



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA PARA EL AUTOCONSUMO A PARTIR DE LA BIODIGESTIÓN DEL
ESTIÉRCOL BOVINO EN UNA FINCA DEL MUNICIPIO DE TAXISCO, SANTA ROSA**

Héctor Salvador Fong Martínez

Asesorado por el Msc. Ing. Roberto Alejandro Hernández Hernández

Guatemala, noviembre de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA PARA EL AUTOCONSUMO A PARTIR DE LA BIODIGESTIÓN DEL
ESTIÉRCOL BOVINO EN UNA FINCA DEL MUNICIPIO DE TAXISCO, SANTA ROSA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

HÉCTOR SALVADOR FONG MARTÍNEZ

ASESORADO POR EL MSC. ING. ROBERTO ALEJANDRO HERNÁNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

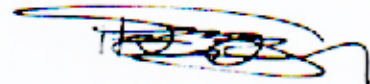
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Hernán Leonardo Cortés Urioste
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. Francisco Arturo Hernández Arriaza
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA EL AUTOCONSUMO A PARTIR DE LA BIODIGESTIÓN DEL ESTIÉRCOL BOVINO EN UNA FINCA DEL MUNICIPIO DE TAXISCO, SANTA ROSA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, con fecha 6 de mayo de 2013.



Héctor Salvador Fong Martínez

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142

ADSE-MEAPP-0014-2013

Guatemala, 06 de mayo de 2013.

Director:
César Ernesto Urquizú Rodas
Escuela de Ingeniería Mecánico Industrial
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación de el estudiante **Héctor Salvador Fong Martínez** con carné número **2002-12787**, quien opto la modalidad del **"PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO"**. Previo a culminar sus estudios en la **Maestría de Energía y Ambiente**.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

Roberto A. Hernández H.
Ingeniero Civil
Colegiado 6856

"Id y enseñad a todos"

Ing. Juan C. Fuentes M.
M.Sc. Hidrología
Colegiado No. 2,504

Msc. Ing. Roberto Alejandro Hernández H.
Asesor (a)

Msc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque.
Coordinador de Área
Desarrollo social y energético

Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado

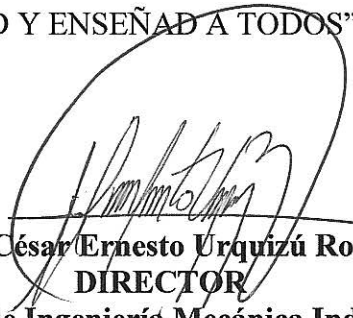
Cc: archivo
/la



REF.DIR.EMI.285.013

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el Visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística del trabajo de graduación en la modalidad Estudios de Postgrado titulado **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA EL AUTOCONSUMO A PARTIR DE LA BIODIGESTIÓN DEL ESTIÉRCOL BOVINO EN UNA FINCA DEL MUNICIPIO DE TAXISCO, SANTA ROSA**, presentado por el estudiante universitario **Héctor Salvador Fong Martínez**, aprueba el presente trabajo y solicita la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. César Ernesto Urquizú Rodas
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial



Guatemala, octubre de 2013.

/mgp

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 832.2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA EL AUTOCONSUMO A PARTIR DE LA BIODIGESTIÓN DEL ESTIÉRCOL BOVINO EN UNA FINCA DEL MUNICIPIO DE TAXISCO, SANTA ROSA,** presentado por el estudiante universitario **Héctor Salvador Fong Martínez,** autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Reginos
Decano



Guatemala, 20 de noviembre de 2013

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por iluminar mi camino y llenarme de bendiciones, darme la fuerza e inteligencia necesaria para permitir culminar con éxito el esfuerzo de todos estos años de estudio. Para Él mi agradecimiento infinito.
- Mis padres** Héctor Fong y Elsa Martínez. Gracias por darme la vida y ser el pilar fundamental de ella, mi ejemplo. Todo lo que soy se lo debo a ustedes.
- Mis hermanos** Nelly y Ricardo Fong Martínez. Por su apoyo incondicional y sobre todo por ser mis compañeros de vida.
- Mis abuelos** Salvador Martínez, Nelly Juárez, Mario Fong y Teresa Veliz. Por enseñarme el camino de la vida y ser los ángeles que cuidan de mí.
- Mi familia** Porque sin ustedes este logro no hubiera sido posible.
- Mi novia** Lucia Rodríguez. Por ser mi inspiración en estos últimos años. Gracias por tu amor.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios. Siempre estaré orgulloso de ello.
Facultad de Ingeniería	Por permitirme ser parte de esta gloriosa y respetada facultad.
Mis catedráticos	Por compartirme todos sus conocimientos.
Mis amigos	Por compartir tantas vivencias para llegar a este sitio y estar siempre en las buenas y en las malas.
Ing. Roberto Hernández	Por ser mi asesor y por su atenta colaboración y apoyo en la revisión de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
GLOSARIO.....	V
RESUMEN	VII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES.....	3
3. OBJETIVOS	7
4. JUSTIFICACIÓN.....	9
5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
6. ALCANCE	13
7. MARCO TEÓRICO	15
7.1. Biogás	15
7.1.1. Fermentación anaeróbica	16
7.1.1.1. Fase de hidrólisis.....	17
7.1.1.2. Fase de acidificación.....	17
7.1.1.3. Fase metanogénica.....	17
7.1.2. Rumen.....	19
7.1.3. Aprovechamiento energético	20
7.1.4. Ventajas de la utilización.....	21
7.2. Biodigestor	25
7.2.1. Tipos de biodigestores	26
7.2.2. Criterios de diseño de un biodigestor	28
7.2.3. Construcción de un biodigestor	31
7.3. Formación y utilización del biogás	32
7.3.1. Utilización y usos del biogás.....	34
8. ÍNDICE DE CONTENIDO PROPUESTO PARA EL INFORME FINAL ...	37

9.	HIPÓTESIS	41
10.	MÉTODOS Y TÉCNICAS	43
10.1.	Obtención de datos y toma de mediciones	44
10.2.	Conceptos de diseño de un biodigestor	45
10.2.1.	Temperatura y tiempo de retención	45
10.2.2.	Estiércol disponible	46
10.2.3.	Carga de mezcla diaria	47
10.2.4.	Volumen total de biodigestor	47
10.2.5.	Volumen líquido y gaseoso	48
10.2.6.	Producción de biogás	48
10.3.	Conceptos de dimensionamiento de un biodigestor	49
10.3.1.	Ancho de rollo y radio de la manga	49
10.3.2.	Volumen de la manga, sección eficaz y longitud	49
10.3.3.	Relación óptima entre longitud y diámetro del biodigestor	51
10.3.4.	Dimensiones de la zanja del biodigestor	52
10.3.5.	Equilibrio hidráulico	54
11.	RESULTADOS ESPERADOS	57
12.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	59
13.	RECURSOS NECESARIOS	61
14.	BIBLIOGRAFÍA	63

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Etapas fermentación anaeróbica	18
2.	Esquema básico de un biodigestor	26
3.	Dimensiones biodigestor	53
4.	Esquema de metodología de diseño	55

TABLAS

I.	Tiempo de retención según temperatura	46
II.	Producción de estiércol fresco diario.....	47
III.	Producción de biogás	48
IV.	Parámetros según el ancho de rollo.....	49
V.	Sección eficaz según el ancho de rollo	50
VI.	Longitud del biodigestor según el ancho de rollo	51
VII.	Relación óptima entre longitud y diámetro del biodigestor	52
VIII.	Dimensiones de la zanja	53

GLOSARIO

Biodigestor	Contenedor cerrado en el que se produce la digestión anaerobia aprovechando el recurso biomasa.
Biogás	Es un gas que se genera en medios naturales por reacciones de biodegradación y está compuesto por cerca de 60 % de metano (CH ₄) y 40 % de bióxido de carbono (CO ₂).
Fermentación Anaeróbica	Conversión biológica de las moléculas orgánicas mediante la acción de ciertos enzimas que actúan bien directamente o como componentes de ciertas bacterias y levaduras.
Metano	Es un gas ligero, sin color, sin olor y flamable bajo condiciones normales y es producido por animales y por la descomposición de los vegetales.
Rumen	Primera de las cuatro cavidades de que consta el estómago de los rumiantes.

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se plantea la realización de la metodología de diseño y cálculo de un sistema de biodigestión a partir de la combustión de gas metano producido por la fermentación anaeróbica del estiércol bovino y así poder generar energía eléctrica para autoconsumo en una finca del municipio de Taxisco del departamento de Santa Rosa, Guatemala.

En el capítulo 1 se presentan las generalidades del biogás, cubriendo con brevedad, sencillez y asertividad los conceptos afines al estudio, luego en el capítulo 2 se describe detalladamente la tipología de biodigestores y los diversos procedimientos que se requieren para el diseño y construcción de los mismos. Posteriormente, en el capítulo 3 se presentan los resultados de la cuantificación de la cantidad de metano producido en la finca, la capacidad de generación de biogás que este tiene y los parámetros que influyen en su formación. Por último, en el capítulo 4 se propone el diseño del biodigestor y generador más óptimos, así como, el porcentaje de la demanda energética que puede ser abastecida mediante el mismo.

