



DIRECCIÓN DE POSGRADOS

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN OPCIÓN AL GRADO
ACADÉMICO DE MAGISTER EN GESTIÓN DE ENERGÍAS

“Evaluación del potencial de biomasa residual del ganado porcino para el aprovechamiento energético en la Granja Porcina García en el Cantón La Maná, barrio Miraflores sector el Toquillal en el año 2016. Diseño de un biodigestor alternativo para este propósito”

Autor:

VILLACRES JIRON MAURICIO ADRIAN

Tutor:

Ph. D, RODRÍGUEZ BÁRCENAS, GUSTAVO

LATACUNGA – ECUADOR

Enero – 2016



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

UNIDAD DE POSGRADO

Latacunga – Ecuador

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de Miembros del Tribunal de Grado, aprueban el presente informe e Investigación de posgrados de la Universidad Técnica de Cotopaxi; por cuanto, el maestrante: Villacrés Jirón Mauricio Adrián, con el título de tesis: “EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE BIOMASA RESIDUAL DEL GANADO PORCINO PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO EN LA GRANJA PORCINA GARCÍA EN EL CANTÓN LA MANÁ, BARRIO MIRAFLORES SECTOR EL TOQUILLAL EN EL AÑO 2015. DISEÑO DE UN BIODIGESTOR ALTERNATIVO PARA ESTE PROPÓSITO”. Han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Defensa de Tesis.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, Junio – 2016.

Para constancia firman:

.....
Msc. Edwin Moreano
PRESIDENTE

.....
PhD Juan José La Calle
OPONENTE

.....
PhD Enrique Torres
MIEMBRO

.....
PhD Juan Mato
MIEMBRO

AVAL DEL DIRECTOR DE TESIS

En mi calidad de Tutor del Programa de Maestría en Gestión de Energías, nombrado por el Consejo de Posgrado.

CERTIFICO:

Que: analizado el Protocolo de Trabajo de Titulación, presentado como requisito previo a la aprobación y desarrollo de la investigación para optar por el grado de Magister en Gestión de Energías.

El problema de investigación se refiere a:

“EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE BIOMASA RESIDUAL DEL GANADO PORCINO PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO EN LA GRANJA PORCINA GARCÍA EN EL CANTÓN LA MANÁ, BARRIO MIRAFLORES SECTOR EL TOQUILLAL EN EL AÑO 2016. DISEÑO DE UN BIODIGESTOR ALTERNATIVO PARA ESTE PROPÓSITO”

Presentado por Villacrés Jirón Mauricio Adrián con cedula de ciudadanía N^º 0502658081.

Sugiero su aprobación y permita continuar con la ejecución del proyecto de investigación y desarrollo.

Latacunga, Junio de 2016

Atentamente,

.....
Ph.D, Gustavo Rodríguez Bárcenas

DIRECTOR DE TESIS

RESPONSABILIDAD POR LA AUTORÍA DE TESIS

Dejo constancia que el presente proyecto de investigación, es de exclusiva responsabilidad legal y académica del autor con el tema, “EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE BIOMASA RESIDUAL DEL GANADO PORCINO PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO EN LA GRANJA PORCINA GARCÍA EN EL CANTÓN LA MANÁ, BARRIO MIRAFLORES SECTOR EL TOQUILLAL EN EL AÑO 2016. DISEÑO DE UN BIODIGESTOR ALTERNATIVO PARA ESTE PROPÓSITO” previo a la obtención del título **Magister en Gestión de Energías**, es original auténtico y personal, a excepción de las citas.

En tal virtud, declaro que el contenido, las conclusiones y efectos legales y académicos que se desprenden del trabajo propuesto de investigación y luego de la redacción de este documento son y serán de mi sola y exclusiva responsabilidad legal y académica.

Atentamente

.....
Ing. Mauricio Adrián Villacrés Jirón

C.C. 050265808-1

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo agradezco a la Universidad Técnica de Cotopaxi, por su apoyo incondicional en mi crecimiento profesional, A TODOS LOS DOCENTES por difundir en mí, sus conocimientos, para mi formación integral.

Al PhD. Gustavo Rodríguez Bárcenas, quien aportó su conocimiento, tiempo y paciencia al dirigir este trabajo de investigación.

Adrián Villacrés Jirón

DEDICATORIA

El presente trabajo les dedico
PRINCIPALMENTE A DIOS POR
DARME LA VIDA Y HABERME
PERMITIDO LLEGAR HASTA
ESTE MOMENTO, a mis hijos
quienes son mi inspiración, impulso a
seguir adelante y superarme cada día
más.

A mi esposa y mi madre, por el apoyo
en todo momento desde el inicio de
mis estudios.

Adrián Villacrés Jirón

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

UNIDAD DE POSGRADO

MAESTRÍA EN GESTIÓN DE ENERGÍAS

TEMA: “EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE BIOMASA RESIDUAL DEL GANADO PORCINO PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO EN LA GRANJA PORCINA GARCÍA EN EL CANTÓN LA MANÁ, BARRIO MIRAFLORES SECTOR EL TOQUILLAL EN EL AÑO 2016. DISEÑO DE UN BIODIGESTOR ALTERNATIVO PARA ESTE PROPÓSITO”

Autor: Ing. Adrián Villacrés Jirón

Tutor: Ph. D, Gustavo Rodríguez Bárcenas

RESUMEN

En el presente trabajo se aplican las herramientas de la Tecnología de la Gestión Total Eficiente de la Energía para realizar una caracterización energética de la Granja Porcina García. Se evaluaron las potencialidades de la biomasa y se obtuvieron los parámetros tecnológicos de un biodigestor a partir de los excrementos porcinos presentes. Se construyó una instalación experimental de un biodigestor tipo “Batch” con recursos propios que permitió la caracterización del proceso de digestión anaeróbica, la temperatura del sustrato, tipo de sustrato (nutrientes disponibles), la carga volumétrica, el tiempo de retención hidráulica y nivel de acidez (pH). Mediante el método experimental calorimétrico se determinó que el poder calórico del biogás producido por el prototipo de biodigestor es de 5 713 kcal/m³, para un gas que contenía 61,2 % de partículas de metano. La evaluación financiera corroboró la viabilidad económica del proyecto debido a que el VAN obtuvo un valor de 26 041,47 USD para una TIR de 41 %. Además, la implementación del biodigestor propuesto permitirá ahorrar 1 506,6 USD a la granja, al dejar de combustionar alrededor de 1 215 kg de gas licuado de petróleo. Lo anterior, favorecerá al medio ambiente, por cuanto se estaría dejando de emitir a la atmósfera 4,2 t de CO₂ por año.

PALABRAS CLAVES

Biomasa, biodigestor, bioconversión, biogás.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
UNIDAD DE POSGRADO
MAESTRÍA EN GESTIÓN DE ENERGÍAS

THEME: “EVALUATION OF THE POTENTIAL OF RESIDUAL BIOMASS OF PIGS FOR USE IN ENERGY PIGGERY GARCIA IN LA MANÁ CANTON, MIRAFLORES BARRIO TOQUILLAL SECTOR IN THE YEAR 2016. DESIGN OF AN ALTERNATIVE BIODIGESTOR”

Autor: Adrián Villacrés Jirón

Tutor: Ph. D, Gustavo Rodríguez Bárcenas

ABSTRACT

In this paper, the tools of Total Management Technology Efficient Energy for an energy characterization of Swine Farm Garcia apply. The potential of biomass were evaluated and the technological parameters of a digester is obtained from pig excrement present.

An experimental installation of a type "Batch" digester own resources that allowed the characterization of the anaerobic digestion process, the substrate temperature, type of substrate (nutrients available), the volumetric loading, hydraulic retention time and level was constructed acidity (pH).

By calorimetric experimental method it was determined that the caloric power of the biogas produced by the digester prototype is 5713 kcal / m³, for a gas containing 61.2% methane particles.

The financial evaluation confirmed the economic viability of the project because the NPV obtained a value of \$ 26 041,47 for an IRR of 41%. In addition, the implementation of the proposed digester will save \$ 1506.6 to the farm, leaving combust around 1,215 kg of liquefied petroleum gas. This will favor the environment, because they would be leaving emitted into the atmosphere 4.2 tons of CO₂ per year.

KEY WORDS

Biomass, digester, bioconversion, biogas.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	PÁGINAS
PORTADA	I
AVAL DEL DIRECTOR DE TESIS	ii
RESPONSABILIDAD POR LA AUTORÍA DE TESIS.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
DEDICATORIA	v
TEMA:	vi
RESUMEN.....	vi
THEME:.....	vii
ÍNDICE GENERAL.....	viii
Delimitación del problema y objeto	2
Formulación del problema	7
Objeto de estudio de la investigación.....	7
Objetivo general y campo de acción de la investigación	8
Objetivo General de la Investigación	8
Objetivos Específicos.....	8
Campo de Acción.....	9
Hipótesis:.....	9
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....	10
1.1. Antecedentes del Estudio	10
1.2. Fundamentación Teórica.....	15
1.2.1. Herramientas para establecer el Sistema de Gestión Total Eficiente de la Energía	16
1.2.2. Energías renovables	17
1.2.3. Potencial energético.	19

1.2.4. Concepto de biomasa	19
1.2.5. Definición biogás	20
1.2.6. Fertilizante orgánico o bioabono.....	24
1.2.7. Tipos de sustratos empleados en la producción de biogás y su preparación.....	25
1.2.8. Tipos de Biodigestores para la producción de biogás.....	27
1.2.9. Método experimental alternativo para medir el poder calórico del biogás	33
1.2.10. Ecuación de estado de los gases.....	34
1.2.11. Definición de densidad.....	35
1.2.12. Presión de la columna de agua	35
1.2.13. Calor específico de un cuerpo	35
1.3. Análisis Económico	36
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS.....	40
2.1. Objeto de la Investigación.....	40
2.1.1. Área de influencia directa	40
2.2. Determinación de la carga diaria del estiércol en la granja	43
2.3. Muestreo y caracterización de la materia prima	45
2.3.1. Metodología para el muestreo.....	45
2.3.2. Metodología para la caracterización del estiércol.....	46
2.3.3. Evaluación en in-situ de la materia prima.....	46
2.4. Selección del modelo del biodigestor	46
2.5. Consideraciones para la construcción de cualquier modelo de biodigestor... 48	
2.5.1. Factores para el dimensionamiento de biodigestores de tecnología simple	49
2.6. Obtención del biogás mediante reactores prototipos	49
2.7. Métodos y materiales utilizados en la construcción del reactor.....	49

2.8. Ejecución del ensayo con el biodigestor tipo “batch”	50
2.8.1. Procedimiento	52
2.8.2. Equipos e instrumentos	52
2.8.2. Equipo e instrumentos.....	54
2.8.3. Análisis físico del biogás	57
2.8.4. Análisis comparativo de una propiedad termodinámica	58
2.9. Modalidad de la investigación	59
Investigación de Campo.....	59
Investigación Bibliográfica – Documental.....	60
Experimental	60
2.10. Nivel de investigación.....	60
Exploratorio.....	60
Descriptivo	60
2.11. Operacionalización de las variables	60
Técnicas e instrumentos a utilizar	62
Observación.....	62
Ecuaciones por medio de modelos matemáticos.....	62
Software para la implementación del sistema scada para el control y monitoreo (labview)	63
Características	63
Programa en LabVIEW	64
CAPÍTULO III: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	65
3.1. Análisis de los recursos energéticos de la granja porcina	65
3.1.1. Consumo de energía eléctrica	65
3.1.2. Análisis del consumo anual de gas licuado de petróleo.....	65
3.2.3. Análisis del consumo anual de leña	66

3.2.3. Consumo de portadores energéticos en la Granja Porcina García	67
3.2.4. Análisis económico de los portadores energéticos.....	67
3.3. Cantidad de biomasa residual del ganado porcino de la granja	68
3.4. Determinación de la potencialidad en la biomasa del ganado porcino	69
3.4.1. Cuantificación de la biomasa utilizada para el biodigestor.....	69
3.4.2. Análisis de los parámetros que intervienen en el proceso anaeróbico	70
3.4.3. Determinación de la cantidad de partículas de metano en el biogás...	72
3.4.4. Cálculo de la masa molecular del biogás	73
3.4.5. Determinación del poder calórico del biogás mediante el análisis comparativo con el gas de uso doméstico	75
3.5. Cantidad de gas de uso doméstico representada en metros cúbicos de biogás	80
3.6. El uso de la leña representada en metros cúbicos de biogás	81
3.7. Determinación de los parámetros del biodigestor	81
3.7.1. Volumen de la cámara del biodigestor.....	81
3.7.2. Diámetro del biodigestor.....	82
3.7.3. Altura del biodigestor.....	83
3.7.4. Cálculos de la curvatura de la cúpula.....	83
3.7.5. Volumen de la cúpula.....	84
3.7.6. Volumen del cilindro.....	85
3.7.7. Volumen final del biodigestor.....	85
3.7.8. Cálculo de la superficie estructural	85
3.7.9. Cálculo del volumen del tanque de mezcla.....	86
3.7.10. Cálculo de la capacidad del tanque de descarga	86
3.8. Emisiones de gases de efecto invernadero (Impacto Ambiental)	87
CAPITULO IV: PROPUESTA.....	89

4.1. Título de la propuesta.....	89
4.2. Justificación de la propuesta	89
4.3. Objetivo de la propuesta.....	89
4.4. Estructura de la propuesta	89
4.4.1. Partes constitutivas del biodigestor	90
4.4.2. Operación y mantenimiento básico preventivo del biodigestor	91
4.4.3. Análisis económico	92
4.4.4. Evaluación financiera.....	95
4.6. Análisis socio-económico	97
CONCLUSIONES GENERALES	98
RECOMENDACIONES	99
Referencias bibliográficas.....	100
ANEXOS.....	104
ANEXO 8. Pantalla de monitoreo de datos del biodigestor con aislamiento térmico.....	111

INTRODUCCIÓN

En la presente investigación se tomará como propósito fundamental la determinación de la potencialidad que genera la biomasa residual del ganado porcino en la Granja Porcina García en el Cantón La Maná, barrio Miraflores sector el Toquillal, debido a que esta biomasa provoca contaminación al medio ambiente y de esta manera afecta a la salud de los habitantes, es por ello que se propone un biodigestor alternativo que convierta efectivamente las excretas del ganado porcino en otra forma de energía, a través del método de bioconversión. A partir de los resultados que se obtengan será posible disminuir el impacto ambiental, así como los focos de infección que pueden provocar enfermedades a sus habitantes. A continuación se detalla la estructura del proyecto:

En la introducción, se estudia el Problema de Investigación, realizando una contextualización a nivel macro, meso y micro; donde también se establece el objeto de estudio y la justificación del problema, para finalmente determinar los objetivos y su campo de acción.

En el Capítulo 1, se describe el marco teórico, antecedentes de la investigación que detallan estudios realizados en diferentes campos de la problemática planteada en el presente trabajo investigativo, en búsqueda de una fuente de energía amigable con el medio ambiente pero renovable; basándose en conceptos y fundamentaciones teóricas relacionadas con el estudio de un biodigestor alternativo que aproveche la biomasa del ganado porcino presente en la granja objeto de estudio.

En el Capítulo 2, se expone la metodología de la investigación: el enfoque metodológico, la modalidad, el tipo de investigación, el nivel y las técnicas e instrumentos utilizados. También, se estipula la población o universo y se determina la muestra para obtener información necesaria que certifique el objeto de estudio.

En el Capítulo 3, se evaluarán los resultados de los datos obtenidos partir de la biomasa animal y las variables físicas del proceso de biodigestión, las mismas que

se plasmaran en tablas y gráficos estadísticos que serán creadas de acuerdo a la información recopilada y tabulada.

En el Capítulo 4, se plantea la propuesta de: un prototipo de biodigestor alternativo que aproveche efectivamente las excretas del ganado porcino para generar energía renovable limpia a bajo costo, así como la posibilidad del uso eficiente de este tipo de energía; así como también, su buen uso y cuidado que contribuirá enormemente a tener una energía inagotable que genere buenos réditos económicos para la granja y sus habitantes. Finalmente se detallarán las conclusiones y recomendaciones que se generarán a partir de los objetivos específicos.

DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA Y OBJETO

Santos-Benavides, W. R. (2015) al citar a Sogari (2006) asevera que en la actualidad el tema de energías renovables es un punto preocupante para los países del mundo, debido a la sobreexplotación y el agotamiento de los combustibles fósiles, y el alto nivel de contaminación e impacto ambiental que producen, el hombre se ha visto en la necesidad de buscar fuentes energéticas renovables a través del aprovechamiento energético que se puede obtener mediante el gas metano, siendo éste generado por la descomposición anaeróbica de la biomasa, permitiendo así la manutención equilibrada de los ecosistemas del planeta.

Por otro lado dentro de los detalles que establecen estos autores manifiestan que la biomasa sólida es la mayor fuente de energía renovable en el mundo, con mucha diferencia, debido a la existencia de la biomasa tradicional (leña) en los países en vías de desarrollo. Supone el 9,2 % de la oferta total de energía primaria en el mundo, representando así el 70,2 % de la oferta total de energía renovable. De hecho, el 86 % de la biomasa sólida es producida y consumida en países que no pertenecen a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE).

De acuerdo al artículo publicado por la Organización Mundial de Meteorología (OMM) en el año 2013, donde hace referencia sobre “La cantidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera que alcanzó un nuevo máximo sin precedentes

en el año 2012. La tendencia, que es ascendente y acelerada, determina el cambio climático y el futuro del planeta". Según el boletín anual de esta organización sobre gases de efecto invernadero, presentado en Ginebra, determinaron que la concentración atmosférica media mundial de CO₂ ha aumentado en un 41 %, la del metano en un 160 % y la del óxido nitroso en un 20 % desde el comienzo de la era industrial en 1750 (Santos-Benavides, 2015).

Santos-Benavides, W. R. (2015) haciendo referencia al trabajo de Saldarreaga (2012) plantea que el metano (CH₄) es un gas que altera la meteorología del planeta e incita aún más el calentamiento global, científicos de la Universidad de Bremen en Alemania evidenciaron esto después de un terremoto en 1975, donde se liberó más de siete millones de metros cúbicos de metano. También determinaron que este gas es un componente químico que absorbe calor. El doctor en química, David Saldarreaga, explica que el metano siempre ha estado en el aire, esta acción se da por: putrefacción de las plantas, defecación de animales o bacterias en plantaciones de arroz. El problema radica en la interacción de este componente químico con la radiación infrarroja (calor). Este investigador plantea que el planeta está constantemente recibiendo radiación del sol y de las estrellas mientras que los gases en la atmósfera absorben la radiación infrarroja, lo cual eleva la temperatura y origina el calentamiento global del planeta. Además, afirma que en la atmósfera, el CH₄ tiene gran efecto por un período corto de 10 años, mientras que el CO₂ tiene un pequeño efecto por un período largo de 100 años. Es así que el metano es 23 veces más potente que el dióxido de carbono en contribuir al efecto invernadero.

El uso cada vez mayor de la energía procedente de los combustibles fósiles y su alto costo económico mundial implica que los recursos vegetales, residuos y productos procedentes de la actividad agropecuaria y forestal sean utilizados como fuentes alternativas de energía. También son aprovechables las potencialidades de los vientos y los recursos hídricos para sustituir la energía obtenida de los hidrocarburos (Utria, 2014).

La biomasa es la fuente de energía más antigua utilizada por el hombre, seguida por el agua y los vientos. No obstante, el estudio de la madera como combustible

no llamó la atención de los investigadores, gobiernos y organismos de cooperación internacional, sino hasta la década de los años 70 como resultado de la llamada crisis del petróleo. Los estudios realizados en los años posteriores mostraron que la biomasa constituye una de las principales fuentes de energía renovable.

En los países subdesarrollados el 80 % de la madera se destina a la producción de energía y el 20 % de la energía consumida proviene de la biomasa, la cual de hecho es la cuarta fuente de energía, después del petróleo, el gas y el carbón mineral.

En América Latina, pese a que es una región con abundantes recursos energéticos fósiles, el consumo de biomasa como combustible es muy alto, principalmente en las regiones rurales. Con el conocimiento actual de los impactos negativos de la generación de energía a partir de los desechos sólidos y el desarrollo de los métodos de mitigación correspondientes desarrollados a la fecha, la biomasa se considera como una alternativa adecuada para la provisión sustentable de energía.

En el año 2050 la biomasa podría proporcionar a nivel mundial el 17 % de la energía eléctrica y el 38 % de combustibles de uso directo. La biodegradación de la biomasa para la producción de biogás podría aportar beneficios no sólo energéticos, sino también ambientales, contribuyendo al mejoramiento del entorno rural, urbano e industrial y a la recuperación de los suelos (Doria, 2001).

El potencial de biomasa en el Ecuador es de gran importancia, debido a que se trata de un país tradicionalmente agrícola y ganadero, cuyas actividades generan gran cantidad de desechos que pueden ser aprovechados energéticamente (Santos-Benavides, 2015).

Según las estadísticas realizadas por el Ministerio de Agricultura y Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) en el año 2014, la población del ganado en el territorio nacional está distribuido por regiones, teniendo así la Región Sierra. En la sierra ecuatoriana, Cotopaxi ocupa el quinto lugar en el sector ganadero de acuerdo a la estadística del MAGAP. En el gráfico 1.1 se representa en forma de barras la cantidad de Unidad de Producción Agropecuaria y de animales por miles de porcino.

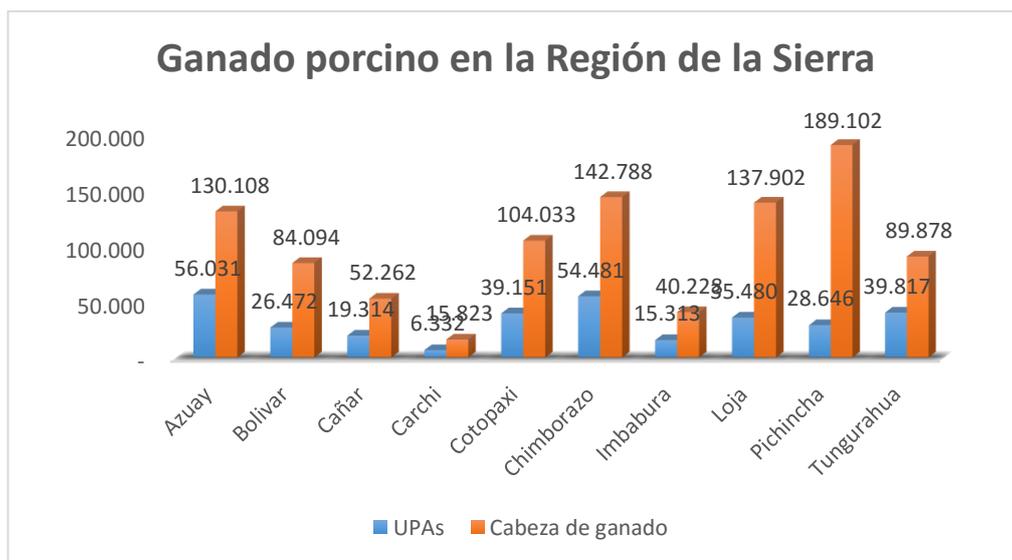


Gráfico 1 Representación numérica del ganado porcino región Sierra.

