, la empresa aqualimpia de Alemania y GT Energía de México entre otras, han tratado grandes volúmenes de residuales y una cantidad de sólidos (alrededor del 3%), con bajos costos de construcción y operación, la cual resuelve las limitaciones de las lagunas anaeróbicas descubiertas que emiten metano a la atmósfera y olores desagradables, y además no permiten recuperar el biogás. Su fondo y sus paredes pueden ser de arcilla impermeable, de bloques, ladrillos u hormigón armado; mientras que la cubierta de PAD flota en la superficie de la laguna y es resistente a los rayos ultravioletas[16].(Ver figura 1.4)

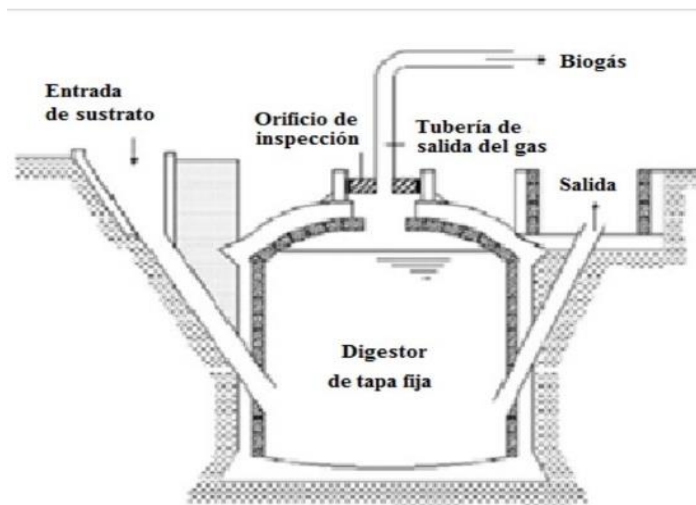


Figura 1.1 Biodigestor de cúpula fija

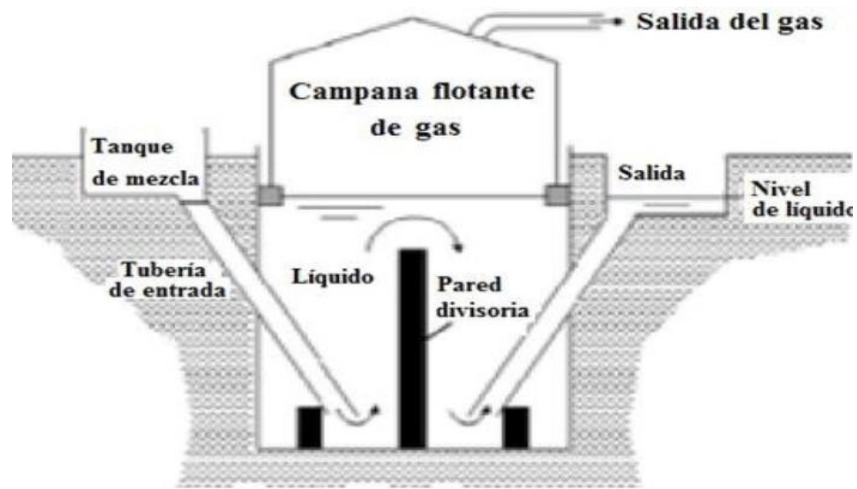


Figura 1.2 Biodigestor de cúpula móvil

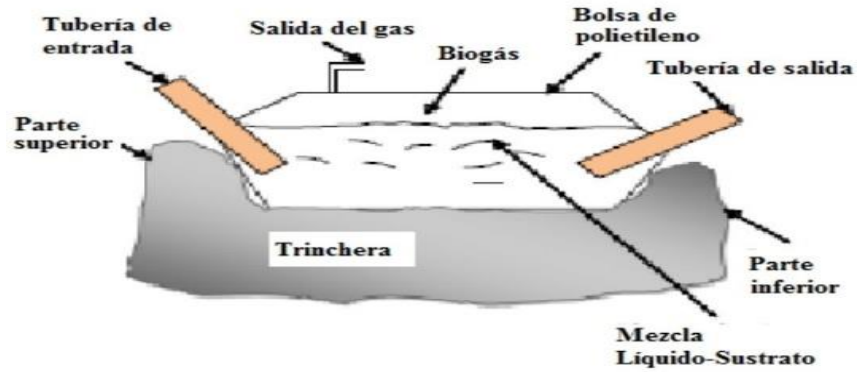


Figura 1.3 Biodigestor tubular plástico



Figura 1.4 Laguna anaeróbica cubierta

Ventajas de los biodigestores:

- Producen biogás naturalmente, que es combustible.
- Se evita el uso de leña que contribuye a la deforestación.
- Permite el aprovechamiento de residuos orgánicos.
- El lodo producido en el proceso genera fertilizante.
- Se promueve el desarrollo sustentable evitando la emisión de gases de efecto invernadero.
- Se eliminan problemas de sanidad: se evitan malos olores, insectos y se controlan los microorganismos capaces de generar enfermedades.
- Obtención de beneficios adicionales por la venta de bonos de carbono.
- Cumplimiento de la normatividad nacional e internacional.
- Se impide la contaminación de mantos acuíferos.
- Permite tener personal especializado en esta rama.
- Existe la opción de incursionar en proyectos de vanguardia.

Desventajas y riesgos de los biodigestores:

- Su ubicación debe estar cercana al almacén donde se tiene la materia orgánica.
- La temperatura debe ser entre 15 y 60°C, lo que encarece el proceso en los climas fríos.
- El biogás dentro de su composición tiene el subproducto llamado sulfuro de hidrógeno, que es un gas tóxico al ser humano y corrosivo a todo equipo del proceso.
- Existe riesgo de explosión o incendios, en caso de no cumplirse las normas de seguridad, mantenimiento y del personal.

1.3.2 Condiciones necesarias para la biodigestión:

1. La temperatura es muy importante para la producción de biogás, ya que los microorganismos que realizan la biodigestión disminuyen su actividad fuera de estas temperaturas. La temperatura en la cámara digestiva debe ser entre los 20° C y 60° C; para optimizar el tiempo de producción es deseable mantener una temperatura entre los 30° C y 35° C.
2. El nivel de acidez determina cómo se desenvuelve la fermentación del material orgánico. El pH del material debe tener un valor entre 6,5 y 7,5. Al estar fuera de este rango neutro la materia orgánica, corre el riesgo de pudrirse, ya que se aumenta la actividad relativa de los microorganismos equivocados; esto normalmente produce un olor muy desagradable.
3. El contenedor debe de estar perfectamente sellado para evitar que entre el oxígeno y de esta manera tener un procedimiento anaeróbico adecuado; también evita fugas del biogás.
4. Debe de contener entre el 80 y 90% de humedad.
5. Los materiales más comúnmente utilizados para producir biogás son el estiércol de vacas, caballos, puercos y humanos, sin embargo, también se puede con otros materiales orgánicos.
6. Para lograr una descomposición eficiente, la materia orgánica debe ser en tamaños digeribles pues entre más chica más rápida la producción del biogás.
7. Se deberá tener un equilibrio del carbono y el nitrógeno.

8. El tiempo de retención es la duración del proceso de digestión anaerobia, es el tiempo que requieren las bacterias para digerir el lodo y producir biogás. Este tiempo, por tanto, dependerá de la temperatura de la región donde se vaya a instalar el biodigestor.

9. La cantidad diaria de excretas para alimentar el biodigestor se calcula dividiendo el volumen de su fase líquida entre 50 días de retención.

Para obtener producción diaria de biogás es necesario alimentar el biodigestor con la misma frecuencia. Si el lavado de las instalaciones para el alojamiento de animales se realiza diariamente, es conveniente que el desagüe de los pisos esté en conexión directa con el biodigestor.

1.3.3 Poder Calorífico y energético del biogás

El poder calorífico del biogás lo convierte en un combustible apreciable, tanto en el ámbito doméstico, alumbrado y cocción de alimentos, como en la industria, en la producción de energía calorífica, mecánica o eléctrica al ser usado en caldera o en motores de combustión interna[18].

El poder calorífico expresa la energía máxima que puede liberar la unión química entre el combustible y el comburente y es igual a la energía que mantenía unidos los átomos en las moléculas de combustible (energía de enlace), menos la energía utilizada en la formación de nuevas moléculas en las materias (generalmente gases) formadas en la combustión. La magnitud del poder calorífico puede variar según como se mida. Según la forma de medir se utiliza la expresión poder calorífico superior (abreviadamente, PCS) y poder calorífico inferior (abreviadamente, PCI)[19].