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto denominado “Diseño de la investigación de un sistema de generación de energía eléctrica para el autoconsumo a partir de la biodigestión del estiércol bovino en una finca del municipio de Taxisco, Santa Rosa” pertenece al área de Diseño de la Maestría en Energía y Ambiente, de la Escuela de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala; específicamente al eje de investigación de diseño y aplicación de proyectos de biomasa y biocombustible.

El mismo establecerá las bases sobre la forma de generar electricidad mediante un sistema alternativo, con el fin de buscar opciones económicamente factibles frente al consumo de combustibles derivados del petróleo; contribuyendo en la reducción de gases con efecto invernadero que ocasionan el aumento de la temperatura de la Tierra.

En primer lugar, se señalan los impactos ambientales provocados por la actividad ganadera en el país, debido a la producción de gases de efecto invernadero.

Posteriormente, se analizan aspectos generales que conllevan a la búsqueda de métodos de generación de energía eléctrica sin la dependencia de combustibles fósiles, enfocando el trabajo a un punto geográfico específico y particular, en la que mediante un sistema alternativo de generación de energía eléctrica se pretende mejorar la calidad de vida de los habitantes de la misma y sus alrededores.

Luego, se estudia el metano con la finalidad de la generación eléctrica, mediante un análisis que demuestra su beneficio, los tipos de aplicación y la facilidad de adquirirlo.

Se detallan las diversas formas por las cuales es posible obtener el biogás a partir del metano, con el fin de encontrar el método más conveniente para su producción dependiendo de los recursos económicos disponibles y el entorno ambiental, finalizando con un estudio de factibilidad que recopila toda la información necesaria para implantar un diseño de generación a partir de la energía de la biomasa utilizando el estiércol bovino.

2. ANTECEDENTES

Desde el inicio del siglo XXI se continúan buscando opciones para reducir la dependencia del petróleo, considerando principalmente para dicho efecto el mejor aprovechamiento de la energía solar, energía eólica, energía hidráulica, entre otras energías.

El incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre, es atribuido en gran manera a la quema de combustibles fósiles, situación que despierta el interés de muchos países en impulsar políticas de promoción de las energías renovables. En los últimos 20 años, los procesos y tecnologías de generación de energías renovables han evolucionado de gran manera, logrando establecerse como fuentes confiables y competitivas de generación de energía.

El biogás es uno de los segmentos eléctricos más versátiles, pudiendo ser utilizado para generar electricidad o calor, para refrigeración, como combustible para vehículos o convirtiéndolo en biometano para alimentar la red de gas natural a través de biodigestores. (El Blog de la Energía Renovable, 2013), afirma que la Unión Europea está financiando el proyecto SEBE (Sustainable and Innovative European Biogas Environment) con 2,6 millones de euros. Y tiene como objetivo investigar qué tecnologías y marcos regulatorios son los más adecuados para generalizar la producción de biogás en Europa, el cual tiene potencial suficiente para desplazar a otras fuentes de energía como los combustibles fósiles. En Alemania por ejemplo, existen ya alrededor de 5,000 plantas de biogás, en cambio en otros países de Europa, todavía se están cuestionando la viabilidad económica de estas instalaciones.

De acuerdo con (Félix Figueroa, 2010) los países generadores de este tipo de tecnología más importantes en la actualidad son: China, India, Holanda, Francia, Gran Bretaña, Suiza, Italia, EE.UU., Filipinas y Alemania. Mientras que a nivel latinoamericano, se ha desarrollado tecnología propia en la Argentina para el tratamiento de vinazas, residuo de la industrialización de la caña de azúcar. En Brasil y Colombia se encuentran utilizando sistemas europeos bajo licencia. El avance de esta técnica ha permitido que importantes ciudades del mundo, como es el caso de Santiago de Chile en América Latina, incluyan un importante porcentaje de gas procedente de esta fuente en la red de distribución urbana de gas natural.

En Guatemala según (Dirección de productos forestales, FAO, 1995) en cuanto a materia de biodigestión anaeróbica, se han construido alrededor de 800 biodigestores tipo familiar en el área rural, pero estos no han sido operados correctamente y se han aprovechado los beneficios del bioabono más que los propiamente energéticos. Desde 2011 la empresa Industrias de Biogás (Inbio) trabaja en la generación de energía a través de la captación de metano en pozos dentro del vertedero de la zona 3 de la capital (Prensa Libre, 2011). Asimismo, empresas privadas como Empacadora Toledo busca la independencia energética utilizando el 100 % de la energía eléctrica por medio de biodigestores (El Periódico, 2010).

Los rumiantes poseen un sistema digestivo que tiene la capacidad de aprovechar y convertir material fibroso, en alimentos de alta calidad nutritiva. Sin embargo, este mismo sistema digestivo también produce metano, un potente gas con efecto invernadero que contribuye con aproximadamente el 18 % del calentamiento global ocasionado por actividades productivas con animales domésticos, superado sólo por el dióxido de carbono.

Este gas tiene un potencial de calentamiento global de 23, lo que significa que en una media de tiempo de 100 años cada kilogramo de metano calienta la Tierra 23 veces más que la misma masa de dióxido de carbono. Los procesos en la digestión y defecación del ganado bovino representan el 12,4 % de las emisiones de gas metano en la Tierra (58 millones toneladas/año) (González F, 2010).

El metano es un combustible limpio renovable y puede ser utilizado para la generación de energía eléctrica si se utiliza de manera responsable y con un diseño ingenieril adecuado.

En el caso de la ganadería, el estiércol producido contiene materia orgánica, la cual bajo condiciones anaeróbicas se convierte a biogás.

La necesidad de alternativas de producción energética en Guatemala, crea 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 es de importancia para sustituir las tradicionales fuentes energéticas no renovables, escasas y costosas, convirtiendo la actividad ganadera del país en una actividad económica más rentable y paralelamente contribuirá a la reducción de gases de efecto invernadero.

3. OBJETIVOS

General

Desarrollar un sistema de generación de energía eléctrica para autoconsumo a partir de la combustión de gas metano producido por la fermentación anaeróbica del estiércol bovino en una finca del municipio de Taxisco del departamento de Santa Rosa, Guatemala.

Específicos

1. Determinar la cantidad de metano producido mensualmente por las actividades ganaderas, en una finca del municipio de Taxisco del departamento de Santa Rosa, Guatemala.
2. Diseñar un sistema de biodigestión que permita reducir las emisiones de gases de efecto invernadero producidos mensualmente, en una finca del municipio de Taxisco del departamento de Santa Rosa, Guatemala.
3. Determinar qué porcentaje de la demanda de energía eléctrica en una finca del municipio de Taxisco del departamento de Santa Rosa, Guatemala, se puede generar a través de la utilización de la combustión de gas metano, producido por la fermentación de estiércol bovino.

4. JUSTIFICACIÓN

La actividad ganadera se encuentra generalizada en todo el país, la misma representa una parte importante en la generación de empleo directo y permanente en el área rural y en la agroindustria relacionada.

Desde 2008 la actividad ganadera en la finca sujeta a estudio, afronta diversos problemas productivos, falta de apoyos, competencia desleal de productores extranjeros y riesgos, además, de bajos precios de los productos ganaderos como la leche y la carne.

Es precisamente con estos antecedentes y las limitantes de no poder desarrollar grandes proyectos que involucren infraestructuras que puedan afectar el ecosistema de la localidad, es que el presente trabajo está enfocado a tratar de encontrar una solución viable para mejorar la calidad de vida de los habitantes de la finca, a través de la implementación de un pequeño sistema de generación de energía eléctrica a partir de estiércol bovino que puede ser producido en la finca, siendo este el elemento fundamental para la producción del gas metano, materia prima básica para la generación de electricidad por medio de una turbina a vapor.

El hecho de que la energía generada pueda dirigirse al autoconsumo crea una oportunidad de desarrollo sostenible para este lugar a partir de los recursos renovables disponibles, así también, contribuye a la mitigación del impacto ambiental ocasionado por la actividad ganadera mediante el control de las emisiones de gas metano que son liberadas al ambiente por medio del estiércol bovino.

5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El proyecto pretende utilizar la ventaja de que la actividad ganadera genera gran acumulación de excretas, las cuales no reciben el tratamiento adecuado causando en la actualidad contaminación al ambiente y el desperdicio de una materia prima para la autogeneración de energía eléctrica a partir de la fermentación anaeróbica del estiércol bovino.

Se plantea como una temática importante el evaluar alternativas de producción energética por tecnología de biodigestores, aprovechando los desechos sólidos generados, que sustituyan las fuentes energéticas tradicionales, escasas y costosas, y así convertir la actividad ganadera que se desarrolla en la finca, de ser posible, en una operación económica rentable y que paralelamente contribuya a la reducción de gases de efecto invernadero.