Fuente: MAGAP, 2014

El aumento de la productividad agrícola es una fuerza impulsora del desarrollo económico y social, cuando la agricultura tambalea, las fuentes de ingreso se pierden, los vínculos de la sociedad se quiebran y aumenta la movilidad de la sociedad. La actividad agrícola requiere de diferentes elementos para su desarrollo: suelo fértil, agua, semillas, abonos, pesticidas y mano de obra, entre otros.

Una de las formas de mantener un ambiente sano es saber reusar los diferentes componentes orgánicos dentro de la producción agrícola; como cultivadores, deben considerarse tanto los riesgos ambientales como los de seguridad alimentaria al planificar la aplicación del estiércol. Las prácticas de gestión de estiércol disminuyen el impacto ambiental negativo, tales como la eliminación de residuos y olores, así como también reducen los riesgos de contaminación con patógenos humanos que pudieran encontrarse en el estiércol.

En las zonas de La Maná, especialmente en la Granja Porcina García y sus alrededores se dedican a la cría de ganado porcino, donde se generan grandes cantidades de excretas, esta son utilizadas de forma tradicional en los cultivos o son almacenados sin ningún criterio técnico, provocando contaminación al medio

ambiente y su vez es un foco de infección para las personas que realizan actividades domésticas o agrícolas.

La Granja Porcina García es una empresa que se dedica a la producción y engorde de cerdos leche desde sus inicios en 2001, el principal objetivo ha sido mantener la producción de carne de cerdo, con miras al crecimiento continuo. La granja está ubicada en el Cantón La Maná, barrio Miraflores sector el Toquillal, tiene un espacio aproximado de 34x20 m², la misma se encuentra en una región de clima cálido, la temperatura media anual es de 23° Centígrados, observando que los meses con mayor temperatura son marzo y abril con 28 a 30° y la temperatura más baja se registra en el mes de julio y es de 24 °C. Como dato relevante se menciona que el suelo es de tipo arcilloso, siendo muy apto para la agricultura, pero existe un déficit de Gas Licuado de Petróleo (GLP) y un alto costo de los fertilizantes químicos. Por esta razón se pretende implementar un biodigestor para suplir las necesidades energéticas tradicionales en las instalaciones de la granja.

La granja cuenta con 5 personas que habitan y realizan sus labores cotidianas de trabajo, por lo tanto se tiene que: el consumo anual de energía eléctrica promedio es de 6 55.67 kWh, térmica 101,25 kg de GLP, 25,9 kg leña.

En la granja, el GLP es utilizado para calentar el agua y la cocción de alimentos de la familia y en parte para la elaboración de alimento para el ganado porcino. Los altos costos de los consumos energéticos, han provocado que la granja realice gastos elevados en las actividades diarias de trabajo y producción. Además, la falta de conocimiento sobre la utilización y aprovechamiento de los desechos orgánicos del ganado porcino, están provocando el deterioro del medio ambiente donde se desarrollan las actividades cotidianas de la granja y sus alrededores. Producto de esto se generan: el mal olor, un desagradable aspecto físico, presencia de moscas, roedores; además los desechos orgánicos líquidos contaminan los esteros, a esto también contribuyen las lluvias.

La estimación de la biomasa del ganado porcino que se produce en la Granja, es en base a la caracterización de los desechos biológicos de los porcinos, y con estos datos se puede plantear el estudio de un prototipo de biodigestor alternativo que contribuirá a mejorar la calidad de vida de las personas que habitan en la granja, al

utilizar el biogás como una energía alternativa y limpia. A la par también se conseguiría disminuir las emisiones de gas metano al ecosistema, y los vectores contaminantes que causan enfermedades a las personas.

Con el aprovechamiento de los residuos orgánicos del ganado porcino en un biodigestor se pueden obtener dos beneficios muy importantes: el primero mediante la obtención del biogás que serviría como energía térmica para los procesos de la Granja y las necesidades de los habitantes, etc., y el segundo es reducir la contaminación ambiental del lugar que es provocada por los desechos orgánicos del ganado porcino.

El biogás constituye un factor muy importante en el desarrollo de las tecnologías aplicadas a la generación de energía limpia, tomado en cuenta el cuidado del medio ambiente por la disminución del efecto invernadero. Sin embargo, contar con políticas y decisiones que impulsen el desarrollo de nuevas fuentes de energía, con el único fin de poder ampliar la matriz energética, es sin dudas, el principal eslabón de esta cadena tecnológica (Santos-Benavides, 2015).

La implementación de esta nueva tecnología tiene sus debilidades que influyen directamente en el proyecto; pues en el Ecuador es una tecnología prematura que no está difundida técnicamente. Además, se debe tener en cuenta que se necesita de un capital adicional, disponibilidad, calidad y cantidad de material orgánico, mano de obra (capacitación técnica al personal), tener bien establecidas políticas energéticas y ambientales que puedan aportar a la difusión de esta técnica.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Se desconoce el potencial de biomasa residual aportada por el ganado porcino para la obtención del biogás, aplicando la tecnología de un biodigestor alternativo en la Granja Porcina García en el Cantón La Maná, barrio Miraflores sector el Toquillal.

OBJETO DE ESTUDIO DE LA INVESTIGACIÓN

Biomasa residual del ganado porcino en la Granja Porcina García en el Cantón La Maná, barrio Miraflores sector el Toquillal.

Variable Independiente	Variable Dependiente
Potencial de biomasa residual del ganado porcino	Aprovechamiento energético de la biomasa

OBJETIVO GENERAL Y CAMPO DE ACCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

OBJETIVO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

Evaluar el potencial de aprovechamiento energético de la biomasa residual del ganado porcino para obtener los parámetros de diseño tecnológico de un biodigestor alternativo que permitan la producción de biogás en la Granja Porcina García del Cantón La Maná, barrio Miraflores sector el Toquillal, provincia de Cotopaxi.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar la caracterización energética a la Granja Porcina García del Cantón La Maná, partiendo del comportamiento de los portadores no renovables y las alternativas de reducción de su consumo.
2. Seleccionar y determinar los parámetros de diseño de un biodigestor en correspondencia con la demanda y la potencialidad de biomasa residual del ganado porcino en la Granja Porcina García del Cantón La Maná.
3. Determinar los volúmenes de biogás producido en el biodigestor para su caracterización energética.
4. Evaluar desde el punto de vista técnico, económico y medioambiental el uso de la excreta porcina para la producción de biogás en la granja.

Sistemas de tareas del trabajo:

1. Conformar el estado del arte y abordar los fundamentos teóricos-prácticos sobre la temática tratada a través del análisis bibliográfico.
2. Aplicación de las herramientas que faciliten la caracterización energética de la Granja Porcina García del Cantón La Maná.
3. Caracterización de los residuos biodegradables de origen animal y de las condiciones existentes en la Granja Porcina García del Cantón La Maná, para la selección de un biodigestor.

4. Valoración económica y socio – ambiental de la propuesta de utilización de las fuentes de energía renovable referida a la biomasa en la Granja Porcina García del Cantón La Maná.

CAMPO DE ACCIÓN

Potencialidades de la energía de la biomasa existente (excreta porcina) en las actuales condiciones de operación de la granja.

HIPÓTESIS:

La caracterización de la biomasa residual del ganado porcino de la Granja Porcina García permitirá obtener los parámetros de diseño de un biodigestor alternativo, logrando un mayor aprovechamiento de su potencial energético, así como la disminución del impacto ambiental provocado por la emisión de metano a la atmósfera.

Visión epistemológica de la investigación

La investigación está enfocada en evaluar la potencialidad de aprovechamiento de la biomasa residual derivada del ganado porcino, integrando de forma sistémica las categorías problema, objeto, objetivos; de tal manera que permita la selección y determinación de los parámetros de diseño tecnológico de un prototipo de biodigestor alternativo que pueda cubrir determinada demanda de GLP utilizados en la Granja Porcina García del Cantón La Maná.

En la investigación se sistematizarán un conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el proceso objeto de estudio. Serán establecidas las limitaciones de las teorías y las expresiones empíricas desarrolladas en el mundo para la fermentación y biodigestión, al ser aplicadas al material biomásico porcino.

A través de la experimentación se describirá y caracterizará el objeto de estudio y sus principales regularidades. Por otro lado a través de la compilación de conocimientos mediante entrevistas, encuestas, intercambios de conocimientos, consultas a expertos y revisión de bibliografía, permitirán la sistematización de la información y teorías relacionadas con el objeto de estudio.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes del Estudio

Se han realizado importantes investigaciones en la temática de la gestión total de la eficiencia energética, que en varios de los casos incluyen el estudio y la aplicación de las fuentes renovables de energía.

Gestión Energética:

En materia de eficiencia energética, algunos autores han propuesto las herramientas básicas y procedimientos para programas de control y mejoramiento de la eficiencia energética en empresas de producción y servicios (Borroto Nordelo, 2006; Campos, 1999). En este estudio se define que lo más importante para lograr la eficiencia energética de una empresa es la implementación de un sistema de gestión energética, que garantice un plan de ahorro de energía que sea renovado cada vez que sea necesario. Este trabajo se centra en la importancia de un sistema de gestión energética y no en la realización de un diagnóstico energético a profundidad (Utria, 2014).

Relacionado con la Gestión Energética en el sector industrial y de los servicios, Lovaina en el 2003 (Lovaina, 2003) aplica las nuevas tecnologías para el uso eficiente de la energía. Estas aplicaciones se han diversificado por todo el país a partir de la participación de grupos multidisciplinarios compuestos por profesionales universitarios y de las distintas empresas. Básicamente el alcance de estas investigaciones de gestión energética consiste en realizar, conjuntamente con el cliente, un análisis de la situación energética de la planta industrial, a manera de diagnóstico (cuánta energía se consume, dónde se consume, qué cantidad de ella se desperdicia, etc.), con el objetivo de identificar oportunidades evidentes de ahorro que produzcan beneficios económicos directos (Orozco Varas, 2015; Pedraza, Chará, Conde, Giraldo, & Giraldo, 2002; Santos-Benavides, 2015; Utria, 2014).

Borroto en el 2006 en su obra “Gestión energética en el Sector Productivo y los Servicios” (Borroto Nordelo, 2006) se refiere a los principios fundamentales y los procedimientos para la evaluación, el diagnóstico, la organización, la ejecución y la supervisión de la gestión energética en las empresas, para lograr el objetivo de reducir sus costos energéticos y elevar su competitividad. Se presentan en particular los principios, herramientas y procedimientos para la implantación de la Tecnología de Gestión Total Eficiente de la Energía en empresas industriales y de servicios. Estos elementos teóricos adquieren relevancia cuando son aplicados a soluciones particulares. Se estima que en la industria cubana, las actividades con mayores potenciales son: el níquel, el cemento, el acero, la generación eléctrica, la refinación de petróleo y en menor medida las industrias alimenticias y el papel. En todas ellas las medidas en lo fundamental se dirigen a elevar la disciplina tecnológica, mejoras técnicas y técnico-organizativas, aprovechamiento del vapor residual, sustitución por combustibles económicamente más ventajosos, mejoras en la combustión, automatización de los controles y otras (Herrero, 2008; León & Mabel, 2012; Loaiza & Del Cisne, 2015; Losada, Barragán, & Rodríguez, 2015). En el año 2011 Mediaceja (Mediacejas Granda, 2011) muestra la propuesta de fabricación de un biodigestor, a partir de la caracterización del comportamiento del consumo de los portadores energéticos y el levantamiento de la generación de excrementos en una UEB de producción cooperativa. Este trabajo está relacionado con el aprovechamiento de la energía de la biomasa en el mejoramiento de los resultados de la Gestión energética de la entidad.

Comas en el 2011 (Comas Rodríguez, 2011) propone un indicador general de gestión energética para la Empresa de Cigarrillos “Juan D. Mata Reyes” que contribuya a elevar la eficiencia en el uso de los portadores energéticos en la Empresa de Cigarrillos “Juan D. Mata Reyes”. Se diseña un procedimiento que guía metodológicamente el cálculo del indicador y para su realización se utilizan métodos y herramientas tales como: el uso parcial de la Tecnología de Gestión Total Eficiente de la Energía, el coeficiente de Kendall, tormenta de ideas y cuadro de mando. Para el cálculo del indicador primero se diagnostica la situación actual de la gestión energética de la empresa y se calcula cada indicador específico por portador energético hasta llegar al indicador general de gestión

energética en la organización. Además se proponen mejoras para contribuir a elevar la eficiencia en el uso de los portadores energéticos en la empresa (Mudhoo & Kumar, 2013; Pedraza et al., 2002; Rodas Corrales, 2015).

Energía de la biomasa:

Field en 1987 facilita un procedimiento de medición estimada de la concentración de metano en el biogás, utilizando el principio de la “Botella de Mariotte”, cuando adolecemos de otros instrumentos de laboratorio más precisos, tales como el Cromatógrafo (Field, 1987; Utria, 2014).

La Organización Panamericana para la Salud (1999) facilita un Manual para la Elaboración de Compost, donde se plasman los resultados de investigaciones de la relación carbono/nitrógeno en base seca de diversos residuos agroindustriales y sus mezclas (Organización Panamericana para la Salud, 1999).

Martina y otros en el 2003 exponen los resultados de algunos de los ensayos de biodigestión anaeróbica para obtención de gas metano de aserrín de diferentes maderas obtenidas como residuo de carpinterías. Para ello se utilizaron los desechos de madera de la zona, mezclados, proporcionalmente con orina y heces fecales (P. Martina, Yank, Corace, & Aeberhard, 2003). Se indican los porcentajes y volúmenes de carga, la relación entre agua, aserrín y volumen libre, volúmenes de gases producidos, tiempos de reacción, mediciones de pH y porcentajes de dióxido de carbono obtenidos, así como el tratamiento previo realizado al aserrín para deslignificarlo.

Por su parte Fernández (2003) realiza un estudio de las condiciones de operación para la digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos, donde expone los resultados de la producción de metano con diferentes tiempos de retención hidráulica, utilizando mini biodigestores en los ensayos de varias mezclas de la biomasa tratada (Fernández Castillo, 2003; Utria, 2014).

Carrillo en el 2004 expone que los biodigestores con alimentación batch se construyen cuando es difícil obtener la materia prima diariamente. A las dos semanas comienza la producción de biogás y continúa por unos tres meses. Cuando cesa se abre el digester y se limpia, para cargarse de nuevo (Carrillo, 2004).

Caraballo en el 2006 en relación a la temática del aprovechamiento de la energía

de la biomasa, aplica la metodología GBV para la selección, diseño y construcción del biodigestor atípico del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (Caraballo, 2006; Utria, 2014). Este biodigestor utiliza tanques metálicos recuperados y agitador accionado por energía eólica (Savonius – Darreius).

En el 2006, Barrera hace una propuesta tecnológica para producir biogás con fines energéticos a partir del levantamiento de la generación de residuos biodegradables y su factibilidad, previa evaluación de la demanda en una entidad agropecuaria (Barrera Cardoso, 2006).

En otra investigación realizada en el 2007, Guardado desarrolla un procedimiento para el diseño y construcción de plantas de biogás sencillas, donde se correlacionan los datos estadísticos de los resultados de los levantamientos de los residuos biodegradables, las demandas de biogás, los parámetros de diseño de la instalación biodigestora, así como los requerimientos en recursos materiales y de mano de obra (Guardado, 2007).

Villanueva (2008) desarrolla un proyecto de producción de biogás para uso en el hogar, a partir de los residuales de la alimentación y estiércol de la cunicultura con una preparación previa de la mezcla seleccionada y ponderada, donde se da tratamiento al secado solar y humectación al material antes de someterlo al proceso de codigestión anaerobia (Villanueva, 2008).

En el 2008, Cobián desarrolla Tratamiento aerobio-anaerobio de residuos ganaderos para obtención de biogás y compost donde estudia y caracteriza la cobiodigestión de residuos, aplicando ensayos semi-pilotos de sistemas continuos de recirculación de deyecciones bobinas, avícolas y de cosechas, logrando satisfactorios resultados de rendimiento biogás de 99,2 litros/kg (63,5% CH_4) y de biofertilizantes de excelente calidad (Cobián, 2008).

En el Instituto de Investigaciones Porcinas en Cuba, Domínguez en el 2009 recomienda Biodigestores del tipo Nicarao de diversas capacidades como componentes de Sistemas agropecuarios integrados (P. Domínguez, 2009). Se facilita la selección de las dimensiones y la dosificación de los materiales constructivos.

Según varias experiencias en la utilización de energía renovable como lo mencionan diferentes autores en reportes, revistas, libros, etc. en donde se ven

experimentados los beneficios económicos y además ecológicos que pueden producir estos métodos de obtención de energía, y como el tema de la presente investigación se refiere a la producción de biogás a partir de desechos orgánicos solo se abarcará este método de obtención de energía para el estudio de todo el campo que comprenden las energías renovables y la misma que tomará algunas recomendaciones importantes que caben tomar en cuenta para la investigación actual tales como las que han desarrollado autores como (Herrero, 2008; Lizama et al., 2014; Ramón, Romero, & Simanca, 2013; Rodas Corrales, 2015; Santos-Benavides, 2015; Utria, 2014; VAZQUEZ GONZALEZ, 2015; Vega & Herrero, 2012).

En la Universidad Industrial de Santander, se realizó una evaluación de potencial energético de la biomasa residual proveniente del sector porcino en Colombia; indican un modelo matemático con base a la aplicación específica para la producción de biogás, debido a que el estiércol durante su descomposición tiene una elevada producción de metano (Seixas, Folle, & Marchetti, 1981; Thu, Cuong, Van Chao, Trach, & Sommer, 2012; Tobares, 2013; Torres, Quipuzco, & Meza, 2013; Trejo-Lizama et al., 2014; Ushñahua, Quispe, & Cruz, 2014).

Por otro lado se han realizado varias investigaciones sobre los biodigestores con la finalidad de encontrar el más adecuado para cubrir necesidades de rendimiento y tiempos de producción de biogás (Kovács et al., 2013; León & Mabel, 2012; Liew, Shi, & Li, 2012; Liu et al., 2012). Otras investigaciones desarrolladas en países Europeos y Asiáticos como Alemania, China entre otros muestran importantes resultados en cuanto al fácil manejo y bajo costo de los biodigestores tubulares de plástico, instalados lugares con aislamiento térmico del suelo, y cubiertos con un invernadero, son una buena alternativa para superar limitaciones de condiciones climáticas (Ge, Matsumoto, Keith, & Li, 2014; Liew et al., 2012; Liu et al., 2012; Mudhoo & Kumar, 2013; Rajendran, Aslanzadeh, & Taherzadeh, 2012).

En la Universidad del Salvador, se realizó una evaluación del potencial energético de desechos sólidos de granjas de engorde porcinos en el Salvador; la finalidad

principal es la determinación del poder calorífico superior del estiércol puro del cerdo de las granjas de engorde porcino en el Salvador (Moreta Criollo, 2013).

Actualmente en la provincia de Cotopaxi se tienen grandes Granjas dedicadas a la cría intensiva de ganado porcino, entre otros, los mismos se han visto la necesidad de enfocarse a nuevas fuentes de energía alternativas que ayuden a minimizar la utilización y costos de energía no convencional. Con estas referencias se propone implementar la técnica de los biodigestores en la Granja Porcina García, con el fin de aprovechar los desechos orgánicos porcinos y obtener una energía limpia y renovable, tomando en cuenta aspectos técnicos, económicos y medio ambientales, que ayuden a impulsar el desarrollo de nuevas fuentes de energía, con estos antecedentes, se han analizado las principales tendencias a nivel internacional sobre el aprovechamiento de este tipo de energía.

El direccionamiento que tiene el proyecto es buscar nuevas fuentes de energía, mas no a la producción de ganado porcino. Es así que en Ecuador, es una tecnología prematura que se está desarrollando y aplicando en la utilización de la biomasa para obtener energías limpias, y que minimice la emanación de los gases de efecto invernadero que provocan el calentamiento global del planeta tierra. Debido a esto, se hace referencia a investigaciones y diseños externos.

1.2. Fundamentación Teórica

La Tecnología de la gestión Total de la Eficiencia Energética establece probadas herramientas que facilitan la determinación y la caracterización de la situación energética de las entidades y el comportamiento de los portadores energéticos así como los indicadores económicos a los que tributan. En la mejora de la eficiencia influye en gran magnitud las alternativas energéticas no convencionales, donde se incluye el aprovechamiento de las fuentes de energía renovables.

El diagnóstico o auditoría energética constituye la herramienta básica para saber cuánto, cómo, dónde y por qué se consume la energía dentro de la entidad, estableciendo el grado de eficiencia en su utilización, identificando los principales potenciales de ahorro energético y económico, además de definir los posibles proyectos de mejora de la eficiencia energética.

En resumen, los *objetivos* que se cumplen del *diagnóstico energético* son:

1. **Evaluar** cuantitativamente y cualitativamente el comportamiento del consumo de energía y su estructura (Diagrama de Pareto) e índices de consumo específico de los principales portadores energéticos.
2. **Determinar** la eficiencia energética, pérdidas y despilfarros de energía en equipos y procesos.
3. **Identificar** potencialidades de ahorro energético y económico.
4. **Establecer** indicadores energéticos de control de los índices de consumo mejorados y estrategias de operación y mantenimiento.

Definir posibles medidas y proyectos para ahorrar energía y reducir costos energéticos, evaluados técnica y económicamente.

1.2.1. Herramientas para establecer el Sistema de Gestión Total Eficiente de la Energía

Las herramientas que se emplean en la caracterización de la Gestión Total en Eficiencia Energética de la Empresa, se establecen para detectar las fuentes y niveles de pérdidas, definiendo medidas o proyectos de ahorro o conservación de la energía; entre las que se encuentran los diagramas de Pareto, los gráficos de control, y los diagramas de correlación.