1.4. Composición del Biogás

La composición de biogás producida por el biodigestor está directamente relacionada con el tipo de sustrato utilizado y las condiciones bajo las cuales opera el equipo. Dentro de los principales constituyentes del biogás se encuentran en mayor proporción el metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y en menor proporción el sulfuro de hidrogeno (H₂S). En la siguiente tabla se muestra la composición bioquímica del biogás.

Tabla 1: Composición bioquímica del biogás.

Componente	Fórmula química	Volumen (%)
Metano	CH ₄	54 – 70
Dióxido de carbono	CO ₂	27 – 45
Hidrógeno	H ₂	1 – 10
Nitrógeno	N ₂	0.5 – 3
Ácido sulfhídrico	H ₂ S	0.1

Una vez conocida la composición del biogás es posible determinar el Poder Calorífico Inferior (PCI) del mismo.

$$\text{PCI} = \% \text{CH}_4 \cdot 35.880 / 100 \text{ [kJ/m}^3\text{N]}$$

El poder calorífico del biogás de acuerdo a su composición se encuentra enmarcada fundamentalmente entre 4700 a 6000 kcal/m³ o 5-7 kWh/m³ dependiendo del contenido de gas metano CH₄ y puede generar una cantidad de calor equivalente a 22.000 BTU/m³ o 21.5 MJ/m³, valor que puede variar entre 19.7 y 23 MJ/m³. Es inferior a la del GLP que oscila entre 8800 a 10200 kilocalorías por m³, pero representa una fuente potencial para sitios donde la obtención del GLP resulta difícil. Su temperatura de auto-ignición es similar a la del metano puro y varía de 650-750 °C[19].

1.4.1 Materias primas para producir biogás.

Se puede utilizar todos los materiales provenientes de fuentes orgánicas tale como estiércol de animales de granja, cascaras de frutas, restos de cosecha cultivos destinados a fines energéticos y de producción de biogás como sorgo maíz, residuos de agroindustrias, efluentes líquidos con alta carga orgánica entre otros. Sin embargo cada desecho tiene distinta capacidad en cuanto a generación de biogás, a continuación se muestran la tabla con algunos ejemplos dependiendo del tipo de residuo que se utiliza.

1.4.2 Beneficios obtenidos con la aplicación del biogás.

Existen una serie de beneficios que presenta la utilización de biogás, de los cuales se puede mencionar:

- Disminución de la dependencia de energía eléctrica y GLP a los cuales no toda la población tiene acceso y que presentan costos mayores que el uso de biogás.
- La reducción significativa de olores asociados a la mala disposición de residuos que provienen de las explotaciones agrícolas. Se puede evidenciar claramente que los sistemas utilizados para la producción de metano eliminan gran cantidad de malos olores, durante debido a que el proceso de digestión anaerobia la mayoría de ácidos orgánicos volátiles son consumidos por los microorganismos productores de metano y transformados en biocombustible.
- Como subproducto de la descomposición anaerobia se genera un fertilizante con un alto contenido de nitrógeno el cual puede ser utilizado directamente para abonar los cultivos y dejar de lado el uso de productos químicos que erosionan el suelo.
- Otra de las ventajas es que existe una disminución de la contaminación de los cuerpos de agua tanto superficial como subterránea puesto que el residuo procedente del biodigestor es mucho más estable y uniforme. Con un adecuado uso puede servir para la fertilización de los suelos erosionados o con bajo contenido de nutrientes, evitando que los lixiviados procedentes del estiércol lleguen a cuerpos receptores.
- Reducción de vectores y patógenos, la utilización del estiércol reduce la proliferación de vectores que pudieran ocasionar enfermedades, además de reducir los microorganismos patógenos presentes en el estiércol debido a que durante el proceso de digestión hay un incremento de la temperatura del sustrato que elimina los mismos.

1.4.3 Utilización del biogás

El uso del biogás ya sea para cubrir la demanda energética de una instalación agropecuaria, o como un sistema de control de efluentes cloacales resulta efectivo si se toma en cuenta todas las consideraciones que implican la utilización y reemplazo de energía fósil. A

continuación, se presentan algunas consideraciones que deben tenerse en cuenta para optar por el reemplazo de este tipo de energía.

- Clase de energía utilizada. Sin importar el tipo de energía utilizada y el fin para el cual se destine, el biogás puede reemplazar cualquier uso de combustibles fósiles incluso el de la energía eléctrica ya que mediante el uso de motores modificados se puede proveer de electricidad utilizable para cualquier fin.
- Cuánta energía se utiliza y cuando. Se debe conocer los requerimientos de energía del lugar donde se aplicará el sistema puesto que en ocasiones el uso de la energía es limitado o temporal, y se deben modificar los sistemas de producción para que no excedan de los requeridos.
- Tiempo de producción. Hay que tener en cuenta que la producción de biogás se dará durante todo el año y que almacenar dicho producto por un tiempo mayor de 12 horas implican una serie de costos. Por lo cual el uso inmediato del biogás hace que el sistema sea más rentable y que se pueda reemplazar la mayoría de energía externa que se utiliza. Diseñar un equipo para uso limitado abarca mayores costos de mantenimiento incluso puede ocasionar que el equipo deje de operar lo cual afecta la eficiencia del sistema volviéndolo poco rentable.
- Uso de energía prima requerida. Dentro de una instalación agrícola hay una serie de equipos como bombas eléctricas, ventiladores, motores, compresores al igual que la iluminación se usan durante todo el año lo que hace aún más rentable el reemplazo de la energía eléctrica por biogás y asegura que este se utilice constantemente

1.5 Compresores

Un compresor es una máquina cuya función consiste en incrementar la presión de un fluido. Al contrario que otro tipo de máquinas de similar función, el compresor eleva la presión de fluidos compresibles como el aire y todo tipo de gases.

Su funcionamiento consiste en unos cambios de energía entre la máquina y el fluido, donde el trabajo que ejerce el compresor es transferido al fluido que pasa por él convirtiéndose en energía de flujo. En este proceso se aumenta la presión y la energía cinética que impulsa al fluido a salir.

La compresión del biogás posibilita el almacenamiento en cilindros y la utilización en vehículos automotores; así, la mayoría de las aplicaciones donde es posible el uso del

biogás para la utilización del mismo es necesario comprimirlo a bajas, medias y altas presiones.

Son máquinas diseñadas para comprimir gases a cualquier presión, por encima de la presión atmosférica. En general, se habla de compresor cuando se trabaja con presiones superiores a los 3 bar.

1.5.1 Tipos de compresores

- Compresores de desplazamiento positivo:

El principio de funcionamiento de estos compresores se basa en la disminución del volumen del gas en la cámara de compresión donde se encuentra confinado, produciéndose el incremento de la presión interna hasta llegar al valor de diseño previsto, momento en el cual el aire es liberado al sistema.

- Compresores dinámicos:

El principio de funcionamiento de estos compresores se basa en la aceleración molecular. El aire es aspirado por el rodete a través de su campana de entrada y acelerado a gran velocidad. Después es descargado directamente a unos difusores situados junto al rodete, donde toda la energía cinética del aire se transforma en presión estática. A partir de este punto es liberado al sistema.

Los compresores trabajan con gran cantidad de aire y de gases técnicos sin presencia de contaminación por aceite. Permiten realizar operaciones de transferencia de GLP entre tanques, recuperación de vapores residuales, recuperación de GLP de los cilindros de gas o desde tanques en situaciones de emergencia, de refuerzo tipo booster para gases de baja presión (biogás o gas natural). Generalmente los compresores se utilizan en los depósitos de almacenamiento de GLP, plantas de embotellado de GLP y plantas industriales fijos o instalados en camiones cisterna GLP y/o vehículos de emergencia.

1.5.2 Utilización del compresor

Los compresores son máquinas muy utilizadas actualmente en el sector industrial y en muchos campos de ingeniería. Están presentes en muchas máquinas y sistemas mecánicos que utilizamos en nuestro día a día. También podemos encontrarlos en generadores de energía eléctrica. El compresor también se utiliza para comprimir gases en redes de alimentación de sistemas neumáticos.

Con la compresión del biocombustible se viabiliza el envase y transporte. Eso permite la utilización del biocombustible en lugares distantes de los centros de producción. La compresión, así como el tratamiento del biometano es el primer paso para la ampliación de la utilización de este biocombustible, en su destino final. Esta tecnología podrá contribuir en el aumento del consumo de biometano.

1.6 Energía eléctrica a través del biogás como combustible

La obtención de energía eléctrica por combustión del biogás es más limpia que la convencional y generalmente se hace de dos formas:

- 1) Turbinas a biogás.
- 2) Motogeneradores a Biogás.