Una vez formulado el planteamiento del problema, se formulan las siguientes interrogantes, ¿es posible desarrollar un sistema de generación de energía eléctrica para autoconsumo a partir de la combustión de gas metano producido por la fermentación anaeróbica del estiércol bovino originado en la finca?, ¿cuál es la cantidad de metano producido mensualmente por la actividad ganadera en la finca?, ¿cuál es el diseño de biodigestión más eficiente que permita la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero producidos mensualmente en la finca?, ¿qué porcentaje de la demanda de energía eléctrica de la finca se puede generar a través de la utilización de la combustión de gas metano?

6. ALCANCE

La presente investigación es de tipo descriptivo cuantitativo y pretende determinar la factibilidad del desarrollo de un sistema de generación de energía eléctrica a través de la combustión de gas metano en una finca ubicada en el municipio de Taxisco del departamento de Santa Rosa; mediante la recolección y medición de variables que determinan el diseño del sistema, tales como: cantidad de kilogramos de metano producido, temperatura de trabajo y tiempo de retención de mezcla.

Los alcances están enfocados especialmente a nivel nacional y en diferentes áreas siendo estas:

- Fincas ganaderas con tipología de producción de bajo insumo.
- Proyectos de investigación tanto de la Escuela de Postgrado como de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Egresados y estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Biogás

Es un gas que se genera en medios naturales por reacciones de biodegradación y está compuesto cerca de 60 % de metano (CH₄) y 40 % de bióxido de carbono (CO₂), asimismo, contiene pequeñas cantidades de otros gases, entre ellos 1% de ácido sulfhídrico (H₂S), hidrógeno (H₂), nitrógeno (N₂) y oxígeno (O₂). Es un poco más liviano que el aire, posee una temperatura de inflamación de 700 grados centígrados y su llama alcanza una temperatura de 870 grados Centígrados (Alcívar Gonzalez & Farías Jaen, 2007).

El metano es el gas que le confiere las características combustibles al mismo, ya que con un contenido de metano menor de 50 %, el biogás deja de ser inflamable. (Alcívar Gonzalez & Farías Jaen, 2007) sostiene “El poder calórico promedio de un metro cúbico de biogás es de cinco mil kilocalorías, lo que permite generar entre 1,3 - 1,6 kWh, lo cual equivale a medio litro de petróleo, aproximadamente”.

El biogás se genera a partir de la digestión anaerobia, mediante bacterias de fermentación que se encargan de descomponer la materia orgánica, metabolismo que no necesita del oxígeno.

El mismo puede ser utilizado como cualquier otro combustible, tanto para la cocción de alimentos, modificando las cocinas y calentadores para la sustitución de la leña, el queroseno, el gas licuado, etcétera, como para el alumbrado, mediante lámparas adaptadas al biogás. Mezclas de biogás con aire, en una relación 1:20, forman un gas detonante altamente explosivo, con un octanaje que oscila entre 100 y 110, lo cual permite que también sea empleado como combustible en motores de combustión interna adaptados. Sin embargo, posee baja velocidad de encendido, lo que crea una desventaja al respecto (Alcívar Gonzalez & Farías Jaen, 2007).

7.1.1. Fermentación anaeróbica

(Hilbert J. A., 2006) sostiene que “la fermentación anaeróbica es un proceso natural que ocurre en forma espontánea en la naturaleza y forma parte del ciclo biológico. De esta forma podemos encontrar el denominado "gas de los pantanos" que brota en aguas estancadas, el gas natural metano) de los yacimientos petrolíferos, así como, el gas producido en el tracto digestivo de los rumiantes como los bovinos. En todos estos procesos intervienen las denominadas bacterias metanogénicas”. Dichas bacterias son las encargadas de digerir la materia orgánica y devolver al medioambiente los elementos básicos para reiniciar el ciclo.

El proceso de fermentación se compone de tres fases diferenciadas en el proceso de degradación del alimento de los microorganismos (Flotats, Campos, & Bonmatí, 1997).

7.1.1.1. Fase de hidrólisis

En esta etapa la materia orgánica es hidrolizada por la acción de enzimas producidas por bacterias hidrolíticas, rompiendo y transformando las cadenas de estructuras carbonadas haciéndolas más cortas y simples (ácidos orgánicos) liberando hidrógeno y dióxido de carbono.

7.1.1.2. Fase de acidificación

Esta etapa los compuestos simples (Soluciones Prácticas, 2004) la llevan a cabo las bacterias acetogénicas y realizan la degradación de los ácidos orgánicos llevándolos al grupo acético $\text{CH}_3\text{-COOH}$ y liberando como productos hidrógeno y dióxido de carbono. Esta reacción es endoenergética pues demanda energía para ser realizada y es posible gracias a la estrecha relación simbiótica con las bacterias metanogénicas que substraen los productos finales del medio minimizando la concentración de los mismos en la cercanía de las bacterias acetogénicas.

Esta baja concentración de productos finales es la que activa la reacción y actividad de estas bacterias, haciendo posible la degradación manteniendo el equilibrio energético (Textos Científicos, 2005).

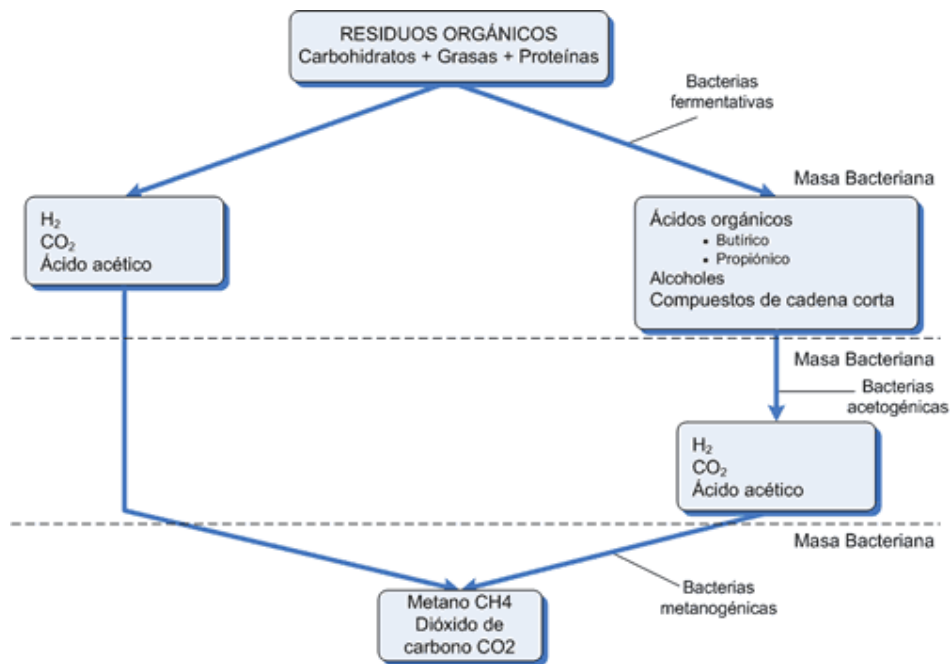
7.1.1.3. Fase metanogénica

Las bacterias intervinientes en esta etapa pertenecen al grupo de las achibacterias y poseen características únicas que las diferencian, por lo cual se cree que pertenecen a uno de los géneros más primitivos de vida colonizadoras de la superficie terrestre.

La transformación final cumplida en esta etapa tiene como principal substrato el acético junto a otros ácidos orgánicos de cadena corta y los productos finales liberados están constituidos por el metano y el dióxido de carbono (Textos Científicos, 2005).

El siguiente gráfico resume las distintas características de cada una de las etapas vistas que por simplificación se han agrupado en dos fases (ácida que involucra la de hidrólisis y acidificación y la metanogénica), con los principales compuestos químicos intervinientes.

Figura 1. **Etapas fermentación anaeróbica**



Fuente: Textos científicos. <http://www.textoscientificos.com/energia/fermentacion>.

[Consulta 23 de enero de 2013.]

La combinación del reciclado de residuos animales con el cultivo de abonos verdes puede proporcionar el nitrógeno necesario para la tierra agrícola. El reciclado puede hacerse mediante digestión anaeróbica, pues el contenido relativo de nitrógeno es mayor en el estiércol digerido que en el fresco. El lodo remanente en el digestor es una alternativa para mejorar los suelos hortícolas. Además este proceso permite obtener metano, un combustible gaseoso. La metanogénesis ocurre naturalmente en el rumen de los herbívoros (Alcívar Gonzalez & Farías Jaen, 2007).

7.1.2. Rumen

Los rumiantes son mamíferos herbívoros cuyo estómago, se encuentra formado por cuatro partes: panza, rumen o herbario; redcilla; libro o bonete; y cuajar o abomaso.

El rumen tiene un tamaño relativamente grande, con una capacidad de 100 a 150 litros en una vaca o 6 litros en una oveja, y se encuentra a una temperatura y acidez constantes (39 °C, pH 6,5). El forraje llega al rumen o panza, mezclado con la saliva que contiene bicarbonato y allí es sometido a un movimiento rotatorio durante el cual ocurren las fermentaciones. Esta acción peristáltica facilita la adherencia microbiana al material celulósico suspendido (Alcívar Gonzalez & Farías Jaen, 2007).