1.2.1.1. Método para la realización de la Prueba de la Necesidad

La prueba de necesidad constituye el primer paso para implantar un sistema de gestión total por la eficiencia energética en la entidad. Dicha prueba permite caracterizar e identificar los principales problemas energéticos de la entidad.

Su resultado permite la planificación objetiva de los índices de consumo, la modelación de los comportamientos históricos, y la cuantificación de la influencia de diferentes factores globales en los consumos, costos energéticos y gastos totales de la empresa.

1.2.1.2. Método para la construcción del diagrama de Pareto

Los diagramas de Pareto son gráficos especializados de barras que presentan la información en orden descendente, desde la categoría mayor a la más pequeña en unidades y en por ciento. Los porcentajes agregados de cada barra se conectan por una línea para mostrar la suma incremental de cada categoría respecto al total. El diagrama de Pareto es muy útil para aplicar la Ley de Pareto o Ley 80 – 20, que identifica el 20 % de las causas que provoca el 80 % de los efectos de cualquier fenómeno estudiado. El diagrama de Pareto permite identificar y concentrar los esfuerzos en los puntos clave de un problema o fenómeno como pueden ser: los mayores consumidores de energía de la entidad, las mayores pérdidas energéticas o los mayores costos energéticos, predecir la efectividad de una mejora al conocer la influencia de la disminución de un efecto al reducir la barra de la causa principal que lo produce y determinar la efectividad de una mejora comparando los diagramas de Pareto anterior y posterior a la mejora. Los gráficos de Pareto utilizados permiten visualizar el consumo de los principales portadores energéticos así como identificar el 20 % de los equipos que producen el 80 % del consumo energético de un portador específico.

1.2.2. Energías renovables

Las formas de energía no renovable son las causantes de la contaminación ambiental que se ve desarrollada en gran parte por la industrialización y en menor influencia producida en los hogares al desarrollar fuentes contaminantes como basura y residuos orgánicos que no son tratados y lo cual generan problemas en las grandes ciudades en donde se ve afectada por la gran población presente que arrastran estas costumbres no ecológicas.

Las energías renovables son aquellas fuentes que de forma periódica se ponen a disposición del hombre, y que este es capaz de aprovechar y transformar en energía útil para satisfacer sus necesidades. Se renueva de forma continua a diferencia de los combustibles fósiles como el Petróleo, Carbón, Gas y Uranio, de los cuales existen disponibilidades que pueden agotarse en un plazo más o menos largo (Andrade, Souza, Arruda, Gomes, & Xavier, 2014; Brown, Shi, & Li, 2012; Díaz, 2012).

Todas las fuentes de energía renovables (excepto la mareomotriz y la geotérmica), e incluso la energía de los combustibles fósiles, provienen, en último término, del Sol. La energía eólica es una forma indirecta de energía solar, puesto que son las diferencias de temperaturas y de presión inducidas en la atmósfera por la absorción de la radiación solar las que ponen en movimiento los vientos. Se calcula que alrededor de un 1% a un 2% de la energía solar recibida por la tierra es convertida en energía cinética de los vientos, es decir, solo la veintava parte de toda la energía que el Sol envía a la tierra se convierte en viento (Losada et al., 2015).

Cuantiosos recursos e investigaciones se invierten para buscar alternativas a los combustibles fósiles. Las fuentes renovables de energía limpia y la búsqueda y desarrollo de fuentes no convencionales de energía, ha sido el tema central de diversas convenciones y cumbres con mira a proteger el medio ambiente y así contrarrestar los impactos climáticos producidos por la emanación a la atmósfera de productos químicos y sustancias que destruyen la capa de ozono, la vegetación y alteran el clima, además se suma a esto la subida de los costos de los combustibles fósiles y su posible agotamiento en un futuro no muy lejano.

El presente estudio se fundamenta a partir de los modelos ya existentes. Lo que se quiere conseguir es que estos generadores de energía económica puedan ser productores de fuentes alternativas de energía y a la vez fuentes de trabajo para el país y una fuente de desarrollo para el sector rural.

Este sistema de generación de energía es versátil ya que es sencilla su operatividad, de poca complejidad ya que su operación no es tan técnica aunque si necesita algunas pequeñas recomendaciones para su buen manejo y conservación, aunque este sistema ocupa gran espacio, su fabricación es más económica y a veces algo rentable. Su funcionamiento se basa en la descomposición de las bacterias provenientes de los residuos orgánicos o de excretas producidas por animales y personas las mismas que liberan compuestos químicos que producen la generación del biogás que se utilizará en este proceso para reducir el consumo de energías no renovables que se utiliza en los terrenos, el biogás que se genere podrá ser utilizado ya sea como gas para consumo doméstico o para la generación de

energía eléctrica mediante la transformación de este mismo gas (Domiguez et al., 2012; Ge et al., 2014; Herrero, 2008).

1.2.3. Potencial energético.

Según Gomero Osorio (2005) nos indica que el potencial energético es la energía liberada en forma de calor que puede ser obtenida de la naturaleza y del sol mediante una reacción exotérmica como la combustión de algún combustible; mediante la energía eléctrica por efecto joule o por efecto Termoeléctrico.

El potencial energético de la biomasa se clasifica según la probabilidad de su utilización:

- El potencial teórico está determinado por la cantidad total de biomasa que es producida o generada en forma de residuos sin considerar restricciones técnicas o económicas.
- El potencial disponible corresponde a la cantidad de biogás que es posible de producir a partir de la biomasa efectivamente disponible, aplicando restricciones a la capacidad de recolección.
- El potencial técnico corresponde a la energía eléctrica y térmica que es posible generar a partir del biogás producido, aplicando restricciones tecnológicas a la conversión, fundamentalmente en términos de eficiencia eléctrica y térmica de los equipos de cogeneración.
- El potencial económico está determinado por la cantidad de energía que puede ser producida en condiciones de rentabilidad económica.
- El potencial implementable es el que siendo económicamente factible es posible de ser implementado.

1.2.4. Concepto de biomasa

La biomasa, entendida como fuente de energía renovable, se define como toda materia orgánica vegetal o animal, procedente de su transformación natural o artificial, susceptible de un aprovechamiento energético. Engloba, por tanto, todas las formas de materia orgánica y sus transformados (Santos-Benavides, 2015).

El biogás está comprendido dentro de las fuentes de energía renovables, utilizando como materia prima para su producción diferentes materiales residuales, como:

excretas de animales, residuos de la industria azucarera, residuos agrícolas, efluentes de la industria del papel, destilerías, residuales urbanos, etc. Es una mezcla de gases que contienen metano, anhídrido carbónico, hidrógeno, oxígeno, gases diversos y pequeñas porciones de anhídrido sulfuroso (Utria, 2014).

Durante el proceso de producción del biogás se genera también fertilizante orgánico de buena calidad y alto contenido de nitrógeno, el que supera el estiércol fresco, por lo tanto la construcción de las instalaciones de biogás debe estar fundamentado en una minuciosa caracterización de los aspectos fundamentales que inciden en la correcta selección, diseño y explotación de estas tecnologías (Santos-Benavides, 2015).

1.2.4.1. Biomasa residual ganadera

Incluye todo residuo biodegradable procedente de la actividad ganadera, y que se puede clasificar en: estiércol compuesto por la mezcla de las deyecciones y el material de la cama del ganado; purines, mezcla de deyecciones el agua de limpieza y de arrastre; aguas sucias, procedentes del lavado de deyecciones diluidas y animales muertos. Los mismos que se pueden aprovechar y transformar en biogás mediante digestión anaerobia, o bien secar y utilizar directamente como combustible. Estos residuos de biomasa animal se encuentran concentrados en las instalaciones donde se generan y son muy contaminantes debido a su elevada carga orgánica. La producción de biogás a partir de los residuos ganaderos sólo es posible tecnológicamente cuando existe una elevada concentración del ganado porcino en una misma área dedicada a la explotación intensiva (Lizama et al., 2014; Lucas Júnior, 1994; Santos-Benavides, 2015; Utria, 2014).

1.2.5. Definición biogás

Santos-Benavides (2015) plantea que el biogás es una mezcla de gases, producto de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica, realizada por la acción bacteriana. Las bacterias consumen la materia orgánica compuesta principalmente por carbono y nitrógeno y como resultado se produce una combinación de gases, conformados mayoritariamente por metano (CH_4), el cuál brinda las características combustibles al biogás, y dióxido de carbono (CO_2).

El biogás puede generarse de forma “espontánea” en la naturaleza, ya que todo desecho o residuo orgánico tiene la capacidad de producir biogás. Un claro ejemplo de esto es el gas natural, que no es más que un tipo de biogás.

El biogás es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegeneración de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos, (bacterias metanogénicas, etc.), y otros factores, en ausencia de aire (esto es, en un ambiente anaeróbico).

El biogás es un gas compuesto cerca de 60% de metano (CH₄) y 40% de bióxido de carbono (CO₂). Contiene mínimas cantidades de otros gases entre ellos 1% de ácido sulfhídrico (H₂S). Es un poco más liviano que el aire, posee una temperatura de inflamación de 700 °C y su llama alcanza una temperatura de 870 °C.

Según Utria (2014) la composición del biogás varía de acuerdo al tipo de desecho o biomasa utilizada y las condiciones en que se degrada. Generalmente el biogás se encuentra conformado por metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y otros gases en menor proporción (ver tabla 1.1).

Tabla 1.1. Composición promedio del biogás.

Compuesto	Símbolo	Volumen (%)
Metano	CH ₄	55 - 70
Dióxido de Carbono	CO ₂	35 - 40
Nitrógeno	N ₂	0,5 - 5
Sulfuro de Hidrógeno	H ₂ S	0,1
Hidrógeno	H ₂	1 - 3
Vapor de agua	H ₂ O	trazas

Fuente: Utria (2014).

Como se puede observar en la tabla 1.2 el metano es el componente mayoritario en esta mezcla de gases. Por lo tanto, el metano será el que determine el valor energético del biogás, dependiendo de su concentración. Por lo general el valor calorífico del biogás varía de 20 – 25 MJ/m³ o 4500 – 5 600 kcal/m³. Algunas de las propiedades típicas del biogás se presentan a continuación (Santos-Benavides, 2015):

Tabla 1.2. Composición del biogás derivado de diversas fuentes.

Composición		Desechos Agrícolas	Lodos Cloacales	Desechos Industriales

Metano	CH ₄	50 - 80 %	50 - 80 %	50 - 70 %
Dióxido de Carbón	CO ₂	30 - 50 %	20 - 50 %	30 - 50 %
Nitrógeno	N ₂	0 - 1 %	0 - 3 %	0 - 1 %
Sulfuro de Nitrógeno	H ₂ S	0 - 0,1 %	0 - 1 %	0 - 8 %
Hidrógeno	H ₂	0 - 2 %	0 - 5 %	0 - 2 %
Monóxido Carbono	CO	0 - 1 %	0 - 1 %	0 - 1 %
Oxígeno	O ₂	0 - 1 %	0 - 1 %	0 - 1 %
Amoniaco	NH ₃	trazas	trazas	trazas
Vapor de agua	H ₂ O	saturación	saturación	saturación
Orgánicos		trazas	trazas	trazas

Fuente: Utria (2014).

Como se puede observar en la tabla 1.3 el biogás es un poco más liviano que el aire, posee una temperatura de ignición de 650 – 750 °C, su llama alcanza una temperatura de 870 °C. Se debe tener mucho cuidado al manipular el biogás a altas presiones, controlando la presencia del oxígeno.

Tabla 1.3. Propiedades del biogás.

Propiedades	Valor	Unidades
Biogás	60 (CH ₄) – 40 (CO ₂)	% vol
Temperatura de ignición	650 - 750	°C
Presión crítica	7,5 - 8,9	MPa
Densidad nominal	1,2	kg/m ³
Densidad relativa	0,83	
Contenido de Oxígeno para la explosión	6 - 12	% vol

Fuente: Utria (2014).

1.2.5.1. Temperatura de la digestion.

La digestión anaerobia y la producción de gas pueden ocurrir en un amplio rango de temperaturas que normalmente va de 4 a 60 °C, siempre y cuando la temperatura se mantenga constante.

Existen rangos de temperaturas bien específicos en los cuales se observan los mejores resultados en la producción de biogás, estos son según (Santos-Benavides, 2015; Thu et al., 2012; Tobares, 2013; Torres et al., 2013; Trejo-Lizama et al., 2014; Utria, 2014):

- Psicrófilico (15 a 28 °C)
- Mesófilico (30 a 40 °C)

- Termofílico (45 a 60 °C)

Se observa que los rangos no necesariamente expresan continuidad o solapamiento en los valores de temperaturas debido a que corresponden sólo a las zonas más apropiadas.

En el rango Mesofílico hay un incremento para la generación de biogás desde 30 hasta 40 °C considerándose 35 °C la temperatura óptima.

La caída de temperaturas trae aparejado, entre otros la disminución del PH, el incremento de la concentración de los ácidos grasos volátiles, la disminución del volumen del gas, generando la elevación del contenido en el mismo, esto último debido a la mayor solubilidad del dióxido de carbono en la masa líquida al ser mayor la temperatura.

El análisis integral del efecto de la temperatura sobre la digestión anaerobia, debe considerar la influencia del tiempo de retención de sólidos sobre la conversión, lo cual se explica de la siguiente manera:

Debido a que el tiempo de retención de sólidos es una medida de la concentración de microorganismos por la cantidad de sustrato, entonces un aumento de este puede servir de compensación a una disminución en la temperatura de operación y teóricamente mayores deben permitir fluctuaciones de temperaturas sin inhibición del proceso, lo cual se debe a que cuando la velocidad de crecimiento de los microorganismos se encuentre por debajo del máximo, esto puede fácilmente ajustar su actividad metabólica cuando son cambiadas las condiciones ambientales.

Las bacterias metanogénicas tienen requisitos más estrictos en relación con el PH que las ácido génicas. El PH óptimo se encuentra entre 6,8 y 8,0. Aunque no existe una coincidencia total entre los autores acerca del rango del PH en que debe desarrollarse la digestión anaerobia, pues algunos recomiendan mantenerlo entre 6,8 y 7,6. Sin embargo, la mayoría coincide en afirmar que por debajo de 6,2 se inhibe la metanogénesis, y el proceso se interrumpe (Utria, 2014).

Las bacterias ácido génicas tienen una mejor tolerancia a los bajos valores del PH y la producción de ácidos puede continuar sin apenas perturbación mientras que se

inhibe la etapa consumidora del ácido. El resultado final es que si no se controla el PH, entonces se inhibe completamente la metanogénesis y el proceso se detiene (Lizama et al., 2014).

Por ello el control del PH es un parámetro de primera importancia para la digestión anaerobia. Para la mayoría de los residuales líquidos o suspensiones de ellos, el control de la inhibición del PH es necesariamente indispensable sólo durante la arrancada del proceso y en condiciones de sobrecarga, aunque se aconseja mantener un seguimiento de su comportamiento.

1.2.5.2. Tiempo de retención

El tiempo de retención se acostumbra a diferenciar entre el tiempo de retención de sólidos y el tiempo de retención hidráulica. Por definición, el primero es el tiempo promedio de los microorganismos dentro del reactor durante el tratamiento (desde la entrada hasta la salida) a su vez el segundo es el tiempo que el sustrato permanece dentro del reactor. Existen casos particulares, reactores de mezcla completa sin recirculación en los cuales no existen diferencias entre ellos (Utria, 2014).

La importancia del tiempo de retención de sólidos radica en que existe un mínimo que es necesario garantizar para que los microorganismos tengan la oportunidad de reproducirse en cantidad superior, o al menos a la concentración de estos a la entrada del sistema, de lo contrario ocurrirá el efecto de lavado de la mezcla, ya que los mismos serán eliminados con mayor rapidez que los que entran, bajando su concentración a valores mínimos que conducen a que se detenga el proceso de fermentación anaerobia.

1.2.6. Fertilizante orgánico o bioabono

Según Santos-Benavides (2015) el fertilizante orgánico (biol) contiene nutrientes que son fácilmente asimilados por las plantas haciéndolas más vigorosas y resistentes, convirtiéndose este residuo orgánico en un excelente fertilizante para los cultivos. El mismo que se encuentra constituido principalmente por la fracción orgánica que no es degradable anaeróbicamente. Su constitución puede variar mucho, dependiendo de las variaciones en el contenido de la materia orgánica

utilizada para alimentar el biodigestor y del tiempo de residencia de dicho material.

El biol es considerado un excelente fertilizante orgánico debido a que la digestión es anaeróbica, por lo tanto no existe pérdida en los nutrientes, siendo estos: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio; y en menor proporción cobre, manganeso, hierro, entre otros. Por ejemplo, en el proceso de digestión anaerobia el nitrógeno reduce sus pérdidas de un 18 % a un 1 %. Mientras que el carbono de un 33 % a un 7 %. Es decir, se conservan en el efluente los nutrientes que son esenciales para las plantas. Además, el nitrógeno que se encuentra en la materia orgánica está un 75 % en forma de macromoléculas orgánicas y un 25 % en forma mineral. En la digestión anaeróbica sufre una transformación reduciendo a un 50 % el nitrógeno orgánico y aumentando a un 50 % el nitrógeno en forma mineral, el cual es directamente asimilable por las plantas. El tratamiento, almacenamiento y cuidado que se debe dar al biol es muy importante, ya que al descargar el bioabono del biodigestor, éste va perdiendo su contenido de nitrógeno mineral, por lo tanto disminuirá sus características nutritivas propias del efluente (Santos-Benavides, 2015; Utria, 2014; VAZQUEZ GONZALEZ, 2015; Vega & Herrero, 2012).

1.2.7. Tipos de sustratos empleados en la producción de biogás y su preparación.

Según las investigaciones realizadas por varios autores tales como (Andrade et al., 2014; Barrera, 1993; P. L. Domínguez & Ly, 2000; Gomero Osorio, 2005; Liu et al., 2012; Losada et al., 2015; Santos-Benavides, 2015; Utria, 2014; VAZQUEZ GONZALEZ, 2015; Vega & Herrero, 2012) sugieren que los materiales que se pueden usar para la generación de metano son muy variados, por ejemplo: residuos de cosechas: maloca de caña de azúcar, malezas, paja, rastrojo de maíz y otros cultivos; residuos de origen animal: desechos de establos (estiércol, orina, paja de camas), camas de gallinas ponedoras, boñigas de cabras y ovejas, desperdicios de matadero (sangre, vísceras), desperdicios de pesca, restos de lana y cuero; residuos de origen humano: basura, heces, orina; residuos agroindustriales: tortas de oleaginosas, bagazo, salvado de arroz, desechos de

tabaco y semillas, desperdicios del procesamiento de hortalizas y frutas, limos de prensas de ingenios azucareros, residuos de té, polvo de las desmotadoras e industria textil; mantillo forestal: ramitas, hojas, cortezas; plantas acuáticas: camalote, algas marinas.

De manera general los residuos biodegradables que se reportan en el objeto de estudio pueden clasificarse de la siguiente forma:

- Residuos pecuarios que los conforman las deyecciones de los animales, desechos de establos (estiércol, orina) del ganado porcino.
- Residuos de pequeñas cosecha formados por los desechos de las producciones agrícolas, sobre los que el Dr. Bernd Linke del Instituto de Ingeniería agrícola de Bornin en Alemania, reporta un incremento en la producción de biogás cuando estos son mezclados con residuos de excretas por encima a la fermentación de los sustratos por separado aunque no se reportan las cantidades de biogás que se incrementan por este concepto. La demanda química de oxígeno es la cantidad total de oxígeno (mg) necesaria para oxidar completamente las sustancias orgánicas e inorgánicas contenidas en un litro de suspensión y se emplea como medida indirecta de la cantidad de sustrato transformable. Otra manera de expresar la cantidad de sustrato disponible es mediante los valores de sólidos totales que es el material remanente después de evaporar a 103 y 105 °C o de sólidos volátiles que es el material orgánico descompuesto a 550±50 °C (Utria, 2014).

Otro parámetro de la digestibilidad de los residuos es la demanda biológica de oxígeno que es el consumo de oxígeno, en mg/l de suspensión, durante la degradación por microorganismos durante cinco días a 20 °C. Tanto la demanda biológica de oxígeno como la demanda química de oxígeno son proporcionales al contenido de materia orgánica en la suspensión a degradar, pero la primera es más representativa de la degradabilidad de la misma. La relación Carbono/Nitrógeno es determinante en la estabilidad de la fermentación de los excrementos de los animales, considerándose óptima de 16/1 y aunque puede obtenerse biogás a valores mayores no debe superarse la proporción 30/1. En la tabla 1 del anexo 1,

se muestra la relación Carbono/Nitrógeno de varios animales (Herrero, 2008; Santos-Benavides, 2015; Utria, 2014).

Los volúmenes de gas producido suelen expresarse como m^3 biogás/ m^3 digestor o como m^3 biogás/Kg. Demanda química de oxígeno o demanda biológica de oxígeno y difieren según el tipo de residuo, la concentración de sólidos volátiles, la relación carga/volumen del digestor, el tiempo de retención de los residuos dentro del digestor y el diseño del mismo. En general la producción oscila entre 1 y 5 m^3 biogás/ m^3 digestor, o dicho de otra manera entre 0,3 y 0,5 m^3/kg . Sólidos volátiles. En la tabla 2 del anexo 1, se indican algunas características de las deyecciones animales (Moreta Criollo, 2013).

Antes de introducir los residuos orgánicos dentro del reactor hay que realizar una serie de operaciones de acondicionamiento. Dependiendo del tipo de reactor, el grado de pretratamiento será diferente. La finalidad de estas operaciones es introducir el residuo lo más homogéneo posible, con las condiciones físico químicas adecuadas al proceso al que va a ser sometido, y sin elementos que puedan dañar el digestor.

La forma de acondicionar los residuos de entrada puede ser por pretratamientos, reducción del tamaño de partícula, espesamiento, calentamiento, control de pH, eliminación de metales y eliminación de gérmenes patógenos.

Para que una planta de digestión anaerobia sea rentable es imprescindible la garantía en el suministro de materia prima, tanto en tiempo como en calidad.

Además, es muy importante la homogeneidad del sustrato a la entrada del reactor, para conseguir una eficiencia y rendimiento elevado de biogás. Por ejemplo, en plantas de purines, pobres en materia orgánica, y para conseguir la rentabilidad, es necesario el aprovechamiento de los efluentes de algún proceso, como por ejemplo los lodos de espesado, bien como salen o con un tratamiento posterior.