En la actualidad el uso de una u otra forma depende fundamentalmente de la cantidad de biogás generada por las plantas de biogás (disponibilidad de m^3/h de biogás en el lugar de generación) y el costo de inversión, pues debe existir una evaluación costo-beneficio adecuada. En el mundo las grandes plantas de biogás generan electricidad con turbinas a biogás ya que son mucho más eficientes que los motogeneradores a biogás, aunque la inversión inicial y los costos de mantenimientos son muchas veces más caros.

Una alternativa a los costos en la actualidad ha sido montar en lugares donde se dispone de grandes volúmenes de biogás, varios motogeneradores a biogás en forma de baterías, sincronizados y funcionando de forma automática y sincronizada a la red nacional. Sin embargo, el costo de kW/h generado es más barato que el de otras tecnologías convencionales, otra ventaja es que es una tecnología limpia y amigable con el medio ambiente.

El biogás se aprovecha como combustible en generadores de energía eléctrica. La producción de energía eléctrica depende del contenido de gas metano y de la eficiencia de los motores y generadores.

Un aspecto importante de los motogeneradores es que han logrado cubrir casi todo el espectro de generación, desde pequeños ($1,2\text{-}50 \text{ kW/h}$), medianos ($51\text{-} 200\text{kW/h}$) grandes ($201\text{-}2500\text{kW/h}$).

En general se puede decir que un m^3 biogás que se aprovecha en un generador de energía eléctrica es suficiente para generar un estimado de $2,2 \text{ kWh}$ de electricidad, al generar 20

horas de luz equivalente a un bombillo de 100 W, o hacer funcionar un motor de 3 HP durante 1 hora.

1.6.1 Eficiencia de conversión del Biogás en energía eléctrica

Los generadores de electricidad con biogás como combustible tienen la capacidad de aprovechar el mismo con un grado de eficiencia del 35%. En el caso de equipos que aprovechen la cogeneración su grado de eficiencia aumenta, con una eficiencia del orden del 85%.

Todos los motogeneradores varían su eficiencia de conversión en dependencia de la composición del biogás, sujeto fundamentalmente por la cantidad de metano existente en la mezcla de gases derivados de la digestión aeróbica de la biomasa, además varían también por las dimensiones de los mismos siendo los más pequeños más ineficientes y los de mayor porte o dimensiones de mayor eficiencia, comportándose de la siguiente manera; los pequeños por cada m³ de biogás solo generan alrededor de 1,5 kW/h de energía eléctrica, los medianos por m³ generan alrededor de 1,8 a 2 kW/h y los de mayor porte si se encuentran por encima de los 2,2 kW/h.

Principales aplicaciones del biogás (Ver figura 1.5)

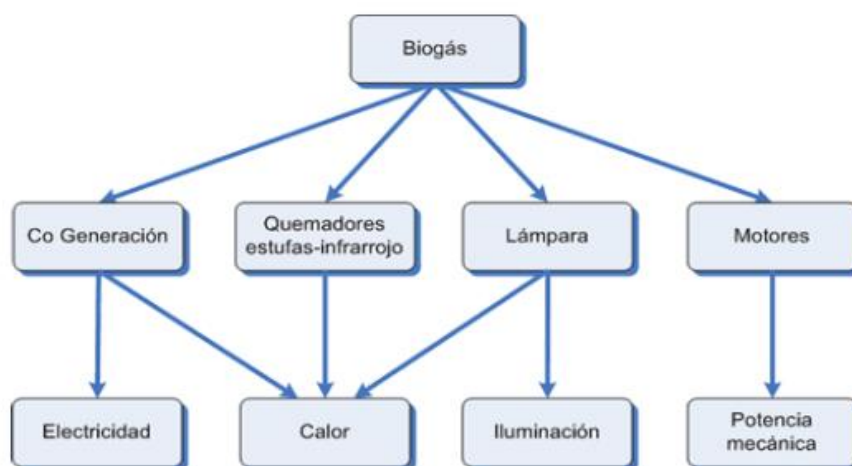


Figura 1.5 Aplicaciones del Biogás

1.6.2 Experiencias internacionales en la generación de electricidad con biogás (Historia)

La primera unidad de digestión anaerobia para la obtención de biogás a partir de aguas residuales fue construida en la India en 1859, en el asilo-hospital de leproso de Matunga, cerca de Mumbai en la India, esta planta purificaba las aguas residuales y proveía de luz y energía al hospital en caso de emergencias; hay también constancia de la construcción de un digestor en la ciudad de Otago en Nueva Zelanda, casi veinte años antes, hacia 1840.

En América al primer científico que se le puede atribuir una descripción del biogás es a Benjamín Franklin que en 1764 describió que el biogás pudo ser el causante que se prendiera fuego una gran superficie de un brumoso lago poco profundo en New Jersey.

En 1804, John Dalton describe la estructura química del metano y lo asocia con el biogás. En 1806, William Henry dedujo la identidad probable del gas de los pantanos. En 1808 Humphrey Davy, químico inglés, produce gas metano en un laboratorio con estiércol de ganado. Se toma este acontecimiento como el inicio de la investigación en biogás. Labor que continua, en parte, su alumno y luego célebre físico inglés Faraday, realizando algunos experimentos con el gas de los pantanos y el hidrocarburo identificado como parte de él.

En la segunda mitad del siglo XIX, se comenzó en Francia una investigación en profundidad, más sistemática y científica para comprender mejor el proceso de la fermentación anaerobia. El objetivo era simplemente suprimir el mal olor emitido por los conjuntos de aguas residuales. Durante sus experimentos, los investigadores descubrieron algunos de los microorganismos que hoy se conocen como esenciales para el proceso de fermentación.

La primera aplicación de la digestión anaerobia para el tratamiento de agua de alcantarillado no es hasta 1860 con el desarrollo de una cámara de aire hermética simple por Mouras en Francia.

Louis Pasteur intentó en 1884 producir biogás a partir del estiércol de caballo recogido de las calles de París. En ese mismo año, junto con su alumno Ulysse Gayon o Gavon obtuvo 100 litros de biogás por metro cúbico de estiércol al mezclar estiércol y agua a 35°C, sin la presencia de oxígeno. Otro investigador francés llamado Pastnier presentó ante la Academia de Ciencias de Francia el primer trabajo sobre la producción de metano a partir de residuos de granjas.

Con la nueva legislación eléctrica de los años 90, en Alemania, se produjo una nueva oleada de construcción de digestores, que todavía se mantiene gracias al pago por kWh producido,

que es mejorada con la nueva ley de energías renovables. De hecho, al final de los años noventa del pasado siglo, se construyeron y se implementaron numerosas plantas para el tratamiento mecánico-biológico de las basuras. La tecnología estaba basada en procesos anaerobios con algún compostaje aerobio. El proceso anaerobio se demostró ser ventajoso ya que permitió proporcionar bastante energía para la propia planta[21].

1.6.3 Sistemas de generación de electricidad con biogás más usados en cuba

Dentro de los sistemas de Generación de electricidad con el biogás se encuentran los motogeneradores de pequeño y mediano porte. Los de pequeño porte se emplean en muchos de los sistemas agroenergéticos de las fincas familiares cubanas con generadores eléctricos a biogás fundamentalmente que se enmarcan en el orden de 1,2 kW/h hasta 12 kW/h. Estos generadores han sido proporcionados por diferentes proyectos internacionales, dentro de ellos BIOMAS-CUBA, ha entregado más de 40 de diferentes dimensiones a escenarios en fincas a lo largo del país para demostrar que es posible tener sostenibilidad energética en las mismas. Por otro lado, el proyecto Agroenergía favoreció a cuatro fincas agroenergéticas con motogeneradores de pequeño porte.

Disimiles proyectos de la Unión Europea y agencias financieristas internacionales demuestran también la necesidad de aplicar el biogás de forma eficiente generando electricidad a pequeña escala. Existen otros ejemplos aplicados en diferentes formas productivas de mayor potencial de producción de biogás, superior a los 300 m³ de biogás/día que presentan generadores eléctricos de mediano porte como el caso de los centros porcinos del MININT, que cuentan con generadores de entre 40 a 60 kW/h para cubrir sus necesidades energéticas y aportar a la red nacional el resto de la energía eléctrica que producen.