El alimento permanece en el rumen de nueve a doce horas. El fluido ruminal contiene gran cantidad de células, entre ellas 1,010 a 1,011 bacterias por mililitro. Las bacterias y los hongos celulolíticos actúan produciendo el disacárido celobiosa y glucosa. Esta experimenta una acción bacteriana en la que se forman principalmente los ácidos acético, propiónico y butírico, dióxido de carbono y metano. Los ácidos grasos atraviesan la pared del rumen y pasan

a la sangre. Desde allí van a los tejidos donde son utilizados como la principal fuente de energía.

Además los microorganismos del rumen sintetizan aminoácidos y vitaminas esenciales para el animal. La masa de forraje pasa gradualmente a la redécilla donde se forman unas porciones llamadas rumias que regresan a la boca y son masticadas otra vez. Cuando esta masa sólida queda bien fragmentada es engullida de nuevo pero pasa directamente al libro y termina en el cuajar, donde las condiciones son ácidas y allí se inicia un proceso digestivo que continua en el intestino.

Muchas de las células microbianas formadas en el rumen son digeridas y constituyen la principal fuente de proteínas y vitaminas del animal, dado que la pastura es un alimento deficiente en proteínas (Alcívar Gonzalez & Farías Jaen, 2007).

7.1.3. Aprovechamiento energético

Los gases de vertedero que se recuperan pueden: quemarse o utilizarse para la recuperación de energía en forma de electricidad.

Actualmente, la generación de energía eléctrica parece ser la alternativa más usada para controlar el gas de vertedero. No obstante, su uso se ve limitado a aquellos vertederos donde se puede demostrar que es beneficioso para el ambiente a la vez que económicamente viable. Para cumplir con los criterios financieros, se debe verificar antes que nada, que el riesgo financiero es nulo (World Energy Council, 1997).

Cada vertedero, dependiendo de la modalidad de explotación, las condiciones climáticas, las infraestructuras, etcétera, dará un rango de valores para los parámetros más importantes de los que dependerán, en buena medida, las posibilidades del aprovechamiento energético del biogás (World Energy Council, 1997).

El aprovechamiento energético del biogás, ya sea procedente de la desgasificación de un vertedero (o de una planta de biometanización) se hará mediante la utilización como combustible para generación de energía eléctrica. La electricidad vertida a la red se venderá acogiendo al Régimen Especial de Producción Eléctrica (RD 2818/98), sobre producción de energía eléctrica por medio de energías renovables, (Alcívar Gonzalez & Farías Jaen, 2007).

La proporción de metano es la que determina el poder calorífico del biogás. El biogás de un vertedero es rico en metano y por ello resulta muy adecuado para la producción de energía eléctrica. No obstante, su poder calorífico es hasta un 50 % inferior al del gas natural, por lo que su aprovechamiento requiere la utilización de motores y turbinas de gas muy desarrollados tecnológicamente. Por este motivo en aquellos casos en los volúmenes de biogás son bajos se suele optar por utilizarlo como carburante en una caldera para obtener energía térmica (Alcívar Gonzalez & Farías Jaen, 2007).

7.1.4. Ventajas de la utilización

Entre las ventajas más importantes se pueden mencionar (Arce González, 2011):

- Su producción es renovable.

- Su proceso de producción primaria y elaboración industrial determina un balance de carbono menos contaminante que los combustibles fósiles.
- Cumple con los requisitos de la EPA (Environmental Protection Agency) para los combustibles alternativos.
- Puede emplearse puro o combinado con los combustibles fósiles en cualquier proporción. No contiene azufre y por tanto no genera emanación de este elemento, las cuales son responsables de las lluvias ácidas.
- Mejor combustión, que reduce el humo visible del arranque en un 30 %. Cualquiera de sus mezclas reduce en proporción equivalente a su contenido las emanaciones de dióxido de carbono y partículas e hidrocarburos aromáticos. Dichas reducciones están en el orden del 15 % para los hidrocarburos, del 18 % para las partículas en suspensión, del 10 % para el óxido de carbono y del 45 % para el dióxido de carbono. Estos indicadores se mejoran notablemente si se adiciona un catalizador.
- Los derrames de este combustible en las aguas de ríos y mares resultan menos contaminantes y letales para la flora y fauna marina que los combustibles fósiles.
- Volcados al ambiente se degradan más rápidamente que los combustibles fósiles.
- Su combustión genera menos elementos nocivos que los combustibles tradicionales reduciendo así las posibilidades de producir cáncer.
- Es menos irritante para la epidermis humana.

- Actúa como lubricante de los motores prolongando su vida útil.
- Su transporte y almacenamiento resulta más seguro que el de los petroderivados ya que posee un punto de ignición más elevado.

Por tanto, se puede indicar que sus ventajas son (Arce González, 2011):

- Desde el punto de vista ambiental, la utilización de biocarburantes contribuye a la reducción de emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero a la atmósfera. Concretamente, el biodiésel no emite dióxido de azufre, lo cual ayuda a prevenir la lluvia ácida y disminuye la concentración de partículas en suspensión emitidas, de metales pesados, de monóxido de carbono, de hidrocarburos aromáticos policíclicos y de compuestos orgánicos volátiles. El bioetanol, en comparación con la gasolina, reduce las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos.
- Además, al ser fácilmente biodegradables, los biocarburantes no inciden negativamente en la contaminación de suelos. En última instancia, ayudan a la eliminación de residuos en los casos en que los mismos se utilizan como materia prima en la fabricación de biocarburantes (por ejemplo, los aceites usados en la fabricación de biodiésel).
- Desde el punto de vista energético, los biocarburantes constituyen una fuente energética renovable y limpia. Además, su utilización contribuye a reducir la dependencia energética de los combustibles fósiles y otorga una mayor seguridad en cuanto al abastecimiento energético.

- Desde el punto de vista socioeconómico, los biocarburantes constituyen una alternativa para aquellas tierras agrícolas afectas a la Política Agrícola Común (PAC). De esta forma, se fijaría la población en el ámbito rural, manteniendo los niveles de trabajo y renta; y fomentando la creación de diferentes industrias agrarias.
- La captación de gases de vertedero es interesante no sólo desde el punto de vista energético sino también desde un punto de vista medioambiental, ya que el metano es uno de los gases que favorecen el efecto invernadero con una acción 21 veces superior al dióxido de carbono.
- La reducción de las emisiones de metano a la atmósfera es uno de los aspectos más considerados en las numerosas cumbres mundiales organizadas para tratar de minimizar el efecto invernadero en el planeta.
- Otra repercusión es la obtención de energía renovable al disponer de un recurso energético alternativo a los hidrocarburos.
- Además, aprovechar el gas evita los malos olores provocados por el ácido sulfhídrico que contiene. Por eso, algunos vertederos simplemente queman biogás en antorchas sin aprovecharlo como fuente de energía, en un intento de minimizar su impacto negativo sobre el ambiente.

7.2. Biodigestor

Los biodigestores son depósitos-tanques en los que se produce la digestión anaerobia aprovechando el recurso biomasa, en este caso guano de animales. A grandes rasgos se pueden definir como recipientes o tanques que permiten la carga (afluente) de substratos (biomasa) y descarga (efluente) de bioabono y poseen un sistema de recolección y almacenamiento de biogás para su aprovechamiento energético (Alcívar Gonzalez & Farías Jaen, 2007).

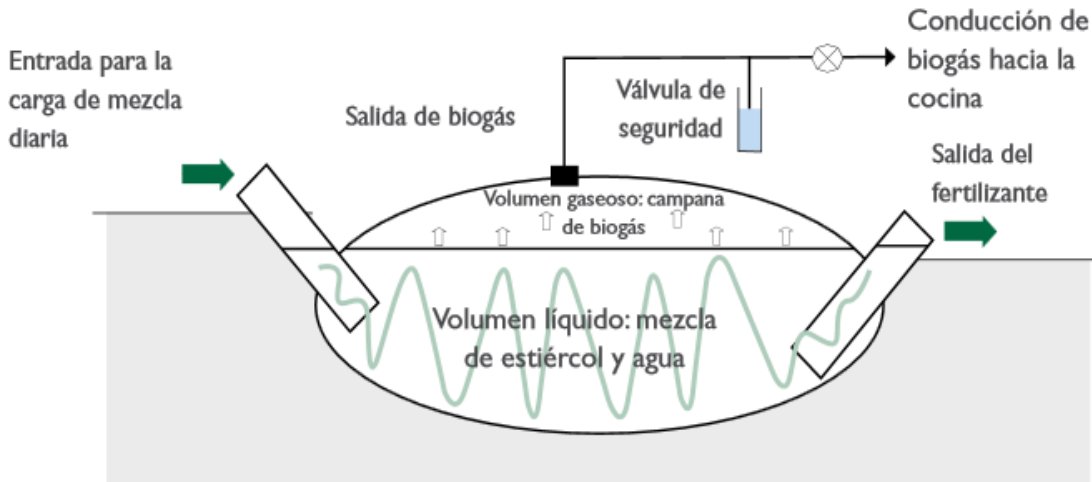
Los biodigestores son apropiados para las condiciones técnicas y posibilidades económicas de los países desarrollados y subdesarrollados.