1.2.8. Tipos de Biodigestores para la producción de biogás

De acuerdo al régimen de carga o llenado las plantas de tecnología simple, se distinguen por dos tipos fundamentales:

- a) Biodigestores de flujo continuo: mayormente empleados para la obtención de volúmenes considerables de gas; son cargados y descargados en forma periódica, por lo general todos los días. Cualquier tipo de construcción es apropiada para una planta continua, pero el material de fermentación debe ser fluido y uniforme.
- b) Biodigestores de flujo discontinuo: Se emplea para pequeñas producciones de biogás. Estos se cargan una vez y quedan cerrados por un tiempo fijo de retención hasta que haya terminado el proceso de fermentación y no haya producción de gas. El digestor sellado, y la fermentación se realiza entre 30 y 180 días, en dependencia de la temperatura de medio ambiente.

La gran ventaja de los primeros es que las bacterias metano génicas reciben un suministro estable del material orgánico, por lo que producen biogás de manera más uniforme.

Según su estructura las plantas de tecnología simple más empleadas, pueden agruparse en varios tipos ampliamente desarrollados en la práctica:

- a) Planta de cúpula móvil (tipo Hindú): El digestor en forma de bóveda esférica (o cilíndrica) y tiene un depósito de gas móvil en forma de campana flotante. El gas se acumula en la campana, haciéndola subir y luego vuelve a bajar cuando se extrae el gas a través de un tubo instalado en la campana misma, según se muestra en la figura 1 del anexo 2.
- b) Planta de cúpula fija (Tipo chino): Consiste de una cámara de gas construida de ladrillos, piedras o concreto la cual permanece inmóvil y fija. Tanto el tope como la base del reactor son semiesféricos y están unidos por lados rectos. La estructura externa es sellada por varias capas para aislar el gas. Dicho gas durante el proceso es almacenado bajo el domo y desplaza algunos de los contenidos del digestor a la cámara del efluente según se muestra en la figura 1.1.

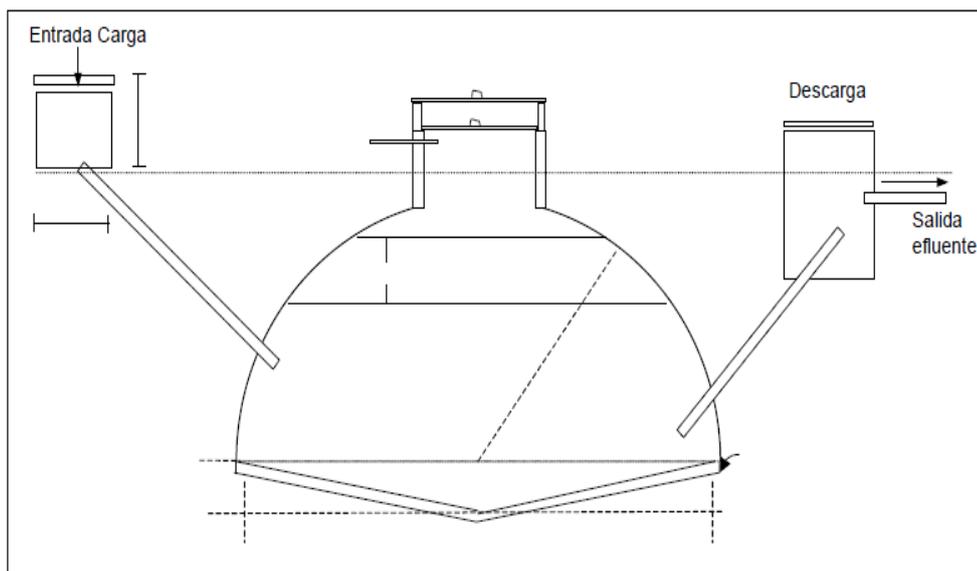


Figura1.1. Digestor de estructura sólida fija, tanque cilíndrico.

- c) De balón de plástico: Está compuesto por una bolsa de plástico, caucho, polietileno o geo membrana de PVC, completamente sellada. La parte inferior de la bolsa (75 % de volumen) se rellena con la carga, mientras en la parte superior de la bolsa (25 %) se almacena el gas y el gas puede almacenarse en una bolsa separada según se muestra en la figura 2 del anexo 2.

La tabla 1.1 resume las características de los digestores más utilizados, y la cual puede servir de guía para la selección del digestor adecuado para cada caso particular de acuerdo con los residuos disponibles y el monto de la inversión requerida.

Tabla 1.4. Características de algunos tipos de biodigestores.

Características	De estructura sólida fija	De estructura sólida móvil	De balón plástico
Cámara de digestión	Esférica/bajo tierra	Esférica/semiesférica	Semiesférica
Presión del gas	No constante	Constante	Muy baja presión de gas, que se aumenta Con sobre peso.
Loc. óptima	Todos los climas	Todos los climas	Todos los climas

Vida útil	20 años	10 a 15 años	5 años
Ventajas	Bajos costos de construcción. No posee partes móviles, metálicas ni partes expuesta que puedan oxidarse y que comprometan su protección.	Manejo fácil. El gas almacenado es visible a través del nivel de la campana.	Bajos costos de construcción. Fácil transporte e instalación. Construcción horizontal y plana que favorece en los lugares con alto nivel freático.
Desventajas	La presión puede ser muy alta por eso la cúpula tiene que ser cuidadosamente sellada; porosidades y grietas pueden afectar la planta.	Alto costo de la campana, que en la mayoría de los casos es metálica y por eso sujeta a corrosión y así más costo de mantenimiento por la pintura.	El material plástico está sujeto a daños y tiene que ser protegido.

Fuente: (GTZ, 1987)

1.2.8.1. Parámetros de control en un biodigestor

Los parámetros de control más importantes que se deben considerar son: la temperatura interna del biodigestor, potencial de hidrógeno del sustrato, tiempo de retención hidráulico, producción de biogás, agitación y mezcla del sustrato.

Dentro de la operación de un biodigestor, la temperatura es quizá el parámetro más importante a controlar. Esta variable es la reguladora de la velocidad de crecimiento bacteriano, la cual influye de forma directa en la degradación de la materia orgánica y la producción de gas. Aunque los rangos de temperaturas en las cuales pueden operar un biodigestor es muy amplio, van desde 10 hasta 60 °C, pero siempre es importante mantener la temperatura lo más constante posible, porque cambios bruscos y prolongados pueden ocasionar un desbalance en la proporción de microorganismos existentes dentro del mismo. Las bacterias metanogénicas son muy sensibles a cambios de temperatura y la velocidad de crecimiento que presentan las mismas es mucho menor que la de otros microorganismos que se pueden encontrar dentro de un biodigestor. Por esto, si se tienen cambios de temperatura bruscos y prolongados dentro del reactor, el tiempo de reposición que presentarán las bacterias metanogénicas será menor que el de

los otros microorganismos, por lo que se pueden sufrir descensos en el pH y reducción en la producción de biogás, originando de esta manera el mal funcionamiento del biodigestor (Santos-Benavides, 2015).

Existen tres regímenes de temperatura bajo los cuales puede operar un biodigestor: psicrófilico, mesófilico y termófilico.

Es importante remarcar que, sin importar el régimen bajo el cual se desee operar un biodigestor, lo primordial es mantener constante cualquier temperatura a la que esté operando, y en caso de realizar un cambio en la misma, hacerlo de manera lenta y pausada (Chungandro, 2010).

Las temperaturas de operación consideradas óptimas para la producción de gas en un biodigestor son: de 36 °C en el rango mesófilico y 55 °C en el rango termófilico.

Potencial de hidrógeno del sustrato:

Según Santos-Benavides (2015) y Utria (2014) el rango óptimo del potencial de hidrógeno (pH) bajo el cual un biodigestor opera de manera eficiente y presenta buena producción de biogás se encuentra entre valores que van desde los 6,5 hasta 7,5 de pH; es decir, un medio neutro. Al operar un biodigestor es muy importante mantener el valor de pH dentro de este rango, ya que si no se alcanzan o se exceden dichos valores la velocidad de degradación bacteriana disminuye o se detiene, minimizando o suspendiendo la producción de biogás. Algunas de las razones por las cuales el pH de un biodigestor se puede tornar ácido son: sobrecarga de materia orgánica o por cambios bruscos y prolongados en la temperatura.

Principalmente, los problemas que se tendrán durante la operación de un biodigestor, serán por valores de pH ácidos, y muy difícilmente se tendrán valores de pH por sobre los 8 durante la operación del mismo; motivo por el cual, solo se tratan medidas correctivas para descensos en el pH.

Tiempo de retención hidráulico de la biomasa:

Es el tiempo que la materia orgánica permanece dentro del digestor. Esto es desde el momento que ingresa, hasta su descarga o degradación. El Tiempo de

Retención Hidráulico (TRH) se calcula dividiendo el volumen útil del biodigestor para el caudal volumétrico diario de alimentación, obteniéndose el resultado en días. A continuación se presenta la ecuación 1.1 para TRH, según Santos-Benavides (2015) y Utria (2014).

$$\tau = \frac{V}{\dot{V}} \quad \text{Ecu. (1.1)}$$

Dónde:

τ .- tiempo de retención hidráulico; día.

V .- volumen del digestor; m³.

\dot{V} .- caudal volumétrico diario de alimentación; m³/día.

Producción de biogás:

La producción de biogás durante la operación de un biodigestor es un indicador directo del estado en el cual se encuentra el mismo. Una alta producción de biogás refleja una alta actividad bacteriana y una buena degradación de la materia orgánica. Sin embargo, es importante notar que el tener una elevada productividad de gas en un digestor no es el único parámetro relevante, dado que la generación de biogás podría ser alta, pero la calidad del mismo podría no ser la esperada. Por esta razón al operar y controlar un biodigestor, además de llevar el seguimiento del volumen de gas que produce, se debe analizar la calidad y cantidad de biogás obtenido, pues al tener una composición de gas con porcentajes de dióxido de carbono (CO₂) mayores a los de metano (CH₄), el biogás no será el adecuado para la generación de energía eléctrica, pudiendo determinar que la operación y el estado del reactor, no es el apropiado (Santos-Benavides, 2015; Utria, 2014).

1.2.8.2. Agitación y mezcla del sustrato

La producción de biogás que presenta un biodigestor se ve altamente beneficiada cuando existe la presencia de cualquier tipo o método de agitación en el mismo. El movimiento del digestor permite un buen contacto entre las bacterias, la materia prima en degradación y los compuestos intermedios, producto de las diferentes etapas del proceso digestivo, sea mayor, teniendo como resultado la homogeneización de la materia orgánica, preservación de las condiciones de

temperatura e incremento en la producción de biogás (Lizama et al., 2014; Lucas Júnior, 1994; Martí-Herrero, Acosta Bedoya, & Gonzales, 2013).

Al mantener la mezcla reactiva al interior del biodigestor, en constante agitación, se optimizan las condiciones para la generación de metano, además de evitar la formación de espumas, la sedimentación de la materia que se encuentra dentro del reactor, y la formación de zonas muertas por no estar en contacto la materia orgánica y los microorganismos.

1.2.9. Método experimental alternativo para medir el poder calórico del biogás

Se propone un método experimental alternativo para la medición del poder calorífico inferior del biogás. Según Santos-Benavides (2015) el presente método podría aplicarse ante la imposibilidad práctica y económica de conseguir el calorímetro de Junkers, que es el instrumento utilizado para medir el poder calorífico a presión constante de gases y líquidos. En la figura 1.2 se detallan los instrumentos utilizados en el experimento como son el gasómetro, recipiente aforado para el gas, termómetro, matraz aforado, agua para el sello hidráulico y el mechero de Bunsen.

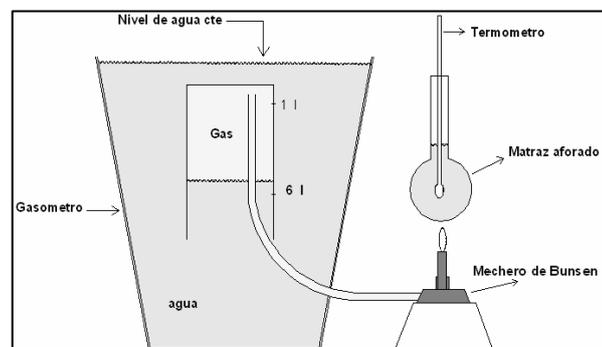


Figura 1.2. Esquema del método experimental.

Fuente: Santos-Benavides (2015).

El método calorimétrico propuesto consiste en quemar en idénticas condiciones de temperatura y presión un volumen de biogás (cuyo poder calorífico se quiere determinar) y el mismo volumen de un gas cuyo poder calorífico se conoce de ante mano, para este caso se utilizó gas de uso doméstico (GLP). Ambos volúmenes se incineran calentando un litro de agua por vez, y en base a la

variación de temperatura lograda en cada uno de los 2 ensayos, las masas de ambos gases y el poder calorífico del gas conocido, se puede calcular el poder calorífico del gas desconocido. La cantidad de gas quemado en ambos casos es de 5 litros, y ésta cantidad se encuentra confinada en un gasómetro, donde una columna de agua actúa tanto de sello hidráulico como de columna de presión.

El ensayo se empieza con un volumen inicial de gas de 6 litros y una presión de columna de agua de 25,3 cm, y se finaliza con un volumen de 1 litro y una presión de columna de agua de 11 cm. Por encima de esta columna de presión manométrica actúa la presión atmosférica sobre la superficie libre del agua que se mantiene siempre en el mismo nivel, lo cual explica que vayan variando las columnas de agua al ir quemándose el gas. Este método de presión variable en la inflamación del gas se eligió por cuestiones de facilidad operativa y porque los resultados finales no variarían con respecto a una combustión a presión constante. Las dos muestras de gas se queman una por una en el mismo mechero de Bunsen, y los dos ensayos se hacen uno a continuación del otro, en idénticas condiciones de temperatura ambiente y presión atmosférica (Santos-Benavides, 2015).

1.2.10. Ecuación de estado de los gases

Es una ecuación de estado de los gases constitutiva para sistemas hidrostáticos que describe el estado de agregación de la materia como una relación matemática entre la temperatura, la presión, el volumen, la densidad, la energía interna y posiblemente otras funciones de estado asociadas con la materia (Alonso, 1986).

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \qquad \text{Ecu (1.2)}$$

Dónde:

n.- cantidad de sustancia; moles.

T.- temperatura absoluta del gas; °K.

R.- constante universal de los gases ideales (8,314472); J/mol °K.

p.- presión absoluta; kgf/cm².

V.- volumen; cm³.

1.2.11. Definición de densidad

La densidad es una medida de cuánto material se encuentra comprimido en un espacio determinado; y es directamente proporcional a la masa e inversamente proporcional al volumen, la misma se expresa en la ecuación 2.3 (Alonso, 1986).

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{Ecu (1.3)}$$

Dónde:

m.- masa; kg.

ρ .- densidad; kg/m³.

La densidad del estiércol del ganado porcino. Liliana (2010) determinó que $\rho = 0,994 \text{ g/cm}^3$.

1.2.12. Presión de la columna de agua

La presión representa el peso de una columna de agua pura ($\rho = 1\,000 \text{ kg/m}^3$). El múltiplo más utilizado es el metro de columna de agua (m.c.a.), que será la presión medida en el fondo de un volumen de líquido, la misma que se representa mediante la ecuación 2.4 (Alonso, 1986):

$$p = \rho \cdot h \cdot g \quad \text{Ecu (1.4)}$$

Dónde:

h.- altura; m.

g.- gravedad (9.80665); m/s².

1.2.13. Calor específico de un cuerpo

Es una magnitud física que se define como: la cantidad de calor (Q) representada en la ecuación 2.5, donde hay que suministrar a la unidad de masa (m), de una sustancia o sistema termodinámico para elevar su temperatura en una unidad (ΔT). En general, la cantidad de calor específico depende del valor de la temperatura inicial, de acuerdo a lo descrito por Alonso (1986).

$$Q = m \cdot ce \cdot \Delta T \quad \text{Ecu (1.5)}$$

Dónde:

Q.- calor; kcal.

ce.- calor específico; kcal/kg °C.

ΔT .- variación de temperatura; °C.

1.3. Análisis Económico

El análisis económico estudia la estructura y evolución de los resultados de la empresa (ingresos y gastos) y de la rentabilidad de los capitales utilizados. Este análisis se realiza a través de la cuenta de Pérdidas y Ganancias, la cual para que sea significativa debe cumplir dos requisitos:

La cuenta de resultados –también se denomina así a la cuenta de Pérdidas y Ganancias- puede variar sensiblemente según los criterios de valoración que se hayan adoptado, por lo que debe ser depurada de tal forma que refleje un resultado homogéneo con otros períodos de tiempo y otras empresas. Lo más lógico para evitar este problema es haber observado durante el ejercicio los principios de contabilidad generalmente aceptados.

A la cuenta de resultados afluyen una serie de flujos de muy distinta naturaleza y deben estar claramente diferenciados entre los resultados de explotación normal y los resultados extraordinarios o atípicos.

Las cuestiones que comprende el análisis económico son:

La productividad de la empresa, que viene determinada por el grado de eficiencia, tanto cualitativa como cuantitativa, del equipo productivo en la obtención de un determinado volumen y calidad del producto.

La rentabilidad externa, la cual trata de medir el mayor o menor rendimiento de los capitales invertidos en la empresa.

El examen de la cuenta de resultados, analizando sus distintos componentes tanto en la vertiente de ingresos y gastos.

- Costo – Beneficio:

El costo-beneficio es una lógica o razonamiento basado en el principio de obtener los mayores y mejores resultados con un menor uso de recursos, logrando eficiencia por una mayor producción y venta de productos. También podemos decir que es una relación matemática que compara los dólares que gastamos, contra los dólares que tenemos de utilidad sirve para ver cómo va evolucionando el proyecto.

La relación costo-beneficio es el cociente de dividir el valor actualizado de los beneficios del proyecto (ingresos) entre el valor actualizado de los costos (egresos) a una tasa de actualización igual a la tasa de rendimiento mínima aceptable (trema), a menudo también conocida como tasa de evaluación.

Los beneficios actualizados son todos los ingresos actualizados del proyecto, aquí tienen que ser considerados desde ventas hasta recuperaciones y todo tipo de “entradas” de dinero; y los costos actualizados son todos los egresos actualizados o “salidas” del proyecto desde costos de operación, inversiones, pago de impuestos, depreciaciones, pago de créditos, intereses, etc. de cada uno de los años del proyecto. Su cálculo es simple, se divide la suma de los beneficios actualizados de todos los años entre la suma de los costos actualizados de todos los años del proyecto.

- Análisis de rentabilidad económica:

Para realizar el análisis de rentabilidad económica de este o cualquier proyecto se toma en consideración que el propósito de invertir un capital de dinero tiene como propósito generar beneficios económicos, sociales, ambientales, entre otros para quienes invierten.

Para el presente estudio de este caso particular se tomará en cuenta el valor del dinero en el tiempo como es: el valor actual neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el período de recuperación del Capital Descontado (PRCD), este período permite conocer el tiempo de recuperación de la inversión, el cual nos ayudara para saber si el proyecto es rentable o no.

Cálculo del Valor Actual Neto:

Para el cálculo de VAN se resta la suma de los flujos descontados a la inversión inicial como se puede observar en la ecuación

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{BN_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad \text{Ecu (1.6)}$$

Criterios de referencia para catalogar al proyecto como aceptado o rechazado:

Si el $VAN > 0$ el proyecto es aceptable.

Si el $VAN = 0$ el proyecto es neutro, puede ser aceptado o rechazado.

Si el $VAN < 0$ el proyecto se rechaza.

Calculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR):

La TIR representa la tasa de interés más alta que un inversionista puede pagar sin que este pierda dinero, siempre que los fondos para la inversión estén financiados y el préstamo se pague con el ingreso de la inversión a medida que estos se producen. La fórmula de cálculo de la TIR.

$$\sum_{t=1}^n \frac{BN_t}{(1+r)^t} - I_0 = 0 \quad \text{Ecu (1.7)}$$

Luego de tener el dato calculado de VAN se debe tener en consideración que:

Si $r \geq i$ se acepta el proyecto

Si $r < i$ se rechaza el proyecto

Siendo i la tasa de descuento.

Calculo del periodo de recuperación del capital Descontado (PRCD).

Para el cálculo de periodo de recuperación del capital, este se debe expresar en el número de periodos necesarios para recuperar el valor de la inversión inicial I_0 , donde cada flujo es descontado con una tasa de interés que representa el costo de oportunidad del inversor

$$PRCD \rightarrow \sum_{t=1}^n \frac{BN_t}{(1+i)^t} = I_0 \quad \text{Ecu (1.8)}$$

Para saber si un proyecto es aceptado o rechazado, esto dependerá del tiempo de recuperación, al igual que del tipo de proyecto que se esté realizando como base se puede decir que:

- Si el proyecto tiene una recuperación de capital de 1 año este tiene gran rentabilidad.
- Si el proyecto tiene una recuperación de capital de hasta 3 años este tiene una rentabilidad aceptable o promedio.
- Si el proyecto tiene una recuperación de capital de 6 años o más tiene una rentabilidad pequeña y tendría que ser analizada.

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

El presente capítulo tiene como objetivo establecer la metodología que posibilite el desarrollo satisfactorio de la investigación y describir las herramientas utilizadas en el análisis energético de la entidad y en la determinación del potencial de la biomasa. La selección y establecimiento de metodologías para el desarrollo de investigaciones es de gran importancia, ya que la misma constituye la conexión necesaria entre el problema y los resultados obtenidos

2.1. Objeto de la Investigación

La granja Porcina García está ubicada en el Cantón La Maná, barrio Miraflores sector el Toquillal, tiene un espacio de 34x20 m², se dedica a la producción y engorde de cerdos, la granja tiene 100 cerdos actualmente, tiene 5 habitantes, así como una cocina a gas.

2.1.1. Área de influencia directa

En la granja en sus inicios se contaba con reproductores en números de 28 hembras y 2 machos; en la actualidad se cuenta con 100 cabezas de ganado porcino. Para la alimentación los insumos básicos que son usados son: maíz, soya, afrecho de trigo, harina de banano verde, subproductos de cervecería, palmiste, melaza, harina de hueso, carbonato de calcio, núcleos vitamínicos, núcleos de minerales, núcleos de aminoácidos y otros aditivos. El proceso de elaboración de alimentación es a través de la cocción con la utilización de GLP y leña.