1.7 Impacto Ambiental de la producción y generación eléctrica con Biogás.

Es importante destacar el elevado impacto positivo que trae consigo la generación y producción eléctrica a través del biogás en las que podemos destacar, la disminución de la emisión de gases contaminantes, menos consumo de combustible y disminución del CO₂, se reduce la emisión de contaminantes como compuestos de azufre, evita la contaminación de suelos a partir de los residuos agrícolas, menor necesidad de importación de energía.

El metano presente en el biogás es considerado como un gas que aporta enormemente al calentamiento global. Es más potente como gas de efecto invernadero (GEI) que el dióxido de carbono, con un potencial de calentamiento 21 veces mayor. Por tal motivo cuando se

emplea Biogás para generar electricidad, se está produciendo un efecto positivo al medio ambiente pues se evita la emisión de metano producto al proceso natural de descomposición de la biomasa.

Otro aspecto importante en la contribución de la disminución de gases efecto invernadero lo constituye el empleo del biogás como combustible, ya sea para fines domésticos o para la generación de electricidad por ser este un gas renovable. Es de conocimiento que la generación de energía eléctrica a partir de fuentes fósiles emite a la atmósfera diversos compuestos contaminantes, entre los que destacan dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y partículas, que contribuyen a la acidificación de los suelos y las aguas naturales, con repercusiones en la salud, las infraestructuras y los ecosistemas.

De ahí la importancia de brindar un tratamiento adecuado a la biomasa residual y así poder emplear cada una de los productos de salida (biogás, bioabono y efluentes) en aras de alcanzar beneficio social, ambiental y energético.

El bioabono, por sus múltiples usos alcanza un considerable impacto ambiental. Su empleo evita la aplicación de fertilizantes químicos, que desde su fabricación, transportación y aplicación presentan una elevada emisión de GEI.

Conclusiones.

1. La energía de la biomasa en Cuba representa una solución a los problemas energéticos existentes, ya que puede sustituir en un gran porcentaje a las fuentes de energía convencionales.
2. La utilización de la biomasa es una de las vías más ecológicas para la obtención de energía.
3. La biomasa es una excelente alternativa energética, pero hay dos vías que dan esa excelencia, la primera es que, a partir de ella se pueden obtener una gran diversidad de productos; la segunda, se adapta perfectamente a todos los campos de utilización actual de los combustibles tradicionales.
4. Su impacto ambiental es favorable, reduce la emisión de dióxido de carbono y evita la contaminación de los suelos y aguas.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Introducción:

La producción de biogás constituye una alternativa de aprovechamiento de los subproductos generados por la actividad ganadera. Constituye una fuente de energía renovable con un positivo impacto económico y social pues satisface las necesidades familiares de los productores en el sector cooperativo y campesino, contribuye además con la protección y uso sostenible de los recursos naturales del medio ambiente.

2.1 Potencial de producción de Biogás en Cuba

El sector con mayor potencial de generación de biogás es el ganadero, bajo las condiciones de utilizar solo el 20% de las excretas calculadas, le siguen el avícola y, finalmente, el porcino. Las provincias con el mayor potencial de producción de biogás son Camagüey, Pinar del Río, Artemisa, Villa Clara y Santiago de Cuba, con el 49,72 %.

Grupo Empresarial Ganadero (GEGAN)						
Provincia	Sector Porcino			Sector Vacuno	Sector Avícola	Total GEGAN
	Privado	Estatal	Total			
Pinar del Río	3 381 137	1 156 477	4 537 614	6 774 969	3 056 117	14 368 700
Artemisa	2 726 386	2 405 427	5 131 813	1 088 489	6 855 681	13 075 983
La Habana	229 146	178 496	407 642	7 669 962	136 806	8 214 410
Mayabeque	1 168 432	571 999	1 740 431	1 026 261	3 569 747	6 336 439
Matanzas	1 951 670	1 266 123	3 217 793	1 099 952	2 714 853	7 032 598
Villa Clara	2 850 280	1 326 235	4 176 514	5 006 700	3 622 285	12 805 499
Cienfuegos	3 390 324	1 311 471	4 701 795	1 225 355	1 397 950	7 325 099
Sancti Spiritus	3 343 057	1 117 740	4 460 796	2 632 276	1 480 352	8 573 425
Ciego de Ávila	3 396 649	1 245 595	4 642 244	2 731 323	1 775 528	9 149 096
Camagüey	1 635 645	914 070	2 549 715	13 865 386	2 529 061	18 944 162
Las Tunas	746 889	1 403 170	2 150 058	1 769 572	1 080 129	4 999 759
Holguín	2 202 053	1 163 689	3 365 742	1 091 281	3 910 678	8 367 702
Granma	1 731 178	901 831	2 633 009	3 135 974	2 315 741	8 084 724
Santiago de Cuba	2 370 351	1 594 886	3 965 237	5 300 129	3 225 534	12 490 900
Guantánamo	2 301 714	533 721	2 835 435	842 183	730 323	4 407 942
Total	33 424 910	17 090 928	50515 838	55 259 812	38 400 786	144 176 436

Potencial de biogás en el sector ganadero por provincias (Tabla2.1)

2.2 Descripción del tipo y potencial de residuos

El ganado vacuno, es uno de los de mayor explotación, pero normalmente pasta fuera de su espacio de confinamiento, pero para la recolección de las excretas diarias, para que sea más fácil, económica y manejable, solo se tiene en cuenta la masa ganadera que se encuentra concentrada en corrales y por tanto con más ventajas para el propósito energético. Para analizar el potencial de residuos producidos se atienden disímiles características o más bien, datos que son considerados variables de estudio:

- Especie animal de la que se dispone.
- Cantidad de animales con los que se cuenta.
- Peso vivo promedio de los animales por especie.
- Producción de estiércol por peso vivo.
- Horas de estación en el establo o corral.

Para analizar el potencial de residuo sería:

Producción de estiércol ecuación fundamental

$$E = NA * PVP * (PE/100)$$

Donde,

E = Estiércol en kilogramos por día

NA = Número de animales por una especie

PVP = Peso vivo promedio por animal

PE = Producción de estiércol por animal por día en porcentaje de peso vivo.

2.2.1 Descripción del sistema de tratamiento de residuales

En términos generales los sistemas de tratamientos de aguas residuales se pueden clasificar en dos tipos : los sistemas que emplean únicamente procesos químicos y los que se basan en procesos biológicos. Los procesos biológicos se distinguen a su vez en procesos aeróbicos y procesos anaeróbicos, dependiendo de si requieren para su operación del suministro de oxígeno. Los tratamientos químicos se descartan por el alto costo operativo y la producción de otros contaminantes del medio ambiente. Los tratamientos aeróbicos (lodos activados) y anaeróbicos constituyen las dos grandes alternativas de depuración biológica de aguas residuales. Las aguas residuales que se producen en la limpieza tienen un alto contenido orgánico, son biodegradables e ideales para ser tratadas a través de un proceso anaeróbico. En este proceso se produce biogás que es aprovechado como combustible en cocinas o para la producción de electricidad.

Esquema del Proceso (Ver figura 2.1)