La tecnología del biogás está bien adaptada a las exigencias ecológicas, ambientales y económicas del futuro. Es una tecnología de avanzada y de mucha aceptación por tratarse del aprovechamiento de energías renovables (Alcívar Gonzalez & Farías Jaen, 2007).

El biodigestor es una forma barata y fácil de obtención de energía que tiene gran potencial para ser desarrollada y utilizada ampliamente.

Un biodigestor o planta de biogás se compone de un tanque de homogenización o carga, una bomba (opcional), el tanque de biodigestión, un mezclador o agitador, tuberías de captación de biogás, el recipiente para almacenar biogás (puede estar integrado en el mismo biodigestor), tanque de descarga, tuberías y válvulas de seguridad, cierre y desagües, filtro de remoción de H₂S, quemadores de biogás, equipos para combustión (cocinas, incineradores, etcétera) y generadores de energía eléctrica o calor (Arce González, 2011).

Figura 2. **Esquema básico de un biodigestor**



Fuente: MARTÍ HERRERO, Jaime. Biodigestores Familiares Guía de Diseño y Manual de Instalación. p. 28.

7.2.1. Tipos de biodigestores

Las plantas para la producción de biogás según (Guevara Vera, 1996) se pueden clasificar en:

- Discontinuas o de Batch, estas son cargadas una vez y vaciadas por completo después de un tiempo de retención; el abastecimiento continuo de gas con estas plantas se logra con depósitos de gas o con varios digestores funcionando a la vez.
- Continuas, estas se cargan y descargan en forma periódica, por lo general diariamente, el material de fermentación debe ser fluido y uniforme.

Las plantas continuas son apropiadas para viviendas rurales donde el mantenimiento se integra a la fajina diaria y la producción de gas es mayor y uniforme. El diseño y la construcción de la planta, así como, los materiales a utilizar, deberán ser elegidos en función de la producción deseada, las características del suelo, el tipo de carga y la inversión que se desea hacer (Guevara Vera, 1996).

Se debe tener en cuenta también las características climáticas del lugar, pues como se vio, la digestión anaerobia es muy sensible a los cambios de temperatura y necesita de por lo menos 30 °C para tener una producción aceptable (Martí Herrero, 2008).

Con respecto a este tema, en zonas frías de Europa, la producción de biogás disminuye hasta un 50 % en el invierno, por lo que se ha optado por la calefacción de las plantas, requiriendo esta, más o menos un 30% de la producción de biogás.

Hasta ahora no se ha desarrollado un método totalmente eficiente de calefacción en lo que se refiere a instalaciones sencillas. El proceso de digestión en sí, no es exotérmico, por lo que se debe aportar calor para mantener su temperatura (Martí Herrero, 2008).

7.2.2. Criterios de diseño de un biodigestor

De acuerdo (Guevara Vera, 1996), los siguientes son los aspectos a tener en cuenta en el diseño, planificación y construcción de un biodigestor:

- Factores humanos
 - Idiosincrasia.
 - Necesidad, la cual puede ser sanitaria, energía y de fertilizantes.
 - Recursos disponibles de tipo económicos, materiales de construcción, mano de obra, utilización del producto, área disponible.
 - Disponibilidad de materia prima, si se cuentan con desechos agrícolas, desechos pecuarios, desechos domésticos, desechos urbanos, desechos industriales.
- Factores biológicos
 - Enfermedades y plagas tanto humanas como pecuarias y agrícolas.
- Factores físicos
 - Localización, la ubicación si es en zona urbana, rural o semiurbana y la geografía aspectos como la latitud, longitud y altitud.

- Climáticos dentro de estos aspectos están las temperaturas máximas y mínimas, la precipitación pluvial, la humedad ambiental, la intensidad solar, los vientos su intensidad y dirección.
- Vías de acceso.
- Topografía, teniendo en cuenta el declive del suelo: si es plano, ondulado o quebrado.
- Suelos con sus características como la textura, estructura, nivel freático y capacidad agrológica.
- Factores de construcción
 - Técnicas de construcción si es de tierra compactada, cal y canto o ladrillo (barro cocido, suelo-cemento, silico-calcáreo), planchas prefabricadas, ferrocemento, concreto, módulos prefabricados.
- Factores utilitarios
 - Función principal, si se construye de manera experimental, demostrativa o productiva.
 - Usos, si el uso es de tipo sanitario, energético, fertilizante, integral.
 - Organizativo si el biodigestor se va a construir a escala doméstica, para grupo familiar, comunitario o empresas.

- Capacidad
- Operación de la instalación contemplando aspectos como el funcionamiento del pretratamiento, la mezcla, la carga y controles de PH, obstrucciones de líquidos, sólidos y gases: las descargas de efluentes tanto líquidas como gaseosas y de lodos; el almacenamiento de los líquidos, sólidos y gases; la aplicación de líquidos por bombeo, por tanques regadores o arrastre por riego; los sólidos que están disueltos en el agua y los sólidos en masa y por último los gases utilizados para la cocción, iluminación e indirectamente en los motores.

Con el objetivo de disminuir el tamaño de los digestores se han utilizado los productos orgánicos que brindan mayor cantidad de biogás por unidad de volumen; algunos de ellos son: la excreta animal, la cachaza de la caña de azúcar, los residuales de mataderos, destilerías y fábricas de levadura, la pulpa y la cáscara del café, así como, la materia seca vegetal (Alcívar Gonzalez & Farías Jaen, 2007).

Según (Alcívar Gonzalez & Farías Jaen, 2007), el principal objetivo del diseño de un digestor es alcanzar un alto contenido de biomasa dentro del mismo que permita una alta producción de biogás y una alta reducción de la materia orgánica por unidad de volumen del digestor.

Antes de comenzar la construcción de cualquier modelo, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La instalación y mantenimiento debe ser socialmente aconsejable, técnicamente posible y económicamente justificable.

- El biogás substituirá a la leña, el carbón o algún derivado del petróleo y la digestión contribuirá a reducir la polución, proveyendo además un biofertilizante.
- El modelo elegido debe ser el conveniente para las condiciones climáticas locales.
- El proyecto debe ser elaborado según la materia prima disponible y la demanda de biogás diaria. También hay que tener en cuenta la existencia de otras fuentes alternativas de energía en la propiedad.

Las consideraciones dependientes del tamaño para el diseño de una planta de biogás en áreas rurales incluyen: la cantidad y el tipo de desperdicios disponibles, las dimensiones de los trozos o partículas, el requerimiento de calefacción, la necesidad de agitación, la disponibilidad de materiales de construcción.

Bajo condiciones ambientales óptimas para la digestión, la cantidad de gas producido es proporcional a la cantidad de residuos agregados. Los materiales que pueden ser degradados fácilmente se estabilizarán más rápido que los resistentes, necesitando un tiempo de retención más corto y un digester de menor tamaño.

7.2.3. Construcción de un biodigestor

Un eficiente manejo del estiércol de bovinos, además del agua de lavado de las instalaciones, se lo realiza con la construcción de un biodigestor que es un recipiente cerrado o tanque el cual puede ser construido con diversos materiales como ladrillo y cemento, metal o plástico.

El biodigestor, de forma cilíndrica o esférica posee un ducto de entrada a través del cual se suministra la materia orgánica (por ejemplo, estiércol animal producto del lavado de instalaciones) en forma conjunta con agua y un ducto de salida en el cual el material ya digerido por acción bacteriana abandona el biodigestor (Alcívar Gonzalez & Farías Jaen, 2007).

Los materiales que ingresan y abandonan el biodigestor se denominan afluente y efluente respectivamente. El proceso de digestión que ocurre en el interior del biodigestor libera la energía química contenida en la materia orgánica, la cual se convierte en biogás (Alcívar Gonzalez & Farías Jaen, 2007).

7.3. Formación y utilización del biogás

Hasta hoy y desafortunadamente, de un futuro no tan cercano, el 90 % de las necesidades energéticas de nuestro planeta son satisfechas con la utilización de combustibles fósiles (petróleo, gas, carbón), todos ellos extinguidos, fuertemente contaminantes y utilizados en forma ineficiente, por el interés predominante de la producción de energía sobre el de su efecto ecológico (World Energy Council, 1997).

Como es conocido en los últimos años, las fuentes alternativas de energía han ido adquiriendo una importancia cada vez mayor en Cuba, lo cual, básicamente por razones energéticas y ambientales, también es una tendencia mundial. El déficit de energía que sufre el mundo actual y en particular en Cuba, tiene una situación cada vez menos favorable. Las fuentes tradicionales de energía (combustibles fósiles, electricidad, etcétera) no parecen ser solución sino a muy largo plazo.

Si se traslada este déficit a las zonas rurales, el problema se agrava aún más, ya que la carencia de la energía obligará a los campesinos a satisfacer esta necesidad, utilizando a gran escala la leña y desperdicios agrícolas (estiércol y residuos de cosecha) (World Energy Council, 1997).