El consumo de alimento se da de acuerdo al peso y estado del animal, tal cual se resume en la tabla 2.1. Los cerdos reproductores tendrán un consumo ya establecido donde el verraco consumirá 2 kg. por día, se aumentará de acuerdo al servicio, las hembras gestantes consumirán 2 kg. por día. Las hembras secas 2.5 – 3 kg./día y las cerdas lactantes 2.5 kg. para su consumo.

Edad semanas	Peso final kg.	Consumo alimento kg.	Tipo de alimento
1-4	7.26	3.311	Pre-destete
5-6	11.98	11.102	Destete
7-10	28.76	28.014	Iniciador
11-14	50.17	48.18	Crecimiento
15-17	68.04	49.693	Engorde
18-22	98.42	99.896	Finalizador
Total		240.196	

Tabla 2.1. Consumo de alimento porcino.

Fuente: MAGAP 2014

La granja cuenta con las siguientes características:

Tabla 2.2. Carga y consumo energético de la granja.

Criterios	Unidades	Potencia (W)	Pot. Instalada Total (W)	Horas (h)	Energía (Wh)	(kWh)
Lámparas	4	150	600	8	4800	4,80
Focos	10	60	600	8	4800	4,80
Bomba de agua	1	7460	7460	1,5	11190	11,19
Refrigeradora	1	350	350	10	3500	3,5
Licuada	1	350	350	0,5	175	0,175
TV	1	300	300	4,5	1350	1,35
Total	18	8670	9660	32,5	25815	25,815

Elaborado por: Mauricio Villacrés Jirón

Para la obtención del consumo anual de la potencia consumida se solicitó a la administración de la granja las planillas de pago del consumo eléctrico, que abastece la carga de la residencia, la iluminación de los galpones en la figura 2.1 se aprecia el contador de energía que se encuentra instalado en la granja.



Figura 2.1. Registro del contador de energía.

En la tabla 2.3 se muestra el comportamiento de la producción y el consumo de portadores energéticos.

Tabla 2.3. Comportamiento de la producción y el consumo de portadores energéticos en la Granja Porcina García en el año 2015.

Concepto	U/M	Promedio	Meses											
			E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Producción de carne	Kg	875,25	907	821	935	835	802	921	886	845	901	845	847	958
Energía Eléctrica	kWh	655,67	638	662	658	621	689	601	651	629	687	645	699	688
GLP	kg-GLP	101,25	135	90	90	90	90	135	90	90	90	90	90	135
Leña	m ³	25,917	30	23	26	22	28	35	18	16	25	28	25	35

Elaborado por: Mauricio Villacrés Jirón

Cantidad de consumo por año del gas licuado de petróleo:

El consumo de gas licuado de petróleo (GLP) se obtuvo de las facturas proporcionadas por la administración de la granja para los meses de enero a diciembre del 2015. En la figura 2.2 se observa los cilindros de GLP dispuestos en la parte posterior de la granja, los mismos que se encuentran al aire libre, por seguridad, ante una posible fuga que se pueda presentar en la válvula o manguera.



Figura 2.2. Cilindros de GLP.

Biomasa vegetal utilizada anualmente:

La leña (eucalipto, capulí, pino, desechos de cosechas y otros) es un recurso energético sustituyente al GLP, también es utilizado en las chimeneas y fogones de la granja para obtener energía térmica (figura 2.3). Para conocer el consumo anual de la biomasa vegetal se solicitó a la administración las facturas de gastos realizados entre los meses de enero a diciembre del 2015.



Figura 2.3. Biomasa vegetal utilizada como leña.

2.2. Determinación de la carga diaria del estiércol en la granja

Se realizó el análisis estadístico del ganado porcino según sexo y crías, datos levantados in-situ (ver figura 2.4) en conjunto con el gerente de la granja, con esos datos se tomó un valor promedio del peso por animal vivo.



Figura 2.4. Sección de la granja objeto de estudio.

Para el análisis del porcentaje de la carga diaria del estiércol disponible en los galpones de la granja, se utilizaron 5 cerdos elegidos aleatoriamente, entre un peso

de 100 a 250 kg, las excretas generadas diariamente se sumaron y se dividieron para los 5 cerdos, de esta manera se pudo determinar el promedio de carga diaria.

La prueba se realizó durante 5 días, utilizando un balde de 12 litros de capacidad, una pala manual y una balanza (50 kg) como se muestra en la figura 2.5, de esta manera se determinó el peso del estiércol, esto se realizó en los meses de agosto y septiembre del año 2015, por lo que sus resultados fueron tabulados de forma global, y que a futuro pueden realizar trabajos de mayor alcance y profundidad. Sin embargo se consideran resultados suficientes para el presente proyecto, y así contribuir con una política energética y de salud a mediano y largo plazo.



Figura 2.5. Estimación del peso de biomasa.

Tomando datos estadísticos de diferentes autores se ha elaborado tablas, de acuerdo con las posibles fuentes de biogás. En la tabla 2.4 aparecen las diferentes fuentes de biogás aportadas por las diferentes excretas de animales.

Tabla 2.4. Posibles fuentes de biogás.

Tipo de animal	Excreta húmeda (kg)/día por animal	Metros cúbicos de biogás/días.	Proporción Excreta: Agua
Vaca	10	0,360	1:1
Toro	15	0,540	1:1
Cerdo (50 kg)	2,25	0,101	1:1-3
Pollo (2 kg)	0,18	0,008	1:3-8
Caballo	10	0,300	1:1-3
Carnero	2	0,100	1:1-3
Ternero	5	0,200	1:1
Persona adulta	0,40	0,025	1:1

Fuente: (Carrillo, 2004).

De acuerdo a ello se determina los valores de la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Cantidad de biomasa residual del ganado, según tipo y peso vivo.

Especie animal	Peso vivo medido (kg)	Número animales	kg Estiércol/día	TOTAL kg Estiércol/día
Hembras en reemplazo	150	6	6,75	40,5
Machos	250	4	9	36
Hembras en gestación	250	50	11,25	562,5
Lechones	100	40	4,5	180
TOTAL	750	100	31,5	819

Fuente: MAGAP 2014

2.3. Muestreo y caracterización de la materia prima

En el presente ensayo se requieren determinar las características físicas del estiércol del ganado porcino, para lo cual se aplicará las siguientes metodologías.

2.3.1. Metodología para el muestreo

Para el ensayo se recogieron excretas frescas directamente de los corrales (figura 2.6), en distintos sitios, con el fin de asegurar resultados precisos de los parámetros físicos-químicos del estiércol. Las muestras fueron recogidas en un recipiente de 1 000 ml; para luego pesarlos en una balanza. El proceso se efectuó en las primeras horas de la mañana. Materiales: guantes de nitrilo, mascarilla, pala manual, termómetro, recipiente y una balanza.



Figura 2.6. Mezcla del excremento del ganado.

2.3.2. Metodología para la caracterización del estiércol

Con el fin obtener una mezcla pastosa, las excretas del ganado porcino recogidas directamente del corral, se mezclaron hasta conformar una solución homogénea, de acuerdo a lo sugerido por Carrillo (2004), donde se aplica una relación de 1:1,3; es decir, 1 kg de excretas ganado porcino y 1,3 litros de agua sin cloro. Según Santos-Benavides (2015), preferible utilizar agua de los canales de regadío o vertientes, pues el cloro, disminuye el crecimiento de la población de los microorganismos.

2.3.3. Evaluación en in-situ de la materia prima

Los parámetros fundamentales del estiércol que se deben determinar en campo son: la temperatura y el potencial de hidrógeno.

2.3.3.1. Determinación del potencial de hidrógeno y temperatura

En el presente estudio, antes de iniciar con el experimento, se debe conocer el valor del pH y temperatura, para esto se utilizó el equipo HANNA HI 9813-6N. El mismo que es de medición directa, simplemente se introduce el sensor en la disolución y muestra los valores en el LCD del equipo.

2.4. Selección del modelo del biodigestor

Los instrumentos, así como la instalación experimental fueron los mismos empleados en la investigación de Santos-Benavides (2015). El proyecto cuenta con la identificación del problema, de acuerdo a la visita técnica realizada en campo para la implementación del biodigestor, así como también se dispone del dato estadístico de la materia prima (excretas del ganado porcino) producido en la granja, adicionalmente se tienen los detalles de los principales factores a considerar para el diseño del reactor como son: selección del sitio, parámetros de diseño, cantidad de materia prima y diseño de forma, también se menciona la operación y funcionamiento del mismo.

Las Fórmulas que se utiliza para el dimensionamiento del biodigestor son las siguientes:

Ecuación para calcular la masa del biogás:

$$p \cdot V = M \cdot R \cdot p \cdot T \quad \text{Ecua (2.1)}$$

Ecuación para calcular el calor:

$$Q_{bt} = \frac{Pc \cdot M_{bt}}{dbt} \quad \text{Ecua (2.2)}$$

Ecuación para calcular la cantidad de estiércol

$$CE = 8 \frac{m^3 \text{Biogás}}{\text{día}} \cdot \frac{1kgEF}{0,20kgST} \cdot \frac{1kgST}{0,2m^3 \text{Biogás}} \quad \text{Ecua (2.3)}$$

Ecuación para calcular el volumen del biodigestor

$$V_b = CD \cdot TR \quad \text{Ecua (2.4)}$$

Diámetro del biodigestor

$$V_b = \frac{\pi \cdot \emptyset^2}{4} \cdot H \quad \text{Ecua (2.5)}$$

Ecuación Para el Dimensionamiento de la Cúpula

$$f_1 = \frac{1}{5} \cdot \emptyset \quad \text{Ecua (2.6)}$$

Ecuación para calcular el radio del biodigestor:

$$r = \sqrt{\frac{V_b}{\pi \cdot H_b}} = \sqrt{\frac{16.56 m^3}{3,1415 \cdot 2.76 m}} = \quad \text{Ecua (2.7)}$$

Ecuación para calcular el casquete

$$R_1 = \frac{(r)^2 + (f_1)^2}{2f_1} \quad \text{Ecua (2.8)}$$

Ecuación para calcular el volumen de la cúpula

$$R_1 = \frac{(r)^2 + (f_1)^2}{2f_1} \quad \text{Ecua (2.9)}$$

Ecuación para calcular el volumen del cilindro

$$V_2 = \pi \cdot r^2 \cdot H_b \quad \text{Ecua (2.10)}$$

Ecuación para calcular la superficie estructural

$$S_1 = 2\pi \cdot R_1 \cdot f_1 \quad \text{Ecua (2.11)}$$

Ecuación para el cálculo de volumen del tanque de mezcla

$$V_m = \frac{\pi \cdot d_m^2}{4} \cdot h_m \quad \text{Ecua (2.12)}$$

Ecuación para calcular la capacidad del tanque de descarga

$$V_d = \frac{\pi \cdot d_m^2}{4} \cdot h_d \quad \text{Ecua (2.13)}$$

2.5. CONSIDERACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CUALQUIER MODELO DE BIODIGESTOR

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, generando además un biofertilizante.
- El modelo elegido debe ser el conveniente para las condiciones climáticas y 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.

- La localización será la apropiada según la distancia de los puntos de consumo, la ubicación de los residuos y la fuente de agua, la topografía del terreno, la textura del suelo y el nivel freático.

2.5.1. Factores para el dimensionamiento de biodigestores de tecnología simple

Para el correcto dimensionamiento de un biodigestor de tecnología simple se requieren conocer los factores siguientes:

- a) Demanda energética del usuario.
- b) Cantidad de biomasa disponible.
- c) Temperatura media del lugar.
- d) Producción específica de gas según la biomasa disponible.

El conocimiento de estos factores permite dimensionar el volumen requerido del biodigestor, el volumen del almacenamiento del gas y el volumen del tanque de compensación.

2.6. Obtención del biogás mediante reactores prototipos

Para la producción de biogás, se debe introducir la materia prima en un recipiente hermético, sin la presencia de oxígeno, donde las bacterias trabajaran en el proceso anaeróbico, de esta manera se obtendrá el gas metano.

La metodología aplicada para el estudio comprende lo seguido por Santos-Benavides (2015) en el que siguió el siguiente procedimiento:

- Construcción del tanque tipo “Batch”
- Ejecución del ensayo con el biodigestor tipo “Batch”
- Análisis físico del biogás obtenido

2.7. Métodos y materiales utilizados en la construcción del reactor

La construcción del tanque se realizó siguiendo lo descrito por Santos-Benavides (2015), en lámina de acero galvanizado de un espesor de 1,58 mm (1/16”), con un volumen de 40 litros, en la cual se alojará la biomasa a fermentar. Al tanque están colocadas directamente tres tuberías de acero galvanizado, de acuerdo al diseño; la primera de 12,25 mm (1/2”) de diámetro que se encuentra en la parte superior del tanque permite medir la presión del biogás a través del manómetro y el sensor

de presión; la segunda tubería de 61,25 mm (2 ½”) de diámetro se instaló de igual forma en la parte superior y permite cargar la biomasa o también tomar muestras, se encuentra sumergida en el efluente que a su vez permite hacer un sello hidráulico; la tercera tubería de 12,25 mm se encuentra sobresalida a un costado del tanque pero en su interior forma un cuello de ganso que permite la salida del efluente por la parte superior. Cada una de los conductos están selladas herméticamente para asegurar la anaerobiosis; la primera y la segunda tubería con llaves de globo; la tercera con una tapa roscada. Además, en la figura 2.7 se puede observar el sistema.

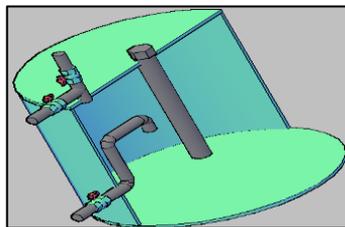


Figura 2.7. Biodigestor tipo batch utilizado en el experimento.

Finalmente, se tiene el gasómetro (figura 2.8), donde se almacenará el biogás; para esta aplicación se utilizó una goma de vehículo (capacidad 25 litros), a la misma se colocó una manguera conectada directamente al biodigestor y sujetadas en sus extremos con abrazaderas debido a la presión existente.



Figura 2.8. Gasómetro utilizado para el experimento.

2.8. Ejecución del ensayo con el biodigestor tipo “batch”

La materia prima utilizada para los dos reactores fue recogida de forma similar como se hizo para la metodología del muestreo.

Preparación de la carga: se pesó el estiércol del ganado porcino, 10 000 gramos en total y se agregó 13 000 ml de agua sin cloro, este procedimiento se realizó para el reactor, asumiendo la relación 1:1,3. Luego se diluyó hasta formar una mezcla homogénea; se tomó la lectura del pH y su temperatura, en estas condiciones se cargó el tanque del biodigestor experimental.

Monitoreo de la producción de biogás: una vez cargado el reactor con la materia prima, se los colocó dentro de una cubierta, el objetivo primordial es mantener una temperatura óptima para el proceso de biodegradación de la materia orgánica. El monitoreo se ejecutó desde el 3 de octubre hasta el 25 de noviembre del 2015.

Agitación: En el tanque reactor por su geometría no resulta difícil poder llevar a cabo el proceso de agitación. Este proceso se realizó manualmente con el objetivo de romper la costra o película que se forma en la parte superior de la biomasa disuelta, esta costra impide la producción eficiente del biogás. Para el biodigestor tipo Batch, se ejecutó el 3 y 8 de noviembre, ejecutándolo durante todo el día.

Se utilizó un tanque metálico para el biodigestor sin aislamiento térmico (convencional), dos llaves tipo globo, un manómetro y una boquilla para el biogás. La figura 2.9 muestra el biodigestor utilizado en el experimento donde se llevará a cabo la biodegradación de la materia orgánica. El gas producido en el biodigestor se acumulará en su propio gasómetro y mediante una manguera se transportará hacia el acumulador tipo dona (tubo de vehículo), el mismo que permite cuantificar la cantidad de biogás producido.



Figura 2.9. Biodigestor sin aislamiento térmico.

2.8.1. Procedimiento

Para el registro de las variables de temperatura, cantidad de metano (en ppm), presión del gasómetro y pH, se realizaron en hojas de papel con el formato establecido para el experimento, estos datos se recopilaron manualmente durante los 36 días que duró el ensayo en el horario de 8H00, 14H00 y 21H00. En el Anexo 1 se encuentra el formato mencionado, para luego transcribir en una hoja de cálculo y realizar su respectivo análisis técnico (Anexo 2). Las muestras de biogás utilizadas para medir la cantidad de metano fueron recogidas en una jeringa de 60 ml (ver Anexo 3).

2.8.2. Equipos e instrumentos

Para el valor de temperatura interna del biodigestor y el pH se midió con el instrumento HANNA HI 9813-6N; rango de temperatura de 0 a 60 °C, con una precisión de 0,1 °C y el rango del pH es de 0 a 14 con una precisión de 0,1 pH.

La temperatura del medio ambiente se midió con un termómetro analógico tipo bolígrafo de carátula, que tiene un intervalo de -10 a 140 °C. La figura 2.10 muestra el termómetro tipo caratula.



Figura 2.1. Termómetro tipo carátula.

La presión interna del biodigestor (gasómetro) se tomó a través de un manómetro analógico tipo bourdon, el mismo que tiene un rango de 0 a 50 psi, la figura 2.11 muestra la ubicación del instrumento de medida.



Figura 2.2. Manómetro analógico.

La cantidad de metano se evaluó con el sensor SAW-MQ2, que tiene un intervalo de 5 000 a 20 000 ppm de metano. La figura 2.12 muestra el sensor.

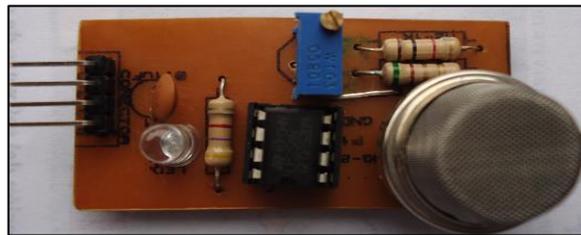


Figura 2.3. Sensor de metano SAW-MQ2.

El registro y visualización de las variables físicas como: temperatura ambiente, temperatura del reactor y la presión, se realizará mediante el software SAW-BIOGÁS creado con la herramienta gráfica LabView 7.1 NI desarrollado por Santos-Benavides, W. R. (2015) en su investigación. En la figura 2.13 se puede observar el ambiente gráfico del software.

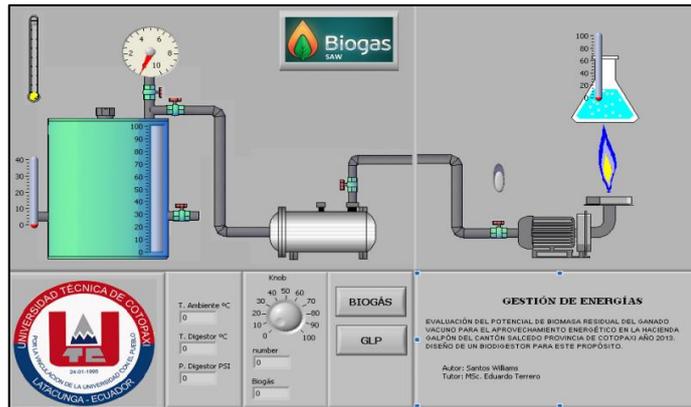


Figura 2.13 Pantalla del software SAW BIOGAS.

2.8.2. Equipo e instrumentos

En el diagrama de bloques de la figura 2.14 se observa la disposición de los elementos que intervienen en la adquisición de datos; es así que los sensores de temperatura, presión y gas, transforman la variable física a eléctrica; y la tarjeta DAQ realiza la conversión análoga digital de las señales eléctricas de los sensores, y mediante el software diseñado en LabView 7.1 monitorea en tiempo real estas variables y las presenta en la pantalla del PC. Además, el mismo software genera una base de datos que permitirá realizar el análisis estadístico de todas las variables físicas medidas en el biodigestor (Santos-Benavides, 2015).

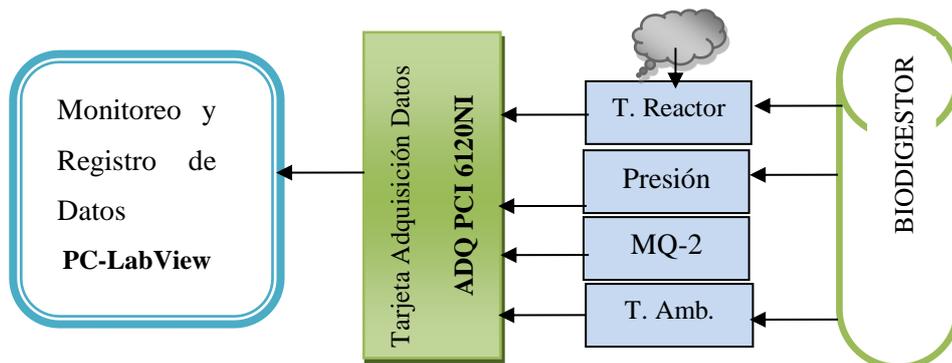


Figura 2.14. Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos.

a) Temperatura interna

Los datos de la temperatura interna del biodigestor se recopilaban a diario hora a hora, durante los 36 días que duró el ensayo, mediante un termopar tipo K (cromel-alumel; [0 – 1317 °C]), que se encuentra alojado en la periferia del reactor

(ver figura 2.15 literal “a”), permitiendo tener un contacto directo con el sustrato; y así obtener datos reales de la temperatura interna. El monitoreo de la variable física antes mencionada se puede visualizar en tiempo real a través del software SAW-BIOGAS que fue diseñado para este propósito, en la figura 2.15 literal “b” se interpreta gráficamente el termopar y su ubicación. Adicionalmente, tiene la capacidad de almacenar los datos hora a hora en una hoja de cálculo con los parámetros requeridos para el ensayo. En el Anexo 2, columna 3 se visualiza el valor de temperatura registrado por el software y almacenado en una matriz de datos.

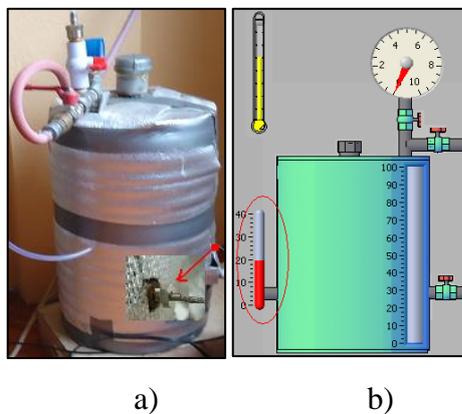


Figura 2.15. a) Termopar tipo “k” colocado en el biodigestor, b) Visualización de la medida de temperatura en la pantalla del PC.

b) Temperatura del medio ambiente

Para el monitoreo y registro de datos del entorno donde se realiza el ensayo, se aplica un método idéntico al utilizado en el registro de temperatura interna del biodigestor. En la figura 2.16 literal “a” se puede identificar el termopar cerca de los reactores, de esta manera permitirá obtener valores de temperatura máxima, promedio y mínima que servirían para evaluar la temperatura ambiental. El registro se realizó durante los días de la investigación (columna 2 del Anexo 2).