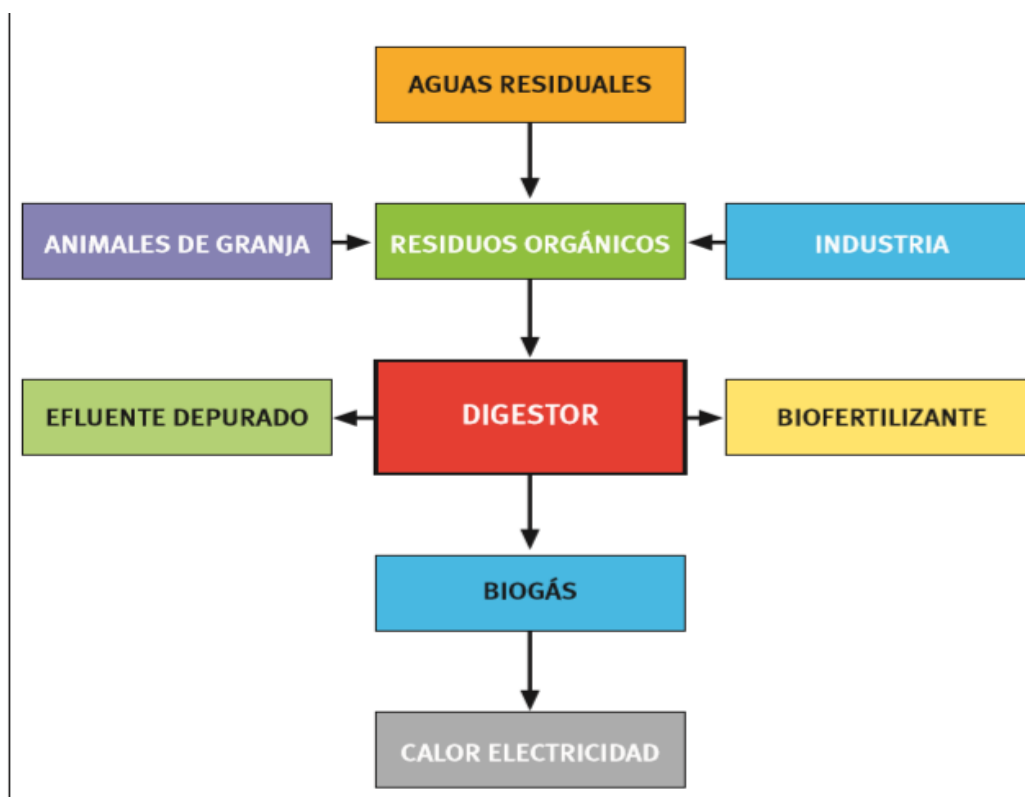


Figura 2.1 Esquema del proceso de tratamiento de residuales

2.3 Caracterización de la empresa

La Empresa Pecuaria Managuaco se encuentra ubicada al este de la ciudad de Sancti Spíritus, perteneciente al municipio y provincia de mismo nombre, con una extensión de 12091.7 ha, de ellas 8461,7 ha pertenecen al sector estatal y 3630 ha al sector privado con un área agrícola de 11374 ha, de ellas dedicadas a la ganadería 10446 ha y a los cultivos varios 928 ha.

La Empresa en su estructura cuenta con seis Unidades Económicas de Base (UEB) de las cuales dos 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.

En el sector estatal la masa ganadera está compuesta por 6334 vacunos, 1453 búfalos, 441 equinos, 524 ovinos, 91 caprinos, 132 cunículas, 56 porcinos y aves 210.

La masa del sector privado se compone de 11116 vacunos, 1414 equinos, 1379 ovinos, 967 caprinos, 251 cunículas, 2828 porcinos y aves 5447.

2.4 Descripción del proceso de generación y distribución del biogás

A continuación, se analiza el potencial de los sistemas concebidos para la producción de biogás en la empresa de Managuaco

Cantidad de sistemas y biodigestores para las tres redes de biogás previstos. (Tabla 2.2)

Sistema	Concepto	Cant. de Sistemas	Propuesta de biodigestor	Cantidad de Biodigestores
Vaquería tipo 1	Vaquería típica con una estructura construida para almacenar el purín de estiércol	11	Biodigestor híbrido con PEAD para cubierta e impermeabilización paredes y fondo	11
Vaquería tipo 2	Vaquería típica con varias estructuras construidas para almacenar el purín de estiércol	3	Biodigestor híbrido con PEAD para cubierta e impermeabilización paredes y fondo	12
Centro recría	Centro de recría con varias estructuras construidas para almacenar el purín de estiércol	1	Biodigestor híbrido con PEAD para cubierta e impermeabilización paredes y fondo	6
Módulo pecuario	Módulo pecuario con una estructura construida almacenar el purín de estiércol	1	Biodigestor híbrido con PEAD para cubierta e impermeabilización paredes y fondo	1
Cochiguera tipo 1	Cochiguera con una estructura construida para almacenar el purín de estiércol	1	Biodigestor híbrido con PEAD para cubierta e impermeabilización paredes y fondo	1
Cochiguera tipo 2	Cochiguera sin estructura construida	3	Biodigestor de bolsa	3

Matadero	Matadero sin estructura construida	1	Biodigestor de Laguna cubierta	1
TOTAL		21		35

***Por cada sistema habrá dos filtros de H₂S y dos compresores, y de uno a cinco biodigestores.**

La Vaquería típica 1, es representativa de aquellas que cuentan con un solo biodigestor y la Vaquería típica 2 de aquellas que pueden tener de 3 a 6 biodigestores. Cada biodigestor contiene un sistema de pre-tratamiento de los sustratos que busca la homogenización de los mismos para facilitar su tratamiento. En ambos tipos de vaquerías, los esquemas de operación incluyen procesos de desulfuración y compresión del biogás de forma redundante (dos equipos conectados) en paralelo para su operación en caso de fallas o de aplicación de mantenimientos programados. También se repite para cada escenario que el biogás comprimido es inyectado a una red presurizada que conecta con el almacén de biogás (balas), las antorchas para la quema del biogás excedente y los usuarios finales.

De forma detallada, el biogás generado en los biodigestores será primeramente desulfurado (disminución del contenido de H₂S presente hasta 100 ppm) utilizando como sistema de purificación, el tratamiento físico mediante la adsorción con carbón activado u óxidos de hierro impregnado en diferentes soportes (madera, pellets, arcillas, etc.), luego pasa a un compresor donde la presión se incrementa desde una presión inicial de 0,196 bar (19,6 kPa) hasta 4 bar (400 kPa), facilitando el proceso de transporte y almacenamiento, permitiendo además la deshumidificación del biogás. De aquí, el biogás comprimido a 4 bar se transporta a través de diferentes ramificaciones de tuberías a los usuarios de la red y a las balas de almacenamiento de biogás, que estarán ubicadas cercanas a los principales consumidores de cada red.

La alimentación del gas a los usuarios se hará a través de reguladores individuales de gas, con una presión de entrada máxima de 4 bar, y 22 mbar de presión de salida. Estos reguladores estarán ubicados en gabinetes individuales o colectivos (solo para edificios multifamiliares), los cuales contendrán además el medidor de gas, la válvula de corte, y otros accesorios necesarios para la conexión de estos elementos a la acometida interior.

Cada red dispondrá de un flare o antorcha, que garantizará la quema del biogás producido ante una sobre presión del sistema o un bajo consumo del biogás producido. Una pequeña

porción del biogás es recirculada desde la red hacia el interior de los biodigestores para la agitación de los mismos, la cual se recupera nuevamente y no constituye un consumo adicional.

El esquema de la Figura 2.2 muestra, además, el efluente del biodigestor (digestato), subproducto semi-líquido con un alto contenido en nutrientes y materia orgánica. El procesamiento del digestato se realiza por medio de un separador sólido/líquido, del cual se obtienen dos fracciones: Un sólido, el cual después de secado al sol podrá ser utilizado como fertilizante orgánico en las propias necesidades de la empresa o vendido a terceros, contribuyendo a la mejora del balance económico del proceso en su conjunto; y un líquido el cual será enviado a una laguna de oxidación aerobia, diseñada para un tiempo de retención de 20 días con el objetivo de cumplir la NC 27:12, su disposición final será para reúso de agua en el fertirriego de pastos y forrajes, y una fracción se recirculará al biodigestor, mediante bombeo solar o motobombas que trabajan a biogás para reducir el contenido de sólidos totales en la alimentación y minimizar el consumo de agua freática. Se tiene previsto, además, la compra de un tractor eléctrico que permita la recolección de las excretas vacunas para su alimentación a los biodigestores, así como el transporte, en un recipiente adecuado, de la fracción líquida del digestato para su uso en el fertirriego de las propias áreas de la empresa.

Esquema genérico y simplificado del proyecto de los biodigestores y las redes presurizadas de biogás para la Empresa Pecuaria Managuaco (Figura 2.2)

2.5 Análisis del proceso en la Red 1

Con el fin de obtener un mejor resultado del comportamiento de la producción del biogás y del desempeño de los compresores a utilizar, se realiza un análisis detallado de la red 1 "Niña Bonita"

En esta red se proponen 4 biodigestores para 1 módulo pecuario, 2 vaquerías y 1 cochiguera. El potencial de producción de estos se estima entre 58 y 126 m³/d que será distribuido con 4 compresores que funcionaran de forma alternativa con el fin de alargar su vida útil.

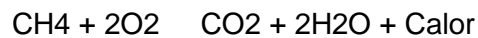
Esta red beneficiara a 25 viviendas y al Hotel Zaza (consumidor más importante de la red).

2.6 Caracterización del valor energético del Biogás

El poder calorífico promedio de 1m³ de biogás con un 60% de metano y un 40% de CO₂ es de 50000 kilocalorías, lo que permite generar 2.2 kW/h, y es equivalente a 0,5 litros de petróleo, 0,7 litros de gasolina, 0,6 m³ de gas natural o 1,3 kg de madera aproximadamente; su poder energético es alto. La empresa prevé un gran aporte a la economía en ahorro energético dejándose de consumir 254 MWh/año (VIVIENDAS) lo que representa 116 t diésel/año.