Este problema plantea la necesidad de encontrar una tecnología apropiada, utilizando recursos locales disponibles como son los residuos orgánicos (heces humanas, estiércoles y plantas), los cuales pueden ser usados como simple medio para producir energía y biofertilizantes por medio de plantas de biogás. De esta manera se mejorará la vida de los campesinos, se incrementará la producción agrícola y se preservará el ambiente.

Los biodigestores se constituyen en una valiosa alternativa para el tratamiento de los desechos orgánicos de las explotaciones agropecuarias pues permiten: disminuir la carga contaminante, mejorar la capacidad fertilizante del material, eliminar los malos olores y, generar un gas combustible denominado biogás el cual tiene diversos usos (Alcívar Gonzalez & Farías Jaen, 2007).

De acuerdo con (Arce González, 2011), la utilización de los biodigestores además de permitir la producción de biogás ofrece enormes ventajas para la transformación de desechos:

- Mejora la capacidad fertilizante del estiércol. Todos los nutrientes tales como nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, así como, los elementos menores son conservados en el efluente. En el caso del nitrógeno, buena parte del mismo, presente en el estiércol en forma de macromoléculas es convertido a formas más simples como amonio (NH_4^+), las cuales pueden ser aprovechadas directamente por la planta. Debe notarse que

en los casos en que el estiércol es secado al ambiente, se pierde alrededor de un 50 % del nitrógeno.

- El efluente es mucho menos oloroso que el afluente.
- Control de patógenos.

7.3.1. Utilización y usos del biogás

Puede ser utilizado en la finca o en el entorno urbano donde se implemente el sistema. Con el uso del biogás se puede sustituir a la electricidad, al gas propano o al diésel como fuentes energéticas en la producción de electricidad, calor o refrigeración. En el sector rural el biogás puede ser utilizado como combustible en motores de generación eléctrica para autoconsumo de la finca o para vender a otras. Puede también usarse como combustible para hornos de aire forzado, calentadores y refrigeradores de absorción (Alcívar Gonzalez & Farías Jaen, 2007).

Las fincas o instalaciones agropecuarias tienen la posibilidad de suplir la totalidad de sus requerimientos energéticos si se recolectan todos sus residuos orgánicos y se utilizan en la producción de biogás.

En efecto, a partir del biogás se puede obtener energía eléctrica para alimentar sistemas de aire acondicionado o calentamiento ambiental de uso temporal; se puede tener iluminación eléctrica o a gas durante la noche; se puede hacer funcionar un sistema de ordeño con una frecuencia de dos veces al día durante 4 horas o tener la energía suficiente para ventilar ocasionalmente porquerizas, de acuerdo con el estado del clima o según la temporada (Arce González, 2011).

Debido a que la producción de biogás es permanente durante todo el año, aunque no siempre constante debido a fenómenos climáticos como las estaciones, es más rentable tener instalaciones que consuman gas permanentemente que utilizarlo ocasionalmente o por cortos períodos, de otra parte es de tener en cuenta que la conversión de aparatos al funcionamiento con gas es actualmente muy sencilla. Las fincas de gran tamaño estarán en mayor capacidad de compensar la producción de energía del biogás con su utilización que las fincas pequeñas (Alcívar Gonzalez & Farías Jaen, 2007).

Requerimientos eléctricos: los aparatos de uso constante durante todo el año son las bombas eléctricas, ventiladores, motores, compresores y la iluminación, por lo que la producción de electricidad a partir del biogás es una opción interesante para su utilización en fincas, instalaciones agropecuarias y muchos sectores urbanos (Alcívar Gonzalez & Farías Jaen, 2007).

8. ÍNDICE DE CONTENIDO PROPUESTO PARA EL INFORME FINAL

El presente estudio se centra en el desarrollo de un sistema de generación de energía eléctrica para autoconsumo a partir de la combustión de gas metano producido por la fermentación anaeróbica del estiércol bovino en una finca del municipio de Taxisco del departamento de Santa Rosa, Guatemala.

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

GLOSARIO

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

JUSTIFICACIÓN

OBJETIVOS

1. CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DEL BIOGAS

1.1. ¿Qué es biogás?

1.1.1. Metano

1.1.2. Carbono

1.1.3. Dióxido de carbono

1.2. Fermentación anaeróbica

1.3. Aprovechamiento energético

1.4. Comparación del biogás con otros combustibles

1.5. Ventajas de la utilización

- 2. **CAPÍTULO 2: BIODIGESTOR**
 - 2.1. Generalidades
 - 2.2. Características del digestor
 - 2.3. Tipos de biodigestores
 - 2.3.1. Digestor por lote
 - 2.3.2. Digestor de régimen semicontinuo
 - 2.3.3. Digestor horizontal de desplazamiento
 - 2.3.4. Digestor de régimen continuo
 - 2.3.5. Otros tipos de digestores
 - 2.4. Diseño de un biodigestor
 - 2.5. Construcción de un biodigestor

- 3. **CAPÍTULO 3: FORMACIÓN Y UTILIZACIÓN DEL BIOGAS**
 - 3.1. Emisiones de metano
 - 3.2. Producción de biogás
 - 3.2.1. Generalidades
 - 3.2.2. Parámetros que influyen en la producción de biogás
 - 3.2.2.1. Temperatura
 - 3.2.2.2. Tiempo de retención
 - 3.2.2.3. Relación carbono/nitrógeno
 - 3.2.2.4. pH
 - 3.2.2.5. Agitación
 - 3.3. Utilización prevista

4. CAPÍTULO 4: DISEÑO SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

- 4.1. Cálculo consumo
- 4.2. Estudio biodigestor
- 4.3. Estudio generador
- 4.4. Diseño del sistema

ANÁLISIS DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

9. HIPÓTESIS

Es factible desarrollar un sistema de generación de energía eléctrica a través de la combustión de gas metano producido por la fermentación anaeróbica del estiércol bovino, que sea capaz de satisfacer un porcentaje de la demanda energética de la finca.

Variable independiente:

Cantidad de kilogramos de metano emitidos dentro del ámbito de la finca.

Variable dependiente:

Cantidad de kilovatios por hora generados a través de la utilización de biodigestores.

Indicadores:

- Kilovatios hora de energía eléctrica generados mensualmente.
- Kilogramos de metano emitidos a la superficie terrestre mensualmente.

10. MÉTODOS Y TÉCNICAS

La metodología de investigación para el diseño del biodigestor debido a su naturaleza descriptiva, será de tipo cuantitativa y estará dividida en tres etapas, según (Martí Herrero, 2008):

- Inicialmente se presentará el procedimiento de obtención y toma de mediciones, la cual consistirá en la observación científica de campo sobre la actividad ganadera de la finca para medir las variables independientes de diseño del biodigestor, tales como temperatura ambiente media del lugar y carga diaria de estiércol. La recolección de datos se realizará mediante un muestreo aleatorio simple.
- Dentro del procedimiento de diseño se presentarán los conceptos que se deben considerar en el diseño de un biodigestor; así como los parámetros que determinan el diseño, tales como: temperatura de trabajo y tiempo de retención de la mezcla durante el proceso de fermentación anaerobia.
- Con los datos de campo recolectados anteriormente, se tendrá la capacidad de diseñar el biodigestor en cuanto a volumen, pudiendo entonces determinar las dimensiones de longitud, diámetro y tamaño de la fosa donde se albergará el biodigestor. Para lo cual se utilizará un modelo de regresión múltiple como técnica de análisis de información, con el fin de predecir o estimar la variable dependiente del estudio, la cantidad de kWh generados a través de la utilización del biodigestor.

10.1. Obtención de datos y toma de mediciones

En esta sección se presentarán las metodologías para la obtención de datos, mediante la observación directa en campo de la actividad, utilizando un muestreo aleatorio simple para la recolección de estiércol, para su posterior análisis de composición química en laboratorio, tal como porcentaje de nitrógeno, fósforo y calcio, con el objetivo de calcular las emisiones de metano generadas en la finca en estudio.

Para calcular el tamaño de la muestra de estiércol definitiva se utilizará la siguiente ecuación:

$$n = \frac{N \times Z_{(\alpha/2)}^2 \times p \times q}{(d^2 \times N) + Z_{(\alpha/2)}^2 \times p \times q}$$

Ecuación 1, (Devore, 2005)

Donde:

n = tamaño de la muestra definitiva

N = tamaño de la población por proceso

p = proporción de éxito de la variable obtenida en un premuestreo

q = proporción de fracaso de la variable obtenida en un premuestreo

d = precisión del estimador de interés (en este caso, la proporción)

$Z_{(\alpha/2)}$ = valor tal que $P(|Z| < Z_{(\alpha/2)}) = 1 - \alpha$ es una variable con distribución normal estandarizada.

10.2. Conceptos de diseño de un biodigestor

El diseño de un biodigestor depende directamente de varios parámetros tales como: la temperatura ambiente media del lugar donde se vaya a instalar y el tiempo de retención de la mezcla dentro del biodigestor.

La temperatura marcará la actividad de las bacterias que digieren el estiércol y cuanto menor temperatura, menor actividad tendrán estas y por tanto será necesario que el estiércol esté más tiempo en el interior del biodigestor. De esta forma la temperatura marca el tiempo de retención.