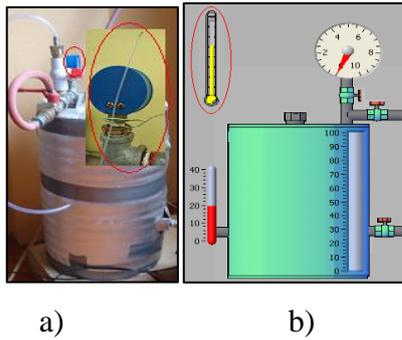


Figura 2.16. a) Biodigestor con termopar tipo “K”, b) Simulación del termopar en la pantalla del PC.

c) Potencial de hidrogeno

Fueron tomados datos a diario; el primero 08H00 y el segundo a las 18H00, permitiendo así obtener un control efectivo del pH. Hilbert (2008) y Santos-Benavides, W. R. (2015) sugieren que estos valores deben encontrarse entre 6,8 a 8,2 de pH y al apartarse de éste rango la producción de biogás se detiene. Para medir la acidez de la mezcla de estiércol se utilizó un instrumento HANNA modelo H9813-6N (0 – 14 pH +/- 0,1 pH); en la figura 2.17 literal “b” se puede apreciar la manera de cómo se mide el valor de acidez en el birreactor, además se contrastó con cintas de tornasol, pero estas no dan valores decimales (figura 3.18 literal “a”). En el Anexo 2 columna 8 se encuentran registrados los valores de pH del biodigestor.



Figura 2.17. a) Cintas de tornasol, b) Instrumento HANNA H9813-6N.

d) Volumen de biogás

Para almacenar el biogás generado se utilizó una boya de carro (gasómetro) de una capacidad volumétrica de 25 litros (figura 2.18), la misma se une al biodigestor mediante una manguera de presión. En el Anexo 2 columna 7 se encuentran los datos del volumen generados por el biodigestor.



Figura 2.18. Gasómetro para almacenamiento de biogás.

e) Presión interna del reactor

La medición de presión interna del reactor se puede visualizar la presión en un manómetro analógico redundante colocado en la misma tubería, con un rango de 0 - 50 psi, también se realiza con un sensor de estado sólido HGRADE-MV 15PSI D, el mismo que tiene un rango de 0 - 15 psi, suficiente para este tipo de ensayo; en el Anexo 2 columna 4 se presentan los valores de presión interna del biodigestor.

2.8.3. Análisis físico del biogás

La metodología aplicada para este análisis es por:

- Determinación de la cantidad de partículas por millón (ppm) de metano.
- Análisis comparativo de una propiedad termodinámica aplicando el método calorimétrico alternativo.

Según Santos-Benavides (2015) la cantidad de partículas de metano (en ppm) presentes en el biogás determinará el poder calórico, el mismo que será medido por un sensor de estado sólido SAW-MQ2. Este autor plantea que el biogás está constituido en su mayoría por: 55-70 % de metano, 27-44 % de dióxido de carbono y entre un 1-5 % de otros gases como hidrógeno, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno; siendo estos gases despreciables por su bajo porcentaje.

Materiales

- Sensor SAW-MQ2
- Software SAW-BIOGÁS
- PC

- Jeringa de 60 ml

Procedimiento

Se utilizaron 60 ml de biogás tomados directamente del biodigestor, con una jeringuilla.

Con el equipo en funcionamiento; la jeringuilla llena de biogás se descargó poco a poco cerca del sensor SAW-MQ2, inmediatamente, el sensor detectaba la presencia de las partículas de metano (led se encendía en un tono azulado) y su valor se visualizaba directamente en el software SAW-BIOGAS (ver Anexo 4).

Las muestras de biogás para su respectivo análisis se tomaban cada dos días, dichos valores se presentan en el Anexo 3.

2.8.4. Análisis comparativo de una propiedad termodinámica

Según Santos-Benavides, W. R. (2015) este método consiste en quemar en idénticas condiciones de temperatura y presión constante un volumen de biogás (cuyo poder calórico se desconoce) y un mismo volumen de GLP cuyo poder calórico es conocido. Ambos volúmenes se queman calentando un litro de agua por vez, y en base a la diferencia de temperatura lograda en los ensayos, se puede determinar el poder calórico del biogás.

Materiales

- 1 Termómetro analógico y digital.
- 1 Reloj digital.
- 6 000 ml de biogás.
- 6 000 ml de GLP.
- 1 Quemador Bussen.
- 1 Recipiente metálico con capacidad de 1 500 ml.
- 20 000 ml de agua.

Procedimiento

Para este ensayo se usó GLP de un cilindro de 15 kg, de alta pureza (butano), comercializado como gas de uso doméstico, cuyo poder calorífico (certificado por

la envasadora de gas “Con Gas” y coincidente con la bibliografía encontrada) se detalla así: Poder calorífico (pc) de 22 000 kcal/m³ (Santos-Benavides, 2015).

Y para la prueba del biogás se utilizó el gas metano que se producía diariamente en el biodigestor tipo “Batch”, procedente de la descomposición anaeróbica de las excretas del ganado porcino.

Fueron realizadas 3 pruebas diariamente por cada tipo de gas, de manera que se cumplieran dos condiciones fundamentales: una que la presión atmosférica y la temperatura ambiente tengan una variación dentro de un margen mínimo; y la segunda, que el biogás utilizado tenga aproximadamente la misma composición (porcentajes de metano y de CO₂).

Con los parámetros indicados anteriormente se procedió a cargar el gasómetro (recipiente de plástico sumergido en agua) con GLP y biogás, para luego quemarlo en el mechero de Bunsen y medir la temperatura del agua contenido en el recipiente metálico, al inicio y al final del experimento. Finalizado el ensayo con el GLP, inmediatamente se cargaba el gasómetro con el biogás y se realizaba el mismo procedimiento antes indicado.

Según Santos-Benavides, W. R. (2015) antes de iniciar el ensayo se deben registrar los valores de: presión atmosférica, volúmenes de los gases, temperatura ambiente y del agua.

2.9. Modalidad de la investigación

Para la realización del presente proyecto de investigación, se utilizaron las siguientes modalidades:

Investigación de Campo

La investigación se desarrolló en la Granja Porcina García en la cual se hizo el levantamiento de la información de la biomasa residual del ganado porcino en las corraletas y en el área de acopio de la granja, con el fin de analizar las causas y efectos de las excretas porcinas; con los resultados obtenidos se planteó un recurso alternativo donde se pueda aprovechar estos residuos para generar nuevas fuentes de energías limpias.

Investigación Bibliográfica – Documental

El presente proyecto tiene recursos bibliográficos para respaldar su investigación en; textos, artículos científicos, tesis, manuales, páginas de internet y seminarios relacionados con el tema de estudio.

Experimental

Para la etapa experimental se adquieren los equipos necesarios para realizar pruebas a escala de laboratorio. Se relaciona el proceso de digestión anaeróbica, el potencial energético de esta biomasa residual del ganado porcino en estudio, que depende directamente de la temperatura del sustrato, tipo de sustrato (nutrientes disponibles), la carga volumétrica, el tiempo de retención hidráulica y el nivel de acidez (pH).

2.10. Nivel de investigación

Exploratorio.

Los estudios exploratorios permiten aumentar el grado de familiaridad con fenómenos relativamente desconocidos o estudios realizados en otros países, obtener información sobre la posibilidad de llevar a cabo un tratado más completo sobre un contexto en particular de la vida real (Sampieri, 1991). En el caso del presente trabajo se inicia con el aprovechamiento del potencial energético en un biodigestor, donde se analizan las variables físicas del biodigestor como: temperatura del sustrato y temperatura ambiente, la presión del digestor y el porcentaje de metano contenido en el biogás.

Descriptivo

En la presente investigación se recolecta información relacionada con el caudal, presión y rendimiento del biogás, en un biodigestor demostrando su causa y efecto.

2.11. Operacionalización de las variables

En la Operacionalización de las variables se toman en cuenta las dos variables que se emplearon en este estudio, las mismas que se desarrollan en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Operacionalización de la variable independiente y dependiente.

Potencial de biomasa residual del

VARIABLE INDEPENDIENTE: ganado porcino

Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos
Cantidad de biomasa residual	Excreta animal de ganado porcino	Potencial de excretas	kg	Cálculo	Ecuaciones
	Capacidad del biodigestor	Cantidad volumétrica carga/descarga	m ³	Cálculo	Ecuaciones
	Portador energético	Potencial de hidrógeno	pH	Medición	pH-metro Cintas
	Portador energético	Temperatura del sustrato	°C	Medición	Termómetro Sensor
	Portador energético	Volumen del biogás	m ³	Medición	Gasómetro
	Agua natural para la mezcla	Cantidad volumétrica de agua	m ³	Cálculo	Ecuaciones
VARIABLE DEPENDIENTE: Aprovechamiento energético biomasa					
Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos

Cantidad y calidad de energía que se puede obtener de un determinado volumen de biomasa	Biogás	Cantidad volumétrica	%	Cálculos	Ecuaciones
	Biogás	Presión del biogás	PSI	Medición	Manómetro Sensor
	Biogás	Volumen de biogás	m ³	Medición	Caudalímetro
	Bioabono	Cantidad volumétrica	%	Cálculos	Ecuaciones

Realizado por: Mauricio Villacrés Jirón

Técnicas e instrumentos a utilizar

La presente investigación utilizará los siguientes instrumentos:

- La observación
- Ecuaciones por medio de modelos matemáticos
- Software para la implementación del sistema Scada para el control y monitoreo (Labview).
- Sensores.

Observación

Permite obtener información del fenómeno o acontecimiento tal como se produce y descubrir los hechos en todos sus aspectos, para el caso de la presente investigación, fue utilizado a través de visitas in situ, para conocer sobre el proceso de producción de carne de cerdo, la alimentación, la cantidad de estiércol que se produce, entre otros elementos que son necesarios para la investigación.

Ecuaciones por medio de modelos matemáticos

La ecuación de estado de los gases constitutiva para sistemas hidrostáticos que describe el estado de agregación de la materia como una relación matemática entre la temperatura, la presión, el volumen, la densidad, la energía interna y posiblemente otras funciones de estado asociadas con la materia.

Por otro lado la cantidad de calor (Q) representada en la ecuación 2.5, donde hay que suministrar a la unidad de masa (m), de una sustancia o sistema termodinámico para elevar su temperatura en una unidad (ΔT).

SOFTWARE PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA SCADA PARA EL CONTROL Y MONITOREO (LABVIEW)

Labview es un software con un entorno de programación grafica (lenguaje G), esta plataforma utiliza íconos, terminales de comunicación e hilos como conectores lo que reemplaza el texto en software, facilitando la programación de manera simple como el programador piensa, este sistema es recomendado para realizar investigaciones, aplicaciones con hardware y software de prueba, permite realizar el control, monitoreo y diseño todo esto simulado o en tiempo real, de esta manera permite acelerar la productividad de las empresas.

Cada programa desarrollado en Labview se denomina Instrumentos Virtuales o Vis, los cuales permiten interactuar con los diferentes periféricos que se desea analizar.

Características

- Fácil manejo del software
- Corre sobre cualquier sistema operativo (Windows, Linux)
- Permite la comunicación con periféricos (PLC, RTU, Tarjetas electrónicas)
- Interfaces de comunicación
 - Puerto serie, paralelo, TCP/IP, UDP
 - Bluetooth
 - USB
 - OPC.
- Enlace entre Labview y Office
- Trabaja sobre los diferentes núcleos del computador
- Realiza paralelismo
- Capacidad de interactuar con otros lenguajes y aplicaciones:
 - DLL: librerías de funciones, NET, ActiveX
 - Matlab/Simulink

- AutoCAD, SolidWorks, etc.
- Herramientas gráficas y textuales para el procesado digital de señales.
- Visualización y manejo de gráficas con datos dinámicos.
- Adquisición y tratamiento de imágenes.
- Control de movimiento (combinado incluso con todo lo anterior).
- Tiempo Real estrictamente hablando.

Programa en LabVIEW

Al ser una herramienta de programación gráfica no se escribe el programa sino se dibuja, lo que permite entender con facilidad lo programado, se caracteriza por ser programas prediseñados facilitando la programación y reduciendo los tiempos de desarrollo, permitiendo que el diseñador dedique un poco más de tiempo al Interface Hombre Maquina (HMI).

Conclusiones

- Para el dimensionamiento del biodigestor es importante tomar en cuenta los parámetros: cantidad de materia prima, diseño de forma y la operación y funcionamiento del mismo.
- Con el objeto de saber las características del estiércol, es necesario conocer el valor del pH.
- En este capítulo fue muy importante la investigación de campo ya que mediante los datos obtenidos por los procedimientos realizados y la información proporcionada por los propietarios facilitó la realización de este proyecto.

CAPÍTULO III: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

3.1. Análisis de los recursos energéticos de la granja porcina

Son caracterizadas las fuentes de energía que se emplean en la granja, donde se evidencia que la energía eléctrica, el gas licuado de petróleo (GLP) y la leña forman parte de los recursos energéticos más utilizados en las actividades productivas de la Granja.

3.1.1. Consumo de energía eléctrica

La granja ha registrado un consumo de energía eléctrica durante el año 2015, un total de 7 868 kWh, representando 629.44 USD con un promedio de 52.45 USD por mes. Como se puede observar en la figura 3.1 en los meses de mayo, noviembre y diciembre se experimentó la mayor demanda eléctrica. Concluyendo así, que la energía eléctrica es un gasto significativo para la administración de la granja.

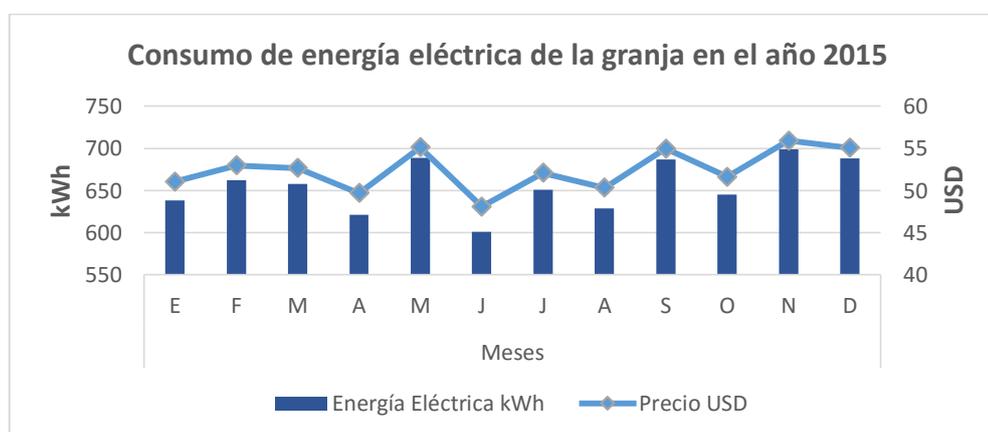


Figura 3.1. Consumo por mes de la energía eléctrica.

Elaborado por: Mauricio Villacrés Jirón

3.1.2. Análisis del consumo anual de gas licuado de petróleo

En la granja objeto de estudio se procedió a solicitar a la administración las facturas de pago del gas de uso industrial (no subsidiado) de 45 kg, cilindros que se compraron durante el año 2015. En la figura 3.2 se puede observar que en los

meses de enero, junio y diciembre existió mayor consumo de gas licuado de petróleo (3 cilindros de 45 kg) debido a que hubo mayor producción de carne, en el mes de enero hubo una producción de 907 kg, en el mes de junio hubo una producción de 921 kg de carne de cerdo y en el mes de diciembre hubo una producción de 958 kg de carne de cerdo.

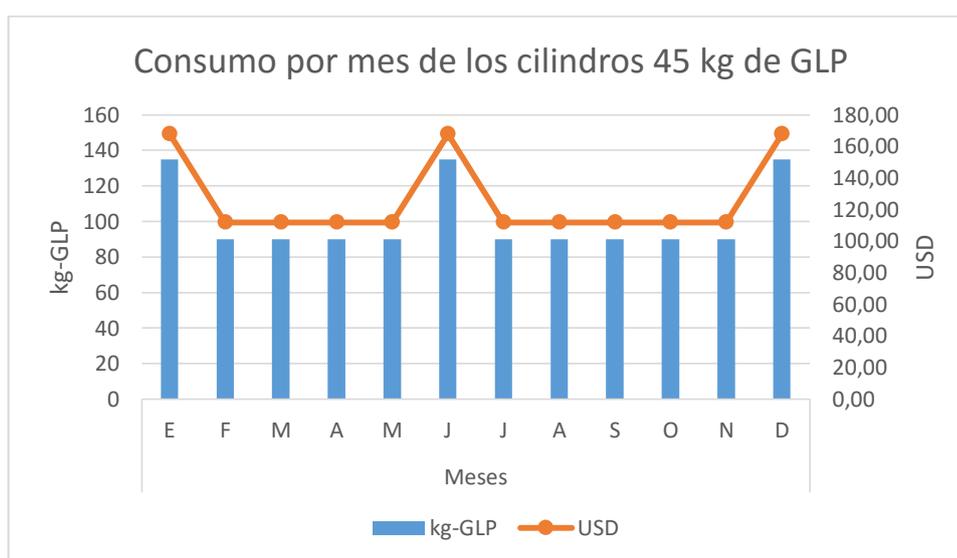


Figura 3.2. Consumo por mes de los cilindros 45 kg de GLP.

Elaborado por: Mauricio Villacrés Jirón

El consumo de GLP durante el año 2015 fue de 1215 kg de GLP, representando un total de 1510 USD, debido a que cada garrafa tiene un valor de 55,93 USD. Donde se puede apreciar que existió un gasto muy significativo para la economía de la granja, la misma que puede ser reemplazada por biogás al aprovechar las excretas del ganado porcino mediante el proceso de bioconversión.

3.2.3. Análisis del consumo anual de leña

Rodríguez asevera al citar a la Agencia Internacional de Energía (IEA) que la leña seguirá siendo uno de los principales combustibles de calefacción y cocción de alimentos para una tercera parte de la población de los países subdesarrollados, durante los próximos 20 años (Rodríguez, 2008).

En la granja es utilizada la leña por tradición milenaria, siendo un recurso energético casi inagotable, y de bajo poder adquisitivo. El mismo es utilizado en los fogones y chimeneas. En la figura 3.3 se observa el consumo de los kg de leña

por mes. Donde, los mayores consumos fueron los meses de enero, junio y diciembre, esto guarda relación con la producción de carne obtenida en esos meses.

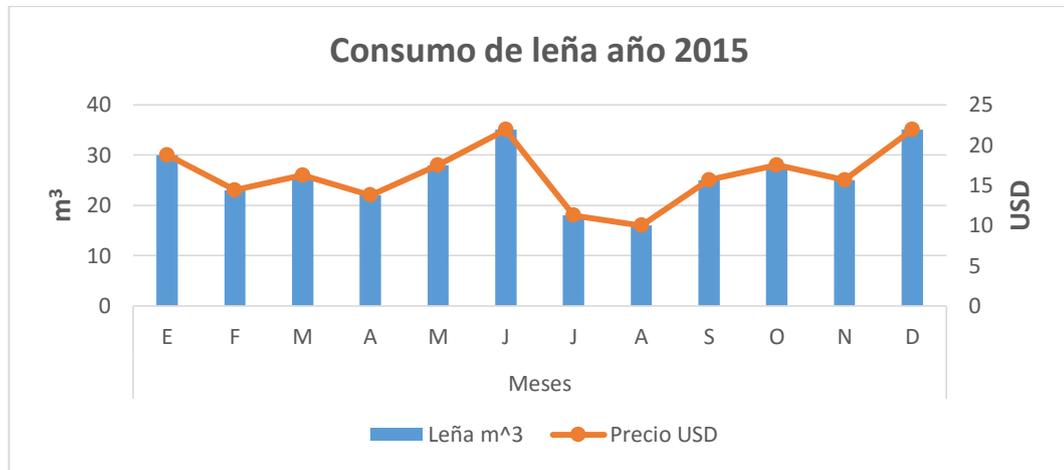


Figura 3.3. Cantidad de leña utilizada por cada mes.

Elaborado por: Mauricio Villacrés Jirón

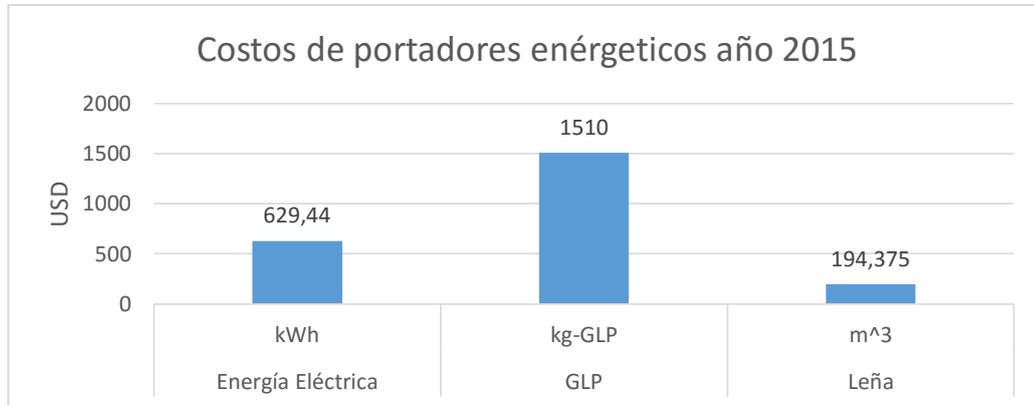
3.2.3. Consumo de portadores energéticos en la Granja Porcina García

Con el propósito de verificar y analizar el consumo de portadores energéticos consumidos por la Granja Porcina García en el año 2015, para las diferentes actividades cotidianas y de producción, en primer lugar lo tiene la energía eléctrica con 7 868 kWh los mismos que fueron consumidos por los artefactos electrodomésticos y otros equipos usados casualmente, según el dueño de la granja; en segunda instancia se tiene el consumo de GLP con 1 215 kg utilizados por el sistema de calentamiento de agua sanitaria y de la elaboración de alimentos tanto para consumo humano como animal; en tercer lugar se encuentra la leña con 311 kg de biomasa vegetal incinerados por el fogón. La información recopilada servirá de referencia para proyectar las nuevas inversiones dentro de la granja.