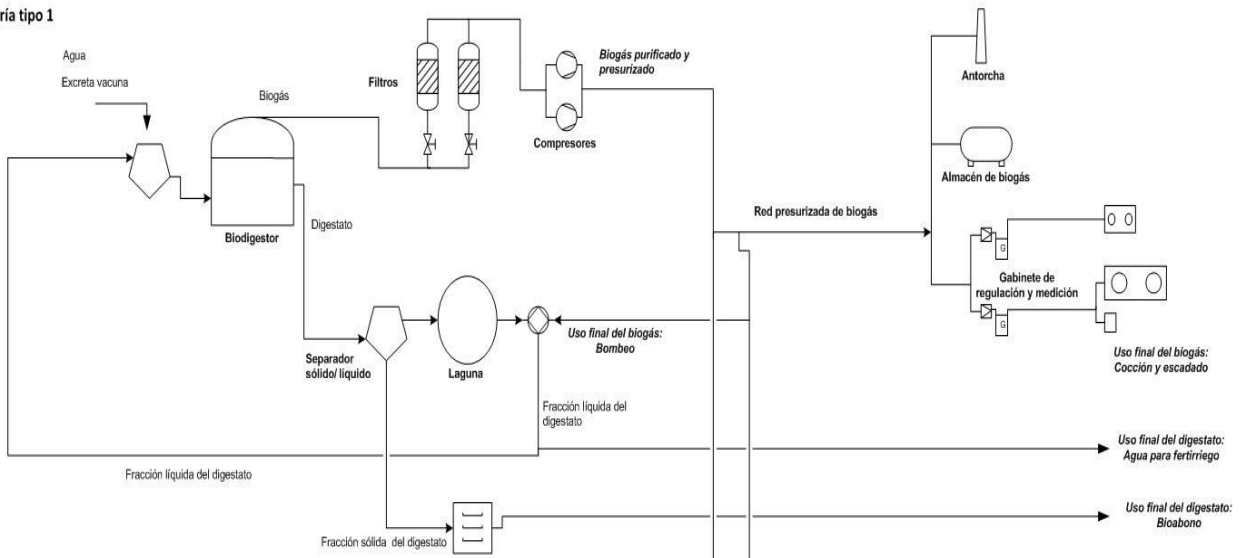
El poder calorífico de un cuerpo compuesto, es la suma de los poderes caloríficos de las sustancias simples que la componen, multiplicados por la cantidad centesimal en que intervienen, descontando la cantidad de hidrógeno total del combustible la que se encuentra ya combinada con el oxígeno del mismo. Esto quiere decir que tenemos que solo tener en cuenta el metano, porque CO₂ no aporta y el H₂O muy poco.

Reacción de oxidación del metano, para generar dióxido de carbono, agua, además del calor que se desprende.

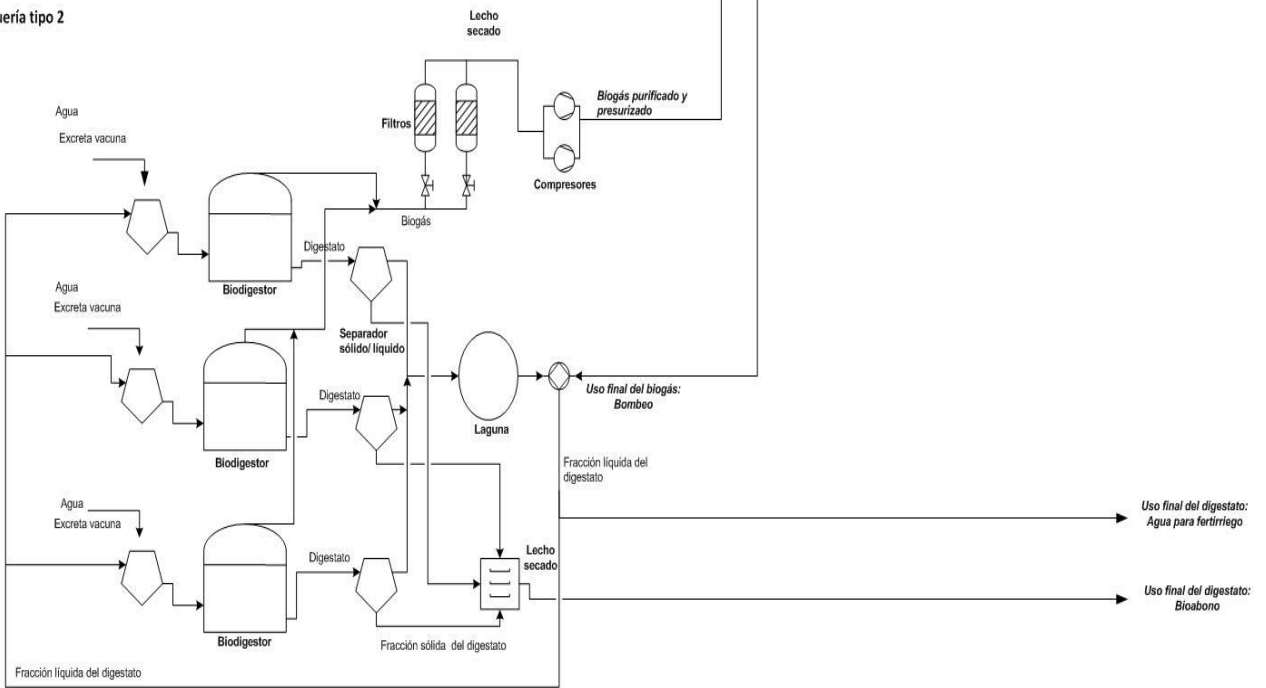


El poder calorífico del metano al 100% es de 13.89 kWh/Kg entonces al 60% es de 9.02 kWh/ Kg, dependiendo de su composición.

Vaquería tipo 1



Vaquería tipo 2



2.7 Descripción de los sistemas de generación eléctrica con biogás instalados en Cuba

Para un sistema de tratamiento de residuos (planta de generación de biogás) que tenga una producción de biogás estimada de $600\text{m}^3/\text{día}$ y un generador con una potencia de generación $105\text{kVA}/84\text{ kW}$ que opere 8 horas/día, se puede generar electricidad para consumo propio o para entregar al Sistema Eléctrico Nacional (SEN).

El sistema es un proceso anaeróbico – aeróbico basado en un biodigestor, una laguna de descarga y un lecho de secado de lodos. El digestor seleccionado para el tratamiento de los residuales es uno de los más difundidos en América Latina y han sido utilizados a partir de 1988 para el tratamiento de residuales domésticos e industriales [22].

El proceso diseñado consiste en los siguientes componentes:

- ✓ Una línea de tratamiento.
- ✓ Una estructura de entrada y un desarenador.
- ✓ Un biodigestor tipo laguna.
- ✓ Tres lagunas de descarga.
- ✓ Lecho de secado de lodos.
- ✓ Antorcha.
- ✓ Generador de electricidad.
- ✓ Descarga a cuerpo receptor.

El sistema propuesto tiene las siguientes ventajas:

- ✓ Es simple en su operación, mantenimiento y control (poca dependencia de ingenieros y operarios altamente especializados).
- ✓ Provee una eficiencia en la remoción de varias categorías de contaminantes: materia orgánica biodegradable, sólidos sedimentables, amoníaco y compuestos orgánicos nitrogenados, fosfatos, patógenos.
- ✓ Elevada sostenibilidad del sistema (bajos consumos de electricidad y poco de equipos de reposición).
- ✓ Flujo gramal simplificado de tratamiento.
- ✓ El sistema es estable con respecto a interrupciones en la fuente de energía, picos de carga, interrupciones en la alimentación y/o contaminantes tóxicos.
- ✓ El proceso es flexible con posibilidades de ampliación.
- ✓ El número de etapas de procesos requerido es bajo.

✓ El tiempo de vida del sistema es largo (más de 30 años).

Características del biodigestor (ver anexo 8)

Modelo - Laguna Cubierta

Volumen de Digestión – 1800m³

Dimensión - 31L X 25A 3,8P

Tipo de Membrana - HDPE polietileno de Alta densidad

Potencial de producción de Biogás estimado/ día - 800m³

Para analizar la generación de dicho sistema se tomaron los datos de los últimos 4 años de explotación de la planta, (ver tabla 2.3)

Tabla 2.3 Generación por Años

Años	Generó (KW/H)	Horas del Motor (H)	Gasto de gas Flujo (NCM)	Potencia	Gas KW/H
2017	25471.4	1654.5	19993	50%	42
2018	40179.6	114	3233	41%	34
2019	43937.2	1242	35297	41%	34
2020	59705.2	1592.5	44946	70%	58

En cuanto a la generación de materia orgánica, sería de 593 toneladas/año, la que se extrae en días alternos y se vende para su uso como fertilizante orgánico.