Por otro lado, la carga diaria de estiércol determinará la cantidad de biogás producido por día. La carga de estiércol diaria, junto con el tiempo de retención (determinado por la temperatura), determinarán el volumen del biodigestor.

Una cualidad de esta tecnología es que es adaptable a muchas situaciones y su diseño puede considerar diferentes criterios:

10.2.1. Temperatura y tiempo de retención

En el proceso de digestión anaerobia son las bacterias metanogénicas las que producen, en la parte final del proceso, metano. Existen diferentes poblaciones de bacterias metanogénicas y cada una de ellas requiere una temperatura para trabajar de forma óptima.

Por ello, es necesario estimar un tiempo de retención según la temperatura a la que se trabaje.

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. Así, a menores temperaturas se requiere un mayor tiempo de retención que será necesario para que las bacterias que tendrán menor actividad, tengan tiempo de digerir el lodo y de producir biogás.

Tabla I. **Tiempo de retención según temperatura**

Región característica	Temperatura (°C)	Tiempo de retención (días)
Trópico	30	20
Valle	20	30
Altiplano	10	60

Fuente: MARTÍ HERRERO, Jaime. Biodigestores Familiares Guía de Diseño y Manual de Instalación. p. 27.

10.2.2. **Estiércol disponible**

De manera general, hay que calcular cuánto estiércol se dispone al día. En la siguiente tabla se muestra la producción de estiércol fresco diario para diferentes animales, por cada 100 kilogramos de peso del animal.

Tabla II. **Producción de estiércol fresco diario**

Ganado	Kg de estiércol fresco producido por cada 100 kg de peso del animal
Cerdo	4
Bovino	8
Caprino	4
Conejos	3
Equino	7
Humano adulto	0,4 kg por adulto
Humano niño	0,2 kg por niño

Fuente: MARTÍ HERRERO, Jaime. Biodigestores Familiares Guía de Diseño y Manual de Instalación. p. 28.

10.2.3. Carga de mezcla diaria

Todos los días hay que cargar el biodigestor con una carga de estiércol mezclada 1:4 con agua. De esta manera, una parte es de estiércol y cuatro de agua (Martí Herrero, 2008).

10.2.4. Volumen total de biodigestor

El volumen total del biodigestor ha de albergar una parte líquida y otra gaseosa. Normalmente se da un espacio del 75 % del volumen total a la fase líquida y del 25 % restante a la fase gaseosa.

10.2.5. Volumen líquido y gaseoso

El volumen líquido de un biodigestor será el resultado de multiplicar la mezcla diaria de carga por el tiempo de retención.

El volumen gaseoso equivale a un tercio del volumen líquido.

10.2.6. Producción de biogás

La producción de biogás diario será el resultado de multiplicar la carga de estiércol diaria por el número mágico. La estimación de este número mágico se realiza a través de los conceptos de sólidos totales y sólidos volátiles.

En la estimación se han considerado valores medios y por tanto el empleo de este número mágico sirve para tener una idea aproximada del volumen de biogás generado por día siempre que se cumplan los tiempos de retención adecuados a cada temperatura de trabajo.

Tabla III. **Producción de biogás**

Ganado	Número mágico (litros de biogás producidos por día por kilo de estiércol fresco cargado diariamente)
Cerdo	51
Bovino	35,3

Fuente: MARTÍ HERRERO, Jaime. Biodigestores Familiares Guía de Diseño y Manual de Instalación. p. 30.

10.3. Conceptos de dimensionamiento de un biodigestor

Conociendo el volumen total de un biodigestor se deberán determinar las dimensiones del mismo. Las dimensiones primeras a determinar son la longitud y radio del biodigestor.

10.3.1. Ancho de rollo y radio de la manga

El ancho de rollo determina el diámetro y radio de nuestro biodigestor. Según el ancho de los rollos más comunes en el mercado se encuentran:

Tabla IV. **Parámetros según el ancho de rollo**

Ancho de rollo (m)	Perímetro de la circunferencia (m)	Radio (m)	Diámetro (m)
1	2	0,32	0,64
1,25	2,5	0,40	0,80
1,50	3	0,48	0,96
1,75	3,5	0,56	1,12
2	4	0,64	1,28

Fuente: MARTÍ HERRERO, Jaime. Biodigestores Familiares Guía de Diseño y Manual de Instalación. p. 35.

10.3.2. Volumen de la manga, sección eficaz y longitud

El biodigestor es una manga de plástico amarrada por ambos extremos a una entrada y una salida. El volumen total de esta manga equivale al volumen de un cilindro (en metros cúbicos) que se calcula multiplicando $\pi \times r^2 \times L$, siendo $\pi=3,1416$, r el radio del tubo (en metros) y L la longitud del biodigestor (en metros).

Lo normal es primero obtener los resultados de $\pi \times r^2$ (sección eficaz) para cada uno de los anchos de rollos disponibles, para luego con estos valores, estimar la longitud necesaria para alcanzar el volumen total deseado.

Tabla V. **Sección eficaz según el ancho de rollo**

Ancho de rollo (m)	Sección eficaz ($\pi \times r^2$) (m ²)
1	0,32
1,25	0,50
1,50	0,72
1,75	0,97
2	1,27

Fuente: MARTÍ HERRERO, Jaime. Biodigestores Familiares Guía de Diseño y Manual de Instalación. p. 36.

Conociendo el volumen total del biodigestor y las secciones eficaces de los plásticos disponibles (según su ancho de rollo), es fácil determinar la longitud necesaria. Si el volumen del biodigestor es $\pi \times r^2 \times L$ y se conocen todos los parámetros excepto la longitud, despejando de la anterior fórmula se obtiene: $L = V_t / (\pi \times r^2)$. De esta manera se genera un cuadro en el que se ponen los resultados de la longitud para cada ancho de rollo.

Tabla VI. Longitud del biodigestor según el ancho de rollo

Ancho de rollo (m)	Sección eficaz ($\pi \times r^2$) (m ²)	Longitud del biodigestor (m)
1	0,32	$V_t/0,32$
1,25	0,50	$V_t/0,5$
1,50	0,72	$V_t/0,72$
1,75	0,97	$V_t/0,97$
2	1,27	$V_t/1,27$

Fuente: MARTÍ HERRERO, Jaime. Biodigestores Familiares Guía de Diseño y Manual de Instalación. p. 36.

10.3.3. Relación óptima entre longitud y diámetro del biodigestor

Según lo anterior, se tendrán diferentes posibilidades de longitudes y anchos de rollo para alcanzar el volumen total deseado. Los anchos de rollo más grandes exigirán menor longitud para alcanzar el volumen deseado. No conviene biodigestores demasiado cortos ni largos y para ello existe una relación óptima entre el diámetro y la longitud que es 7.

Esto significa que dividiendo la longitud estimada entre el diámetro de la manga, habrá que seleccionar las dimensiones del biodigestor que más se acerquen a una relación de 7. Esta relación es flexible en un rango de 5-10, siendo la mejor 7.

Tabla VII. **Relación óptima entre longitud y diámetro del biodigestor**

Ancho de rollo (m)	Longitud del biodigestor (m)	Diámetro del biodigestor (m)	L/d (óptimo de 7 en un rango de 5-10)
1	$Vt/0,32$	0,64	L/d
1,25	$Vt/0,5$	0,80	L/d
1,50	$Vt/0,72$	0,96	L/d
1,75	$Vt/0,97$	1,12	L/d
2	$Vt/1,27$	1,28	L/d

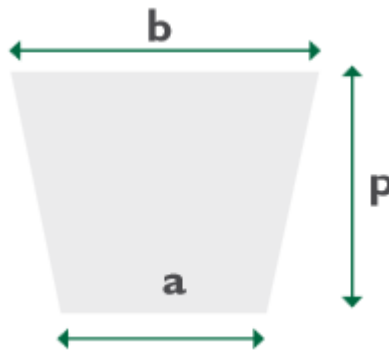
Fuente: MARTÍ HERRERO, Jaime. Biodigestores Familiares Guía de Diseño y Manual de Instalación. p. 37.

10.3.4. Dimensiones de la zanja del biodigestor

El diseño final del biodigestor requiere conocer las dimensiones de la zanja donde se acomodará el plástico tubular. La longitud de la zanja queda determinada por la longitud del biodigestor y la profundidad y ancho de la misma dependerán del ancho de rollo empleado en la construcción del biodigestor.

De forma general, se pueden emplear las siguientes dimensiones para la zanja:

Figura 3. Dimensiones biodigestor



Fuente: MARTÍ HERRERO, Jaime. Biodigestores Familiares Guía de Diseño y Manual de Instalación. p.37.

Tabla VIII. Dimensiones de la zanja

Dimensiones de la zanja según el Ancho de Rollo (AR)					
AR (m)	2	1,75	1,5	1,25	1
a(m)	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
b(m)	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
p(m)	1	0,9	0,8	0,7	0,6

Fuente: MARTÍ HERRERO, Jaime. Biodigestores Familiares Guía de Diseño y Manual de Instalación. p. 37.