3.2.4. Análisis económico de los portadores energéticos

Una vez analizado el costo económico que generan los portadores energéticos a la administración de la Granja, se puede concluir que el mayor valor de inversión recae en el consumo de gas licuado de petróleo, con un rubro de 1 510,00 USD.

En la Figura 3.4 se representa en forma de barras los costos de estos portadores energéticos.



Elaborado por: Mauricio Villacrés Jirón

Figura 3.4. Costos de portadores energéticos utilizados por la Granja Galpón.

3.3. Cantidad de biomasa residual del ganado porcino de la granja

La biomasa residual del ganado porcino recopilada de los corrales, se tabuló en el Anexo 5, donde se puede verificar que los 100 animales presentes en los corrales, consiguen generar una biomasa de 819 kg de estiércol por día y que puede ser aprovechado en un biodigestor para la producción de biogás. En la figura 3.5 se observa que el mayor porcentaje de biomasa residual es de las hembras en gestación con un 68,7 % y la mínima de los machos con 4,4 %, estos valores fueron calculados, teniendo en cuenta a los datos del anexo 5 donde aparecen las diferentes fuentes de biogás aportadas por las diferentes excretas de animales.

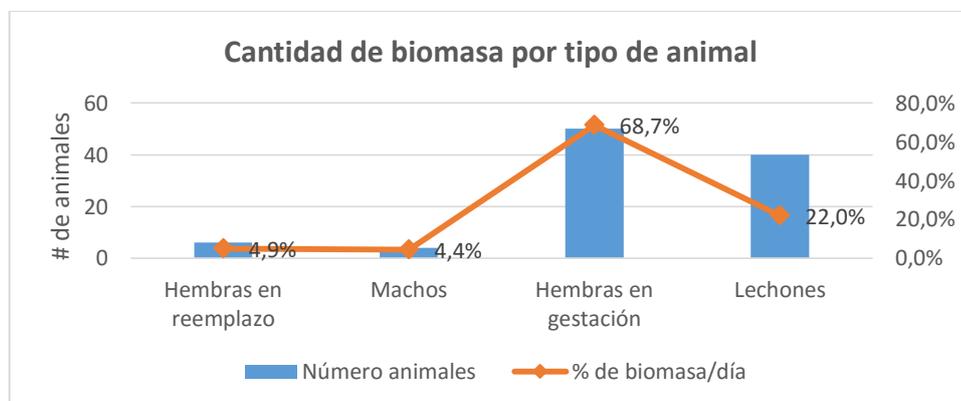


Figura 3.5. Porcentajes representativos de la biomasa por tipo de animal.

Elaborado por: Mauricio Villacrés Jirón

3.4. Determinación de la potencialidad en la biomasa del ganado porcino

El ensayo realizado con el estiércol del ganado porcino perteneciente a la granja, se inició el 03 de octubre del 2015, donde se realiza la carga de la biomasa residual al biodigestor tipo Batch (cierre hermético), el mismo que finaliza el 25 de noviembre del mismo año, contabilizando un total de 56 días del tiempo de retención hidráulica de la biomasa.

El volumen de mezcla de las excretas del ganado porcino que se utilizó en el reactor se describe en el capítulo 2 literal 2.8. El tanque reactor se debe mover manualmente para producir una mezcla interna de la biomasa y así evitar la formación de una costra espumosa.

La presión interna del reactor inició a medirse a los 18 días de haber cerrado el biodigestor. Para determinar la potencialidad de la biomasa del ganado porcino se debe tomar en cuenta la relación entre la cantidad de residuos colocados dentro del biodigestor y la masa de biogás producido, este dato es particularmente difícil de hallar en la bibliografía, y lo poco encontrado es muy genérico y varía entre márgenes muy extensos. Esto se debe a que el biogás producido depende de varios factores que intervienen en la biodegradación de la materia orgánica; como es: la temperatura media, el pH, el tiempo total de duración del ensayo, y otros propios de la medición o intrínsecos, que tienen relación con la medición de la masa del gas metano producido, entre los que se mencionan: la medición del volumen de los gases y el análisis de la constante particular del biogás (R_p), utilizada en la ecuación de estado de los gases perfectos (Martina, 2005; Stuckey, 1983).

3.4.1. Cuantificación de la biomasa utilizada para el biodigestor

Para iniciar la experimentación en el biodigestor, se necesitaron mezclar un total de 10 kg de excretas del ganado porcino y 13 litros de agua, obteniendo una composición de 23 litros de biomasa. La relación utilizada para el biodigestor de mezcla estiércol-agua es de 1:1,3 tal como sugiere (Hilbert, 2008). El espacio del reactor queda distribuido en 58 % ocupado por la biomasa y el 43 % restante es un

espacio libre para la interacción del proceso anaeróbico encargado de producir el biogás.

3.4.2. Análisis de los parámetros que intervienen en el proceso anaeróbico

Los parámetros que intervienen en la bioconversión de la materia orgánica al interior del biodigestor, deben ser controlados adecuadamente para obtener una buena producción de biogás; dichas variables son: la temperatura de los biodigestores, el potencial de hidrogeno (pH) de la biomasa y la presión interna en el gasómetro (la misma que determina el volumen de biogás).

3.4.2.1. Análisis de la temperatura en los biodigestores

Los valores de temperatura que se registraron para los dos biodigestores con el software SAW BIOGAS, se detallan a continuación:

Para el biodigestor tipo “Batch”, es fundamental medir la temperatura de la mezcla estiércol-agua, antes de llenar el reactor. Dicha temperatura inició con 22 °C medidos directamente en la mezcla. Se continuó con el registro de los valores de temperatura en una base de datos, durante todo el tiempo que perduró el experimento. En la figura 3.6 se tiene la curva del biodigestor (resumen de datos), donde se puede verificar claramente que en el período representado la temperatura del sustrato se encuentra en el rango mesofílico (entre 20 °C y 40 °C), punto para tener la mayor producción de biogás, evidentemente el clima de La Maná es propicia para ello.

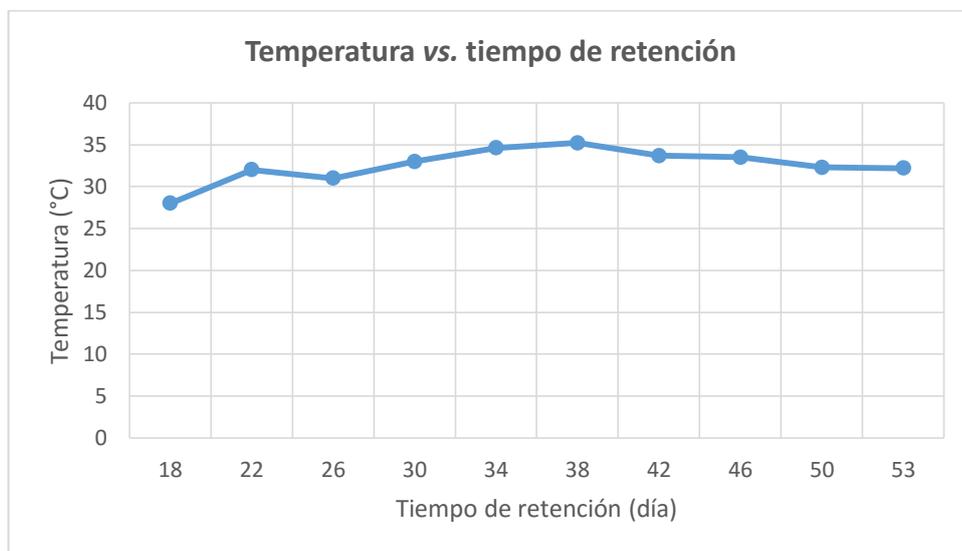


Figura 3.6. Temperatura del biodigestor vs. Tiempo de retención.

Elaborado por: Mauricio Villacrés Jirón

3.4.2.2. Control de pH en el biodigestor

Los valores de pH fueron medidos con la sonda del instrumento HANNA HI 9813-6. A continuación se detalla el análisis para el experimento.

En el experimento realizado con el reactor durante los 36 días, periodo en que se midió el pH de la mezcla estiércol-agua. El mismo inició con un valor de pH ácido ($\text{pH} < 7$) y paulatinamente se realizaron medidas del pH durante los días de retención hidráulica de la materia orgánica del ganado porcino, resultando así los siguientes valores promedios: en los días 18 al 26 el pH fluctúa entre 6,5 a 6,7; a partir del día 27 inicia a ascender el pH hasta 6,8; entre los días 29 al 50 se tuvo un pH de que fluctuaba entre 7 y 7,3 y finalmente en los días 43 al 53 el pH fue de 7,0. Determinando así que en los días 31 al 42 el pH fue ligeramente alcalino ($\text{pH} > 7$) favoreciendo la producción de metano. En la figura 3.7 se observa que en el día 29 alcanza el valor neutro ($\text{pH} = 7$) y permanece ligeramente superior hasta finalizar el ensayo.

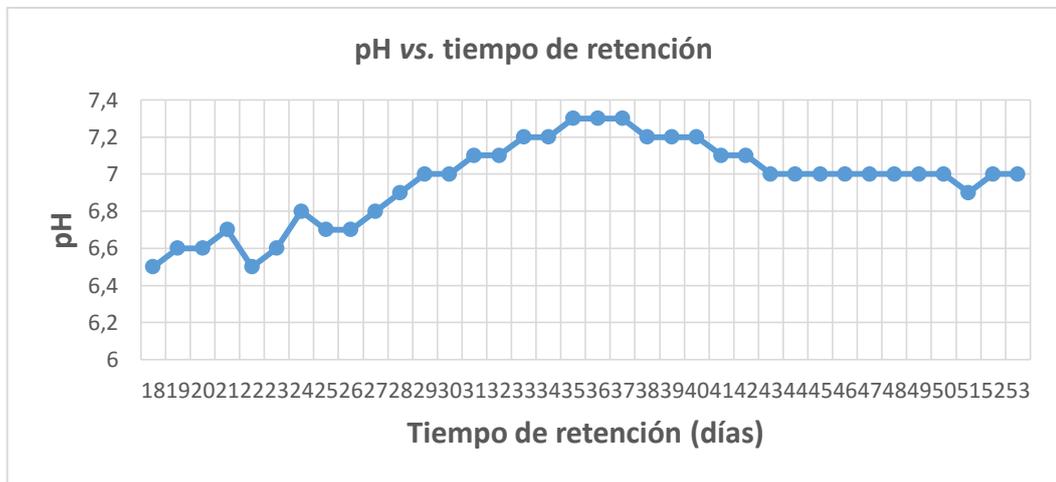


Figura 3.7. El pH del biodigestor vs. Tiempo de retención.

Elaborado por: Mauricio Villacrés Jirón

3.4.2.3. Producción de biogás

Los valores máximos de volumen de biogás que reportó el biodigestor es: 3523.2 ml, 3625.6 ml, 3635.8 ml, 3581.4 ml y 3640.4 ml; que corresponden respectivamente a los días 34 al 38 del tiempo de retención hidráulico del proceso anaeróbico de la biomasa residual del ganado porcino. En la figura 3.8 se aprecia una curva pronunciada ascendente desde el día 29 hasta el día 34 donde se tiene la mayor producción de biogás, manteniendo este pico máximo hasta el día 43 con más de 3 000,00 mililitros, y a partir de esa fecha desciende su producción a valores inferiores, hasta culminar el experimento. La producción total de biogás fue de 75,3467 litros.

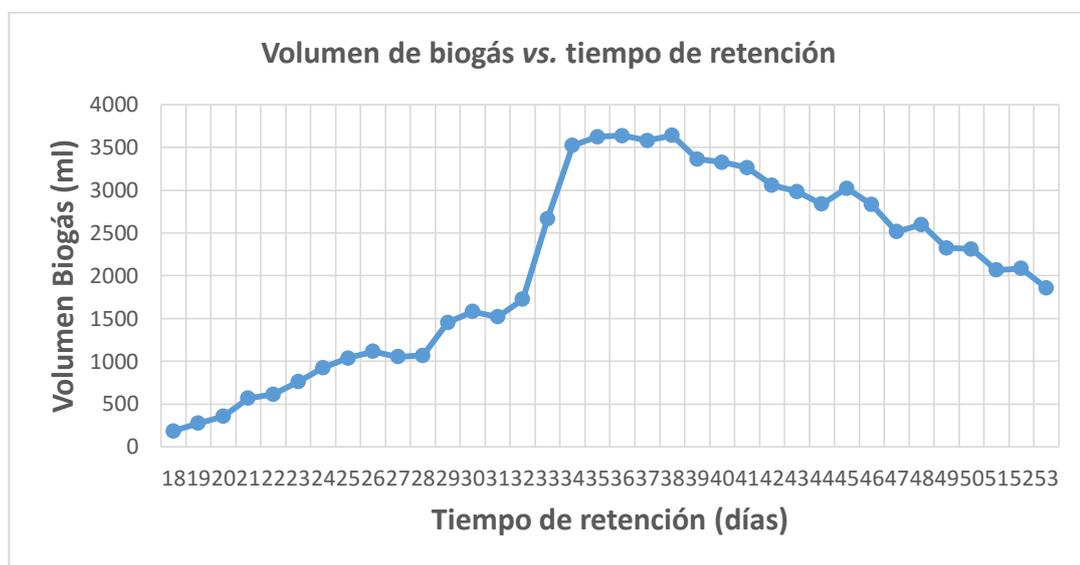


Figura 3.8. Volumen de biogás por el tiempo de retención biodigestor.

Elaborado por: Mauricio Villacrés Jirón

3.4.3. Determinación de la cantidad de partículas de metano en el biogás

Para determinar las partículas del gas metano producidos por el biodigestor se tomaron muestras directamente del tanque reactor con una jeringuilla de 60 mililitros, el mismo se aplicaba directamente al sensor SAW-MQ2 y de esta manera se podía obtener la cantidad de partículas de metano presentes en el biogás.

En el biodigestor tipo “Batch” se determinaron las partículas del metano que contiene el biogás cada dos días, a partir del día 21 de octubre del tiempo de

retención anaeróbico. El valor medido con el sensor de gas metano (SAW-MQ2), proporcionó un valor promedio de 12 240,2 ppm de metano contenido en el biogás generado por este reactor (ver Anexo 2), dando un porcentaje de 61,2 % de CH₄. Concluyendo así, que el ensayo realizado con el biodigestor tiene un porcentaje de metano ligeramente superior al recomendado por Hilbert (2008). En la figura 3.9 se observa que a partir del día 27 la curva del porcentaje de metano permaneció casi constante y ligeramente superior al 60 %.

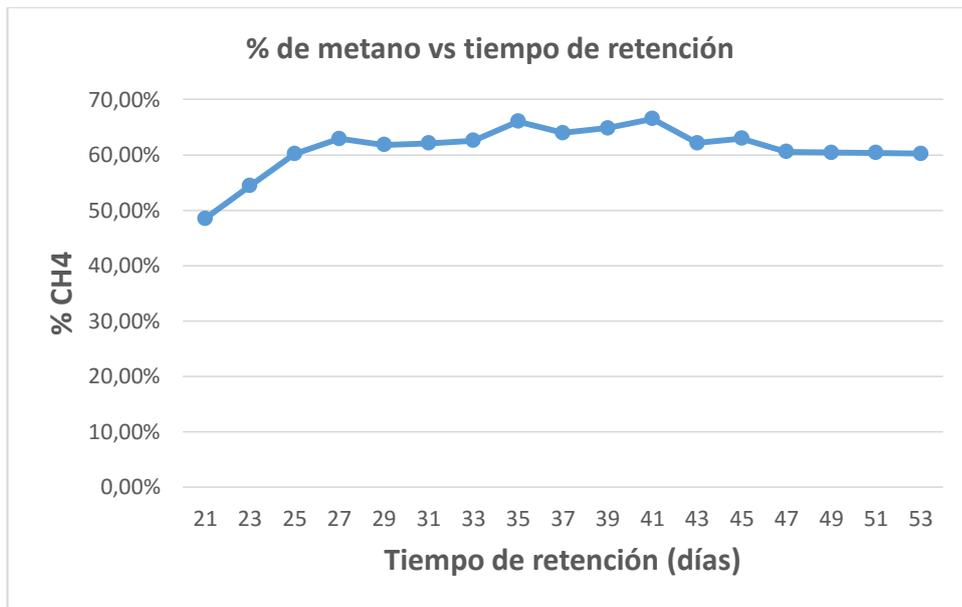


Figura 3.9. Porcentaje de metano por el tiempo de retención del biodigestor.

3.4.4. Cálculo de la masa molecular del biogás

La masa molecular del biogás se calculó de acuerdo a los datos obtenidos del biodigestor, donde se obtuvo un porcentaje promedio de partículas metano de 61,2 % y el porcentaje restante 38,8 % corresponde al dióxido de carbono y otros elementos. Teniendo así los niveles de concentración de ambos gases en un: 61,2 % para el CH₄ y el 38,8 % tiene el CO₂, y sus masas moleculares de los dos gases son: 16 kg/kmol y 44 kg/kmol, respectivamente (Armendáris, 1989; Santos-Benavides, 2015). La masa molecular calculada del biogás será entonces:

$$\text{Masa molecular del biogás} = (0,612 \cdot 16) + (0,388 \cdot 44) = 26,864 \text{ kg/kmol}$$

La constante particular de biogás será entonces (Martina, 2005; Santos-Benavides, 2015):

$$R_{p_{biogás}} = 848/26,864 = 31,566 \text{ kgf}\cdot\text{m}/\text{kg} \text{ } ^\circ\text{K}.$$

La producción de biogás recién comenzó a los 18 días del periodo de retención hidráulica de la biomasa residual del ganado porcino, esta masa fue calculada en función de la ecuación 1.2 (estado de los gases perfectos) y se detalla los valores en el Anexo 2, columna 9. Se demuestra el cálculo de la masa del biogás generada en el día 18, pero en el anexo antes mencionado, se encuentran todos los valores de cada día.

$$p \cdot V = M \cdot R \cdot p \cdot T \quad \text{Ecu (2.1)}$$

$$M = \frac{p \cdot V}{R \cdot p \cdot T}$$

$$M = \frac{1,04526 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \cdot 185,3 \text{cm}^3}{31,566 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} \cdot 295,1^\circ \text{K} \cdot 100 \frac{\text{cm}}{\text{m}}}$$

$$M = 0,0002 \text{ kg (biogás obtenido)} \quad \text{Resp (2.1)}$$

La masa del biogás obtenida al final del ensayo, día 53 suma un total de:

$$M = 0,0861 \text{ kg (masa de biogás obtenida)} \quad \text{Resp (2.2)}$$

3.4.4.1. Rendimiento del estiércol del ganado porcino

La relación de biogás obtenido por digestión anaeróbica y la cantidad de masa residual del ganado porcino, introducido en el reactor, permitió obtener el siguiente resultado:

$$rend = \frac{0,0861 \text{kg(gas)}}{10 \text{kg(estiercol)}} * 100\% = 0,861\%$$

Resp(2.3)

$$rend = 0,861 \%$$

Con el rendimiento calculado y la disponibilidad diaria de 819 kg/excretas de ganado porcino, se obtendrían 7,05 kg de biogás, lo que representaría un 47 % de un cilindro de 15 kg de gas de uso doméstico.

3.4.5. Determinación del poder calórico del biogás mediante el análisis comparativo con el gas de uso doméstico

Para determinar el poder calórico del gas incógnita, se debe calcular en primera instancia la masa del GLP y del biogás, luego establecer el calor desprendido por los gases combustionados durante las pruebas (Santos-Benavides, 2015).

3.4.5.1. Comparación de las masas del butano y el biogás

A partir de la ecuación de estado de los gases se realiza una comparación de las masas del butano y el biogás, los mismos que se detallan a continuación:

Se calcula la masa del butano (M_{bt}) contenida en los 5 litros aforados en el gasómetro.

Datos:

Masa molecular del butano = 58,12 kg/kmol

$V = 5 \text{ l} = 5\,000 \text{ cm}^3$

$T = 294,96 \text{ }^\circ\text{K}$

$P = \text{presión atmosférica} + \text{presión manométrica} = 0,7705 \text{ kg/cm}^2$

$R_{\text{particular}} \text{ del butano} = 14,59 \text{ kgm/kg }^\circ\text{K}$

Para estos valores se calculó en función de la ecuación 2.1:

$$p \cdot V = M \cdot R_p \cdot T$$

$$M = \frac{p \cdot V}{R_p \cdot T}$$

$$M_{bt} = \frac{0,7705 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \cdot 5000 \text{ cm}^3}{14,5905 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} \cdot 294,96 \text{ }^\circ\text{K} \cdot 100 \frac{\text{cm}}{1\text{m}}}$$

Obteniendo una masa $M_{bt} = 0,017904 \text{ kg}$ de butano. Resp (2.4)

Luego, se calcula la masa del biogás M_b contenida en los 5 litros aforados en el gasómetro:

Datos:

$$V = 5 \text{ l} = 5\,000 \text{ cm}^3$$

$$T = 294,96 \text{ }^\circ\text{K}.$$

$$P = \text{presión atm.} + \text{Presión manométrica} = 0,7705 \text{ kg/cm}^2$$

$$R_{\text{particular}} \text{ del biogás} = 31,566 \text{ kgm/kg }^\circ\text{K} \text{ (obtenido en el literal 3.4.5)}$$

Se procede a calcular la masa del biogás de forma análoga al caso anterior, teniendo así:

$$M_b = \frac{0,7705 \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2} \cdot 5000 \text{ cm}^3}{31,566 \frac{\text{Kgf} \cdot \text{m}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{K}} \cdot 294,96 \text{ }^\circ\text{K} \cdot 100 \frac{\text{cm}}{1\text{m}}}$$

Obteniendo una masa $M_b = 0,0041377 \text{ kg}$ de biogás. Resp (2.5)

3.4.5.2. Determinación del calor desprendido por el gas licuado de petróleo

A partir de la aplicación del procedimiento experimental alternativo donde se quema un gas con características conocidas como es el GLP se puede encontrar el poder calórico del gas incógnita. En la figura 3.10 se pueden observar los resultados obtenidos durante la combustión de 5 litros de gas licuado de petróleo, quemados en el mechero de Bunsen para calentar un litro de agua contenido en el recipiente del ensayo. Como se aprecia cuando combustiona el GLP, la curva es ascendente y lineal desde el punto 2 hasta el punto 6, lo que permitió obtener una diferencia de temperatura de $40,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (ver Anexo 6).