2.8 Evaluación del potencial de producción de biogás.

Teniendo en cuenta la cantidad de excretas se puede obtener la cantidad de biogás, 1Kg de excretas puede producir un estimado promedio de 0,0054m³ de biogás

Para llegar a esos datos se utilizan las siguientes ecuaciones.

$$\text{Rev} = \text{NC} * \text{PVP} * \%R$$

$$\text{Pbio} = \text{Rev} * \%SV * \text{Bsv}$$

Rev (volumen de residuo)

NC (número de cabezas)

PVP (Peso vivo promedio),

%R (Porcentaje de excreta más orina)

Pbio (producción diaria de biogás),

%SV (Porcentaje de Sólidos Volátiles)

Bsv (Índice de producción de biogás).

Se utilizan además datos de las tablas 1.1 y 1.2 simultáneamente.

La producción de biogás a partir de las excretas de los animales y su distribución para uso en la instalación, demuestra su pertinencia y factibilidad, y se convierte en una referencia del fomento de la agroenergía.

2.9 Descripción del tipo de generador eléctrico.

Características del motogenerador

Motogenerador – CUMMINS

Potencia de generación – 105kVA/84 kW

Voltaje - 220Volt

Frecuencia – 60 Hz

Temperatura Ambiente – 45 grados

Factor de potencia – 0.8

LxWxH (cm) – 235x110x140

Ensamblado en México

Modo de trabajo - Isla - Sincronizado a la red

2.10 Evaluación de la eficiencia de tratamiento de residuales.

Con la construcción de plantas de tratamiento de residuales se consigue el grado de depuración necesario y el cumplimiento de los límites fijados en la normativa del CITMA para su vertido a cuerpos receptores, además que se logra la generación de biogás y otros productos finales.

Con el tratamiento se reduce la carga orgánica contaminante en todo el proceso a menos de 20mg/l lo que hace que se cumplan las normas cubanas para tratamiento de residuales y, además:

- ✓ Se pueden verter a un cuerpo receptor los efluentes líquidos.

- ✓ Se puede destruir gran cantidad de metros cúbicos de metano por día, el cual es 21 veces más contaminante que el CO₂ lo que hace que se disminuya la emisión de gases de efecto invernadero que son los que provocan el calentamiento de la atmósfera terrestre.
- ✓ Se puede lograr la eliminación de óxido nitroso que es un componente que se destruye en la formación de la molécula de metano dentro del digestor y que se emitiría en el proceso de descomposición de la excreta sino se tratara.

2.11 Evaluación de la calidad del biogás

La producción de biogás a partir de desechos orgánicos representa una fuente para su uso directo como energía calorífica o para generar energía eléctrica, que sustituye el consumo de portadores energéticos convencionales y aprovecha su empleo como fuente energética renovable.

Teniendo en cuenta, que en el biodigestor la producción de biogás es un proceso continuo, que aumenta y disminuye durante el día, debido a factores tales como la temperatura ambiental, tipo de biodigestor, variabilidad de alimentación, tiempo de retención, utilización de agua de lavado, entre otros, el volumen producido varía para cada caso específico.

La evaluación del biogás está definida por la cantidad de metano (CH₄), es una energía limpia no contaminante de muy buena calidad. Además de todos los usos anteriormente mencionados, también puede utilizarse como combustible para la generación de electricidad.

La generación de electricidad posibilitaría el funcionamiento de equipos que actualmente son altos consumidores, aumentando la eficiencia energética del centro y contribuyendo al ahorro.

2.12 Evaluación del impacto ambiental de la generación eléctrica con combustible biogás

Este sistema garantiza elevada protección ambiental siguiendo la vía de mejorar las técnicas de manejo de residuos y desarrollo de agro ecología. La tecnología contribuye módicamente al cumplimiento de los acuerdos de La Cumbre de Desarrollo Sostenible, tratándose sobre la necesidad de privilegiar la conservación de la naturaleza y la protección ambiental.

La tecnología implementada proporciona:

- Protección de las fuentes superficiales por la reducción de los vertimientos y la disminución de la carga contaminante vertida.

- Reducción de las emisiones de CO₂ y CH₄, gases de efecto invernadero, causantes del cambio climático, que influyen en el aumento de la frecuencia de fenómenos naturales como sequía, ciclones, tormentas, que causan pérdidas sociales y económicas (humana y material).
- Posibilidad de mejorar los suelos para la siembra de cultivos y soportar condiciones adversas (sequías, enfermedades, ataques de plagas, etc.)

Conclusiones

- 1- La generación de electricidad con biogás, es factible, se contribuye a la sustitución de importaciones, al no quemarse combustible fósil.
- 2- Se impacta positivamente en la protección del medio ambiente con la utilización de fuentes no contaminantes, logrando atenuar la emisión de gases efecto invernadero, el mejoramiento de los suelos y la protección de las fuentes superficiales.

CONCLUSIONES

- 1- La energía de la biomasa en Cuba representa una solución a los problemas energéticos existentes, ya que puede sustituir en un gran porcentaje a las fuentes de energía convencionales.
- 2- Se logra resolver los impactos negativos en el medio ambiente, que tienen lugar en la actualidad, pudiendo obtener una reducción apreciable de emisiones de CO₂, eliminación de contaminantes presentes en aguas residuales, además de eliminar olores y vectores transmisores de enfermedades.
- 3- La generación de electricidad con biogás, es factible, se contribuye a la sustitución de importaciones, al no quemarse combustible fósil.

RECOMENDACIONES

- 1- Evaluar desde el punto de vista económico las propuestas aquí realizadas
- 2- Continuar realizando estudios de evaluación de este proceso, considerando otras técnicas de operación.
- 3- Llevar un riguroso control estadístico de la operación, una vez que se encuentre operando la planta.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] V.-R. Iván, M.-R. José, E.-J. Melitón, and O.-S. Agustina, "Potencial de generación de biogás y energía eléctrica Parte I: excretas de ganado bovino y porcino," *Ingeniería, investigación y tecnología*, vol. 15, pp. 429-436, 2014.
- [2] L. Cepero, V. Savran, D. Blanco, M. Díaz Piñón, J. Suárez, and A. Palacios, "Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores," *Pastos y Forrajes*, vol. 35, pp. 219-226, 2012.
- [3] D. Alonso-Estrada, Y. Lorenzo-Acosta, Y. M. Díaz-Capdesuñer, R. Sosa-Cáceres, and Y. Angulo-Zamora, "Tratamiento de residuales porcinos para la producción de biogás," *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 48, pp. 16-21, 2014.
- [4] R. Quesada, N. Salas, M. Arguedas, and R. Botero, "Generación de energía eléctrica a partir de biogás," *Revista Tierra Tropical*, pp. 139-147, 2007.
- [5] M. d. Gregorio, "Situación actual y perspectivas de la biomasa para generación eléctrica," *Vida Rural*, pp. 26-28, 2008.
- [6] B. Velázquez Martí, *Aprovechamiento de la biomasa para uso energético*: Editorial Universitat Politècnica de València, 2018.
- [7] F. S. Nogués, *Energía de la Biomasa (volumen I)* vol. 173: Universidad de Zaragoza, 2010.
- [8] J. Fernández, "Energía de la biomasa," *Energías renovables para el desarrollo*. Thomson-Paraninfo, 2003.
- [9] A. R. Salvador, "Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles," *Cienc. Exact. Fís. Nat.(Esp)*, vol. 104, pp. 331-345, 2010.
- [10] Y. L. Acosta and M. C. O. Abreu, "La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I," *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 39, pp. 35-48, 2005.
- [11] R. A. Parra Huertas, "Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria," *Producción+ limpia*, vol. 10, pp. 142-159, 2015.