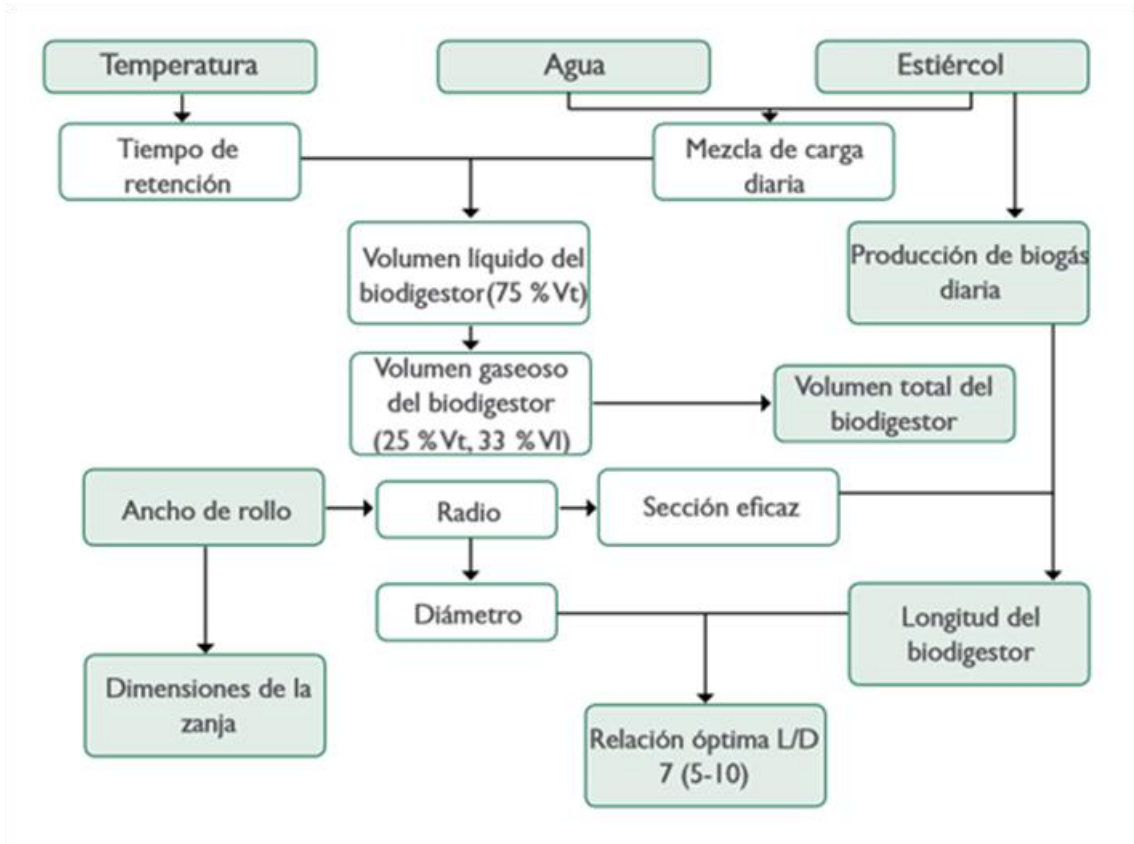
Hay que considerar que al alojar el biodigestor en la zanja, las paredes de esta sustentarán toda la presión del volumen líquido del biodigestor. La cúpula de biogás estará en la parte superior y ocupará un 25 % del volumen total.

Si se construye una zanja sin considerar el ancho empleado puede suceder que la cúpula de biogás sea demasiado pequeña o incluso grande. En caso de que la cúpula ocupe más de un 25 % del volumen, se estará restando volumen a la fase líquida y por tanto reduciendo el tiempo de retención.

10.3.5. Equilibrio hidráulico

El biodigestor es de flujo continuo y por tanto no es necesario vaciarlo normalmente a lo largo de su vida útil. Se produce un equilibrio hidráulico por el que cada día al realizar la mezcla de carga por la entrada, desplazará el lodo interior y rebosará por el otro extremo, la salida, la misma cantidad pero del material ya digerido. Por tanto, el rebalse o rebose del lodo interior, es definido por la altura de la boca del tubo de salida. Este nivel corresponderá, por tanto con la profundidad de la zanja, para que de esta manera, el lodo en el interior del biodigestor, alcance dicha altura y el volumen del líquido estimado corresponda con la realidad.

Figura 4. Esquema de metodología de diseño



Fuente: MARTÍ HERRERO, Jaime. Biodigestores Familiares Guía de Diseño y Manual de Instalación. p. 38.

11. RESULTADOS ESPERADOS

Con base a los diversos análisis metodológicos y bibliográficos efectuados, los resultados esperados son los siguientes:

- El diseño realista de un sistema eficiente de biodigestión del estiércol bovino que genere energía eléctrica para el autoconsumo de la finca en estudio.
- La cantidad de kilogramos de metano emitidos por el estiércol bovino dentro de la finca en estudio.
- La cantidad de kilovatios/hora mensuales de energía eléctrica que puede generar el sistema de biodigestión del estiércol.
- Presentación de beneficios económicos y ambientales para las autoridades y estudiantes.

12. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

FASE	ACTIVIDAD	Mayo				Junio				Julio				Agosto			
		S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
1	Visita a la finca																
	Entrevistas																
	Explicación a beneficiarios																
	Consultas																
2	Investigación																
	Mediciones																
	Estudio obtención biogás																
	Estudio sistema existente																
	Estudio de vías de acceso																
	Estudio de suelos																
3	Cálculo de consumo																
	Estudio biodigestor																
	Estudio generador																
	Diseño																
4	Cotizaciones																
	Evaluación Financiera																

13. RECURSOS NECESARIOS

RECURSOS HUMANOS	COSTO (Q)
Asesor	5 000,00
Ayudante Admón. (Encuestas y procesamiento datos)	1 500,00
TOTAL RRHH	6 500,00
MATERIALES E INSUMOS	COSTO (Q)
Entrevistas Impresas	500,00
Equipo recolección de muestras	1 200,00
TOTAL MATERIALES	1 700,00
GASTOS ADICIONALES	COSTO (Q)
Traslados	2 000,00
Exámenes de laboratorio	10 000,00
TOTAL GASTOS ADICIONALES	12 000,00
TOTAL	20 200,00

14. BIBLIOGRAFÍA

1. Alcívar Gonzalez, B. F., & Farías Jaen, C. (2007). Estudio para la Implementación de un Sistema de Generación de Energía Eléctrica Alternativo a Partir de Desechos Biodegradables. Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana de Guayaquil.
2. Arce Gonzalez, J. J. (2011). *Diseño de un Biodigestor para generar biogás y abono a partir de desechos orgánicos de animales aplicable a zonas agrarias del Litoral*. Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana.
3. Dirección de productos forestales, FAO. (1995). *Reunión regional sobre generación de electricidad a partir de biomasa*. Santiago Chile.
4. El Blog de la Energía Renovable. (2013). *El Blog de la Energía Renovable*. Recuperado el 2013 de 01 de 28, de <http://www.blogenergiasostenible.com/el-potencial-del-biogas-bajo-investigacion/>
5. El Periódico. (2010). El biogás, transformando el estiércol en energía limpia en Guatemala. *Summa*, 1.
6. Félix Figueroa, V. H. (2010). *El biogás, una alternativa energética*. Hermosillo, Sonora: Universidad de Sonora.

7. Flotats, X., Campos, E., & Bonmatí, A. (1997). *Aprovechamiento Energético de Residuos Ganaderos*. Lleida: Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo.
8. Global Energy Network Institute. (2009). *El Potencial de America Latina con Referencia a la Energía Renovable*.
9. González F, R. H. (2010). *Proyecciones de las emisiones de gases de efecto de invernadero*. Colombia.
10. Guevara Vera, A. (1996). *Fundamentos Básicos para el Diseño de Biodigestores Anaeróbicos Rurales*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente OPS.
11. Hilbert, J. A. (s.f.).
12. Hilbert, J. A. (2006). *Manual para la producción de biogás*. Buenos Aires: Instituto de Ingeniería Rural.
13. Martí Herrero, J. (2008). *Biodigestores Familiares Guía de Diseño y Manual de Instalación*. La Paz, Bolivia: Cooperación Técnica Alemana.
14. *Ministerio de Energía y Minas*. (01 de 01 de 2010). Recuperado el 25 de 02 de 2013, de www.mem.gob.gt
15. Prensa Libre. (28 de 3 de 2011). Empresa retoma plan para producir biogás en relleno. *Prensa Libre*, pág. 1.
16. *Proyecciones de las emisiones de gases de efecto de invernadero*. (s.f.).

17. Soluciones Prácticas. (2004). *Soluciones Prácticas*. Recuperado el 23 de 01 de 2013, de Soluciones Practicas: www.solucionespracticas.org.pe
18. Textos Científicos. (27 de 11 de 2005). *Fermentación anaeróbica*. Recuperado el 2013 de 01 de 23, de <http://www.textoscientificos.com/energia/fermentacion>
19. World Energy Council. (1997). *Member Committees*.