- [12] E. Caceres, "Producción de biogás. Construcción de un biodigestor," *Mail x mail*, 2011.
- [13] I. p. I. D. y. A. d. I. Energía, *Biomasa: digestores anaerobios*: IDAE, 2007.
- [14] G. Moncayo Romero, "Dimensionamiento y diseño de biodigestores y plantas de biogás, manual de usuario 3.0," ed: Aqualimpia Beratende Ingenierure, 2009.
- [15] C. A. T. SANTANA, "Diseño y selección de elementos para una planta de biogás," *Valdivia: Tesis de graduación. Universidad Austral de Chile. 74p*, 2008.
- [16] J. Suárez, G. Martín, J. Sotolongo, E. Rodríguez, V. Savran, L. Cepero, *et al.*, "Experiencias del proyecto BIOMAS-CUBA. Alternativas energéticas a partir de la biomasa en el medio rural cubano," *Pastos y Forrajes*, vol. 34, pp. 473-496, 2011.
- [17] S. O. Abeledo, "Diseño de Software para la construcción de biodigestores de Cúpula Fija," 2016.
- [18] R. P. C. Eduardo and P. P. I. Esteban, "Producción estimada de biomasa y biogás mediante excretas de porcino y bovino en San Francisco de Campeche."
- [19] F. J. Castellón Centeno, Y. A. Martínez Rugama, and Y. A. Gutiérrez Martínez, "Evaluación de la producción de biogás y el poder calorífico con la utilización de tres sustratos (estiércol de ganado bovino y porcino, y la pulpa de café)," Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, 2015.
- [20] E. Jacinto Morffi, "Evaluación del potencial energético del biogás generado por el sector porcino en Placetas," Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Ingeniería ..., 2017.
- [21] S. P. R. ORTEGA, "ENERGIA DEL BIOGAS: UNA OPCIÓN SUSTENTABLE PARA EL MEDIO RURAL Y SEMIURBANO," UNIVERSIDAD VERACRUZANA, 2013.
- [22] N. CEPAL, "Desarrollo y gestión de cuencas y zonas altas en América Latina," *En: Gestión para el desarrollo de cuencas de alta montaña en la zona andina-LC/G. 1533-P-1988-p. 55-66*, 1988.

ANEXOS

Moto-generador

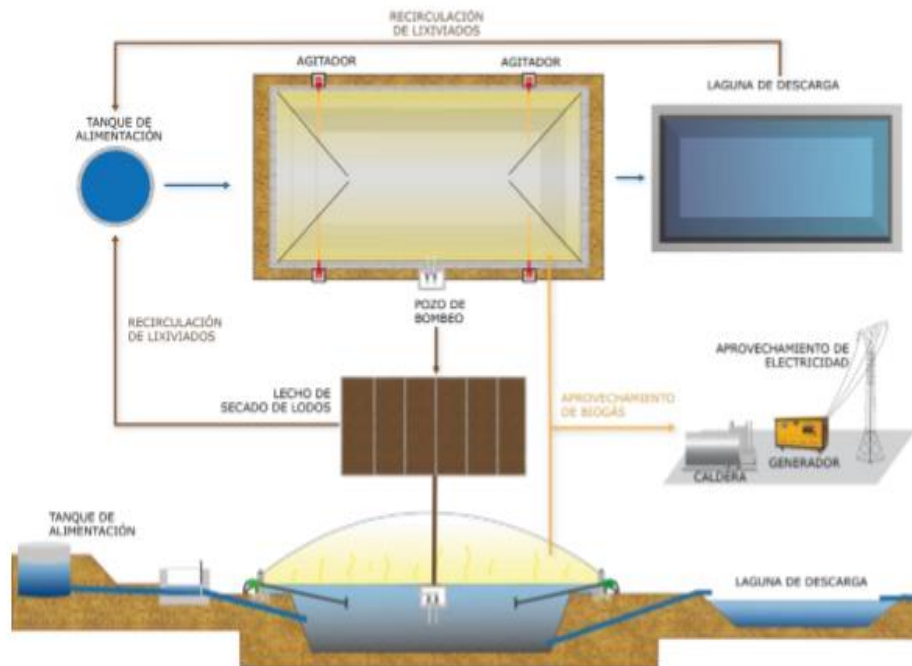




Laguna Tapada



Vista lateral de la planta de biodigestor de Laguna Tapada



Poderes caloríficos de las principales fuentes energéticas.

Poderes caloríficos de las principales fuentes energéticas							
Tipo de combustible	PCI (GJ/t)	PCI (kWh/Kg)	PCI (kcal/Kg)	PCI (tep/t)	PCI (tep/miles de litros)	PCS (MJ/Nm ³)	PCS (kcal/Nm ³)
Petróleo y productos petrolíferos	Petróleo Bruto	42.55	11.82	10.190	1.0190		
	Materias primas de refinería	39.88	11.08	9.550	0.9550		
	GLP	45.89	12.75	10.990	1.0990		
	Propano	46.20	12.83	11.063	1.1063		21.800
	Butano	44.76	12.44	10.723	1.0723		26.300
	Queroseno	42.89	11.91	10.270	1.0270	0.8244	
	Gasolina	43.89	12.19	10.510	1.0510	0.7752	
	Gasolina aviación	43.89	12.19	10.510	1.0510	0.7357	
	Gasóleo automoción	42.47	11.80	10.170	1.0170	0.8467	
	Otros gasóleos	42.47	11.80	10.170	1.0170		
	Fuelóleo	39.88	11.08	9.550	0.9550		
	Alquitran	39.88	11.08	9.550	0.9550		
	Nafta	43.89	12.19	10.510	1.0510		
	Lubricantes	39.88	11.08	9.550	0.9550		
	Coque de petróleo	31.90	8.86	7.640	0.7640		
GNL	45.10	12.53	10.800	1.0800			
Gases	Gas natural					40.474	9.667
	Metano	50.00	13.89	11.973	1.1973		
	Etano	47.51	13.20	11.350	1.1350		
	Gas de refinería	49.36	13.71	11.820	1.1820		
	Gas de coquería						19.01
	Gas de alto horno						2.09
	Biogases en general						21.77
	Biogás pobre						15.51
	Biogás de vertedero						20
	Biogás de depuradora						26
Carbones	Antracita eléctrica	19.23	5.34	4.594	0.4594		
	Antracita industrial	24.40	6.78	5.829	0.5829		
	Antracita otros sectores de consumo final	26.10	7.25	6.235	0.6235		
	Hulla eléctrica	22.60	6.28	5.399	0.5399		
	Hulla coquizable	29.55	8.21	7.059	0.7059		
	Hulla altos hornos	26.20	7.28	6.259	0.6259		
	Hulla industrial	24.10	6.69	5.757	0.5757		
	Hulla otros sectores de consumo final	26.86	7.46	6.417	0.6417		
	Carbón subbituminoso	13.37	3.71	3.194	0.3194		
	Lignito	13.34	3.71	3.195	0.3195		
	Coque de coquería	26.80	3.71	3.195	0.3195		
	Alquitran de hulla	38.00	3.71	3.195	0.3195		
	Biomasa en general	14.12	3.92	3.382	0.3382		
	Leña y ramas	15.87	4.41	3.800	0.3800		
	Leñas talladas	10.44	2.90	2.500	0.2500		
Leñas de podas	10.44	2.90	2.500	0.2500			
Leñas de olivos y cultivos agrícolas	10.44	2.90	2.500	0.2500			
Serrines y virutas	15.79	4.38	3.780	0.3780			
Corteza	15.24	4.23	3.650	0.3650			
Astilla de pino triturada (Humedad <20%)	15.07	4.19	3.608	0.3608			
Residuos de poda	15.66	4.35	3.750	0.3750			
Otros residuos forestales	13.82	3.84	3.310	0.3310			
Biomasa de la industria forestal	14.60	4.06	3.497	0.3497			
Biomasa agrícola	12.53	3.48	3.000	0.3000			
Sarmientos de vid	13.70	3.80	3.280	0.3280			
Ramilla de uva	12.32	3.42	2.950	0.2950			
Hueso de acetuna	16.12	4.48	3.860	0.3860			
Orujillo	15.79	4.38	3.780	0.3780			
Orujo de uva	13.53	3.76	3.240	0.3240			
Cáscara de frutos secos	15.49	4.30	3.710	0.3710			
Cáscara de cereales	13.15	3.65	3.150	0.3150			
Cáscara de almendra (Humedad <20%)	15.90	4.42	3.808	0.3808			
Paja de cereales	13.20	3.67	3.160	0.3160			
Zuro de maíz (Humedad <25%)	10.24	4.51	3.888	0.3888			
Otros residuos agrícolas	13.82	3.84	3.310	0.3310			
Poso de café	27.14	7.54	6.500	0.6500			
Marro de café	25.06	6.96	6.000	0.6000			
Residuo molinda de café	8.14	2.26	1.950	0.1950			
Pellets en general	16.45	4.57	3.940	0.3940			
Pellet de madera (Humedad <15%)	18.04	5.01	4.319	0.4319			
Carbón vegetal	15.87	4.41	3.800	0.3800			
Biocombustibles	Bioetanol	26.93	7.48	6.449	0.6449	0.5016	
	Biodiesel	36.90	10.25	8.837	0.8837	0.7882	