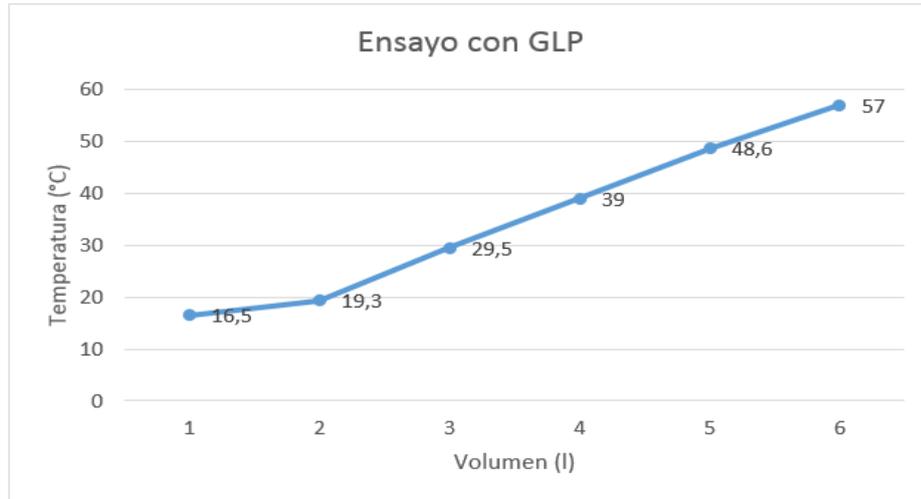


Figura 3.10. Temperatura del agua vs. volumen de GLP quemado.

Atendiendo los resultados obtenidos se determina el valor del calor entregado por el GLP al quemarse (Q_{bt}), que será igual al producto de su poder calórico (P_c) multiplicado por su masa (M_{bt}). Se tomará una densidad del butano (dbt) de $2,67 \text{ kg/m}^3$ (Martina, 2005; Santos-Benavides, 2015).

$$Q_{bt} = \frac{P_c \cdot M_{bt}}{dbt} \quad (2.2)$$

$$Q_{bt} = \frac{22000 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \cdot 0,017904 \text{ kg}}{2,67 \text{ kg/m}^3} = 147,523 \text{ kcal}$$

$$Q_{bt} = 147,523 \text{ kcal} \quad \text{Resp (2.6)}$$

Tomando en consideración la teoría de transmisión de calor, el agua contenida en el recipiente recibe cierta cantidad de energía. El calor que recibe el agua (Q_{abt}) se obtiene de acuerdo a la ecuación fundamental de calorimetría (ecuación 1.5), donde el calor específico del agua, obviamente, es $1 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$ y la masa de 1 litro de agua es 1 kg (Martina, 2005; Santos-Benavides, 2015):

$$Q_{abt} = m \cdot c_e \cdot \Delta T$$

$$Q_{abt} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 40,5 ^\circ\text{C} = 40,5 \text{ kcal}$$

$$Q_{abt} = 40,5 \text{ kcal} \quad \text{Resp (2.7)}$$

Evidentemente la energía entregada por el GLP al quemarse, solo una parte es suministrada por el agua, el resto se pierde en el recipiente y hacia el medio ambiente. A partir de los resultados obtenidos en el cálculo se puede determinar el rendimiento de la combustión:

$$\text{Rend.} = \frac{Q_{abt}}{Q_{bt}}$$

$$\text{Rend.} = \frac{40,5 \text{ kcal}}{147,523 \text{ kcal}}$$

$$\text{Rend.} = 0,274 \cdot 100 \%$$

$$\text{Rend.} = 27,4 \% \quad \text{Resp (2.8)}$$

3.4.5.3. Determinación del calor desprendido por el biogás

Con los datos de las pruebas realizadas con el GLP, se procede a comparar y determinar el poder calórico del biogás obtenido en el proyecto. En la figura 3.11 se indican los resultados obtenidos durante la combustión de 5 litros de biogás, quemados en el mechero de Bunsen para calentar un litro de agua contenido en el recipiente, donde se puede apreciar que desde el punto 2 hasta el punto 6 la curva asciende lentamente y no es lineal como se observó en el ensayo realizado con el GLP. Permitiendo así obtener una variación de temperatura de aproximadamente 9,8 °C. En el Anexo 6 se encuentra la tabla 2 con los datos que se registraron durante el ensayo.

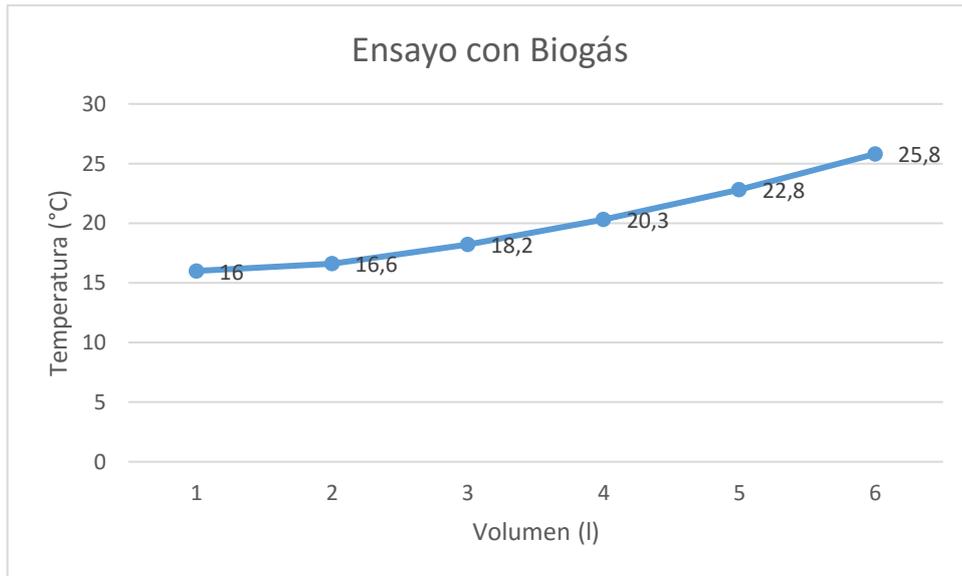


Figura 3.11. Temperatura del agua vs. Volumen de biogás quemado.

El calor recibido por el agua Q_{ab} se calculará de acuerdo a la ecuación 1.5:

$$Q_{ab} = m \cdot c_e \cdot \Delta T$$

$$Q_{ab} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 9,8 ^\circ\text{C}$$

$$Q_{ab} = 9,8 \text{ kcal} \quad \text{Resp (2.9)}$$

El calor entregado por el biogás al quemarse Q_b , se calculará en función del rendimiento de la combustión del GLP y de Q_{ab} , obteniendo el siguiente resultado de acuerdo a la ecuación 2.1.

$$Q_b = \frac{Q_{ab}}{\text{Rend.}}$$

$$Q_b = \frac{9,8 \text{ kcal}}{0,274}$$

$$Q_b = 35,766 \text{ kcal} \quad \text{Resp (2.10)}$$

La energía entregada por el biogás al quemarse Q_b , será igual al producto de su poder calórico (P_c) multiplicado por su masa M_b y se tomará una densidad del

biogás (db) de 1,08 kg/m³ (Martina, 2005; Santos-Benavides, 2015). Se despejará el poder calórico del biogás (Pc) de la ecuación 2.2.

$$Qb = \frac{Pc \cdot Mbt}{dbt}$$

$$Pc = \frac{Qb \cdot db}{Mb}$$

$$Pc = \frac{35,766 \text{ kcal} \cdot 1,08 \text{ kg/m}^3}{0,0041377 \text{ kg}}$$

$$Pc = 9\,335 \text{ kcal/m}^3 \quad \text{Resp (2.11)}$$

Pero como el biogás es la composición de dos gases (CH₄ y CO₂) en un 98 – 99 % de acuerdo a Hilbert (2008). En el literal 3.4.3 se determinó el porcentaje de la cantidad de partículas de metano que contiene el biogás producido por el biodigestor, obteniéndose un valor de 61,2 % de CH₄. Con éste porcentaje se puede determinar el poder calórico real del biogás, siendo este valor de 5 713 kcal/m³. El poder calórico del biogás calculado por este método experimental alternativo entrega un valor aceptable. Esto demuestra que el método propuesto es válido. De acuerdo a la bibliografía de Hilbert (2008) el poder calórico del biogás es de 5 140 kcal/m³. Santos-Benavides (2015) en su investigación aplicando los mismos métodos obtuvo un valor de poder calórico de 5 861 kcal/m³. Demostrando así, que el valor obtenido responde a niveles similares de estos autores anteriormente mencionado.

3.5. Cantidad de gas de uso doméstico representada en metros cúbicos de biogás

El consumo de GLP en la granja es de 1 215 kg durante todo el año, de acuerdo a la tabla de equivalencias de biogás con otras fuentes de energía (IDAE, 2007) para sustituir dicha energía se necesita 2700 m³ biogás/año; teniendo un valor promedio mensual de 211,5 kg biogás/mes.

$$\frac{1215\text{kg} \cdot \text{GLP}}{\text{año}} \cdot \frac{1\text{m}^3 \text{biogás}}{0,45\text{kg} \cdot \text{GLP}} = 2700\text{m}^3 \text{biogás/año} \quad \text{Resp (2.12)}$$

3.6. El uso de la leña representada en metros cúbicos de biogás

Para suplir 311 kg de leña, se requieren 90 m³ biogás/año; teniendo un valor promedio mensual de 7,5 m³ biogás/mes.

$$\frac{311 \text{ kg} \cdot \text{Leña}}{\text{año}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3 \text{ biogás}}{2 \text{ kg} \cdot \text{Leña}} = 155,5 \text{ m}^3 \text{ biogás/año} \text{ Resp (2.13)}$$

Teniendo en consideración que los costos del GLP para la granja son elevados y el destino de este al igual que la leña, son destinos similares, se analizan ambos solamente, dejando la electricidad aparte. El total de m³ de biogás tomando en consideración el GLP y la leña serían 2855.5 m³ de biogás / año. Los 237,95 m³ de biogás, es la cantidad promedio por mes para abastecer el 30 % que significan ellos dentro del 100 % de la demanda total energética de la granja. Por la disponibilidad de la materia prima y razones económicas, el reactor será diseñado para producir 8 m³ de biogás/día (240 m³ de biogás/mes), lo que supliría perfectamente el consumo de GLP y leña.

3.7. Determinación de los parámetros del biodigestor

Los parámetros de diseño para el biodigestor de domo fijo, se calcularán detalladamente de acuerdo a lo sugerido por (Lara, 2011).

3.7.1. Volumen de la cámara del biodigestor

Mediante la experimentación que se realizó en el biodigestor tipo Batch, se tomará como base para determinar el tiempo de retención, el mismo que fue de 36 días, el mencionado tiempo será considerado para los cálculos de los parámetros de diseño del biodigestor.

Para los cálculos pertinentes se toma las consideraciones de acuerdo a Santos-Benavides (2015), donde a) corresponde a 1 kg de estiércol fresco (EF) a sólidos totales (ST) y b) el valor corresponde a la temperatura promedio a la cual se encuentra la granja, que oscila entre los 25 °C.

- a) 1 kg de Estiércol Fresco (EF) = 0,20 kg de Sólidos Totales (ST)
- b) 1 kg de Sólidos Totales (ST) = 0,2 m³ de biogás a 25 °C y Pr. Atm.

Cálculo de Cantidad de Estiércol (CE) necesario para la producción de 8 m³ de biogás, que aportará al consumo energético de la Granja.

$$CE = 8 \frac{m^3 \text{ Biogás}}{\text{día}} \cdot \frac{1kgEF}{0,20kgST} \cdot \frac{1kgST}{0,2m^3 \text{ Biogás}} \quad (2.3)$$

$$CE = 200 \text{ kg EF/día Resp (2.14)}$$

Para producir los 8 m³ diarios de biogás se requiere determinar la cantidad de excretas residuales del ganado porcino, que se necesitan a diario, de esta forma se determinará el volumen total de la mezcla en una relación estiércol y agua de 1:1,3 (Hilbert, 2008), y asumiendo que 1 kg de EF = 1 l EF se tiene:

$$\text{Carga Diaria (CD)} = CE + \text{Agua} = 200 \frac{1kgEF}{\text{día}} \cdot \frac{1l}{1kg} + 260 \frac{l H_2O}{\text{día}}$$

$$CD = 460 \frac{l - Mezcla}{\text{día}}$$

$$CD = 0.46 \frac{m^3 - Mezcla}{\text{día}}$$

Volumen de la cámara del biodigestor:

El cálculo de la mezcla se realizó en base a las excretas del ganado porcino recogidas sin vinculación de líquidos (orina o agua). Para casos donde se utiliza manguera y agua para la limpieza del establo, se debe tener cuidado en la mezcla para que no exceda la relación recomendada 1:1,3

$$V_b = CD \cdot TR \quad (2.4)$$

$$V_b = 0.46 m^3 \text{ de Mezcla/día} \cdot 36 \text{ días}$$

$$V_b = 16,56 m^3 \text{ Resp (2.15)}$$

3.7.2. Diámetro del biodigestor

Se procede a determinar la profundidad del pozo empleando la ecuación 3.6, considerando que se trata de un cilindro vertical de diámetro (\emptyset) igual a la profundidad (H), según propone Lara (2011) y Santos-Benavides (2015).

$$\emptyset = H$$

Dónde:

V_b = Volumen del biodigestor

$$V_b = \frac{\pi \cdot \emptyset^2}{4} \cdot H \quad (2.5)$$

Reemplazando H por \emptyset se tiene:

$$\emptyset = \sqrt[3]{\frac{V \cdot 4}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{16.56 \text{ m}^3 \cdot 4}{3.1415}} = 2.76 \text{ m Resp (2.16)}$$

3.7.3. Altura del biodigestor

La altura del biodigestor (H) para 16,56 m³ de volumen se determinará en función del diámetro calculado que es de 2,76 m.

Teniendo así: $H = 2,76 \text{ m}$

Por diseño se deja un borde libre de 20 cm de acuerdo a lo sugerido por Lara (2011) y Santos-Benavides (2015), donde la altura total será:

H_b = altura del Biodigestor + borde por diseño

$$H_b = H + 0,20\text{m}$$

$$H_b = 2,76 + 0,20\text{m}$$

$$H_b = 2,96 \text{ m Resp (2.17)}$$

3.7.4. Cálculos de la curvatura de la cúpula

El cálculo de la curvatura de la cúpula se determina en función del diámetro del biodigestor.

Cúpula superior:

El cálculo de la cúpula superior (f_1) está en función del diámetro del biodigestor, según la ecuación 3.9:

$$f_1 = \frac{1}{5} \cdot \emptyset$$

(2.6)

$$f_1 = \frac{1}{5} \cdot 2.76 \text{ m} = 0,55 \text{ m} \text{ Resp (2.18)}$$

Radio del biodigestor:

El radio del biodigestor (r) determina el ancho que tendrá el tanque desde su centro hacia la periferia y se calcula de acuerdo a la ecuación 3.8.

V_b = volumen del biodigestor

H_b = altura del biodigestor

$$r = \sqrt{\frac{V_b}{\pi \cdot H_b}} = \sqrt{\frac{16.56 \text{ m}^3}{3,1415 \cdot 2.76 \text{ m}}} = 1.38 \text{ m} \text{ Resp (2.19)} \quad (2.7)$$

Radio de la curvatura de la esfera superior:

Con el radio de la curvatura de la esfera superior (R_1) se determinará el valor del casquete que cubrirá el tanque reactor, en función de r y f_1 , y con la ecuación 3.9.

$$R_1 = \frac{(r)^2 + (f_1)^2}{2f_1} \quad (2.9)$$

$$R_1 = \frac{(1,38 \text{ m})^2 + (0,55 \text{ m})^2}{2(0,55 \text{ m})} = 2,0 \text{ m} \text{ Resp (2.20)}$$

3.7.5. Volumen de la cúpula

Cálculo del volumen (V_1) de la cúpula con los valores de R_1 y f_1 empleando la ecuación 2.10.

$$V_1 = 3.1415 * (0.55 \text{ m})^2 * \left(2.7 \text{ m} - \frac{0.55 \text{ m}}{3}\right) = 2.4 \text{ m}^3 \text{ Resp (2.21)}$$

3.7.6. Volumen del cilindro

Cálculo del volumen del cilindro (V_2) en función de H_b y r , valores que permitirán calcular la capacidad del cilindro, para su construcción:

$$V_2 = \pi \cdot r^2 \cdot H_b = 3,1415 \cdot (1,38m)^2 \cdot 2,76m = 16,5 m^3 \text{ Resp (2.22)}$$

3.7.7. Volumen final del biodigestor

Cálculo del volumen final (V_{fb}) del biodigestor determinará el volumen que ocupará la estructura total en el área asignada para dicho proyecto, el mismo se calculara con V_1 y V_2 .

$$V_{fb} = V_1 + V_2 = 2,4m^3 + 16,5m^3 = 18,9m^3 \text{ Resp (2.23)}$$

3.7.8. Cálculo de la superficie estructural

La superficie estructural (S_1) se determinó en base a los parámetros R_1 , y f_1 y con la ecuación 2.12:

$$S_1 = 2\pi \cdot R_1 \cdot f_1 \quad (2.12)$$

$$S_1 = 2 \cdot 3,1415 \cdot 2,0 m \cdot 0,55 m$$

$$S_1 = 6,9 m^2 \text{ Resp (2.24)}$$

Para la superficie estructural (S_2) se calculó en base a los parámetros r y H_b , utilizando la ecuación 3.12.

$$S_2 = 2\pi \cdot r \cdot H_b \quad (2.12)$$

$$S_2 = 2 \cdot 3,1415 \cdot 1,38 m \cdot 2,76 m$$

$$S_2 = 23,93 m^2 \text{ Resp (2.25)}$$

En el cálculo de la superficie total (S) se sumó las superficies parciales calculadas anteriormente (S_1 y S_2).

$$S = S_1 + S_2$$

$$S = (6,9 + 23,93) m^2$$

$$S = 30,83 \text{ m}^2 \text{ Resp (2.26)}$$

3.7.9. Cálculo del volumen del tanque de mezcla

El volumen del tanque de mezcla (V_m) se calculará a partir de 0,46 m³/mezcla diaria de excretas del ganado porcino, disponibles en la Granja. El tanque de mezcla debe tener un volumen poco mayor al volumen del líquido diario que ingresa al digestor, se asume que este será de 1,00 m³ y de diámetro tendrá 1,4 m.

$$V_m = \frac{\pi \cdot d_m^2}{4} \cdot h_m$$

h_m = altura del tanque de mezcla

$$V_m = 1,0 \text{ m}^3$$

Resp (2.27)

$$h_m = 0,65 \text{ m}$$

3.7.10. Cálculo de la capacidad del tanque de descarga

Para el cálculo de la capacidad de almacenamiento del tanque de descarga (V_d) sugeridos por Lara (2011) y Santos-Benavides (2015), se tienen los siguientes valores: altura del tanque de descarga (h_d) = 1 m; con un diámetro (d_d) de 1,4 m. Donde se aplica la siguiente ecuación 2.13.

$$V_d = \frac{\pi \cdot d_m^2}{4} \cdot h_d \quad (2.13)$$

$$V_d = 1,54 \text{ m}^3 \quad \text{Resp (2.28)}$$

En la tabla 3.1 se tiene un resumen de los parámetros calculados del biodigestor propuesto en este proyecto.

Tabla 3.1. Parámetros físicos del biodigestor de domo fijo.

Nº	PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
1	Volumen del efluente	V_b	16,56	m ³
2	Diámetro	\emptyset	2,76	m
3	Altura del biodigestor	H_b	2,96	m
4	Curvatura de la cúpula	f_1	0,55	m
5	Radio	r	1,38	m

6	Radio curvatura esfera superior	R_1	2,00	m
7	Volumen de la cúpula	V_1	2,4	m^3
8	Volumen del cilindro	V_2	16,5	m^3
9	Volumen total biodigestor	V_{fb}	18,9	m^3
10	Superficie estructural	S	6,9	m^2
11	Volumen de la cámara de mezcla	V_m	0,65	m^3
12	Volumen de la cámara de efluente	V_d	1,54	m^3

3.8. Emisiones de gases de efecto invernadero (Impacto Ambiental)

De acuerdo a (León & Mabel, 2012; Liu et al., 2012; Ramón et al., 2013) las emisiones de metano generadas por el ganado se estiman en 58 millones de toneladas/año (80 millones que generan los animales domésticos), en el presente proyecto se estaría dejando de emitir al medio ambiente 2855,4 m^3 de metano por año producto de las excretas del ganado porcino, siendo éste gas 23 veces más potente que el dióxido de carbono en contribuir el efecto invernadero (Saldarreaga, 2012).

El beneficio que tiene la implementación de un Biodigestor de Domo Fijo (BDF) es disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, fundamentándose principalmente en su capacidad de reducir las emisiones de CO₂, en comparación con carburantes derivados del petróleo. Un análisis teórico investigativo estima que un BDF de 8 m^3 puede producir 17 164,8 kW/año, considerando que un metro cúbico de biogás representa un valor equivalente a 5,96 kW (I. A. M. S. J. A. Hilbert, 2008). Con la combustión de biogás, en lugar de combustibles derivados del petróleo, como es el caso del GLP que se utilizó como parámetro de estudio en la presente investigación, existe un potencial de reducir 0,25 kg de CO₂ por kW de energía producida, en base a datos propuestos por Kumar (2000). El valor total que puede reducir por año en términos de CO₂ está en el orden de 4,2 toneladas, para un biodigestor de domo fijo de 8 m^3 .

Conclusiones

- Según el análisis de los portadores energéticos observamos que el mayor gasto anual que se produce en la granja es por consumo de GLP (1215kg),

por lo tanto este estudio está dirigido a remplazar el gas por el biogás con una capacidad de 2700 m³.

- En base a las muestras obtenidas y a las fórmulas planteadas podemos determinar la altura, capacidad y volumen del biodigestor prototipo. H=2.96m, D=2.76m, V biodigestor =18.9 m³.
- Por medio de este estudio se estaría dejando de emitir al medio ambiente 2855,4 m³ de metano por año producto de las excretas del ganado porcino.
- En este presente estudio la producción de biomasa es 819 kg por día.

CAPITULO IV: PROPUESTA

4.1. Título de la propuesta

Biodigestor de domo fijo para aprovechamiento del potencial energético de las excretas del ganado porcino de la Granja Porcina García.

4.2. Justificación de la propuesta

Un biodigestor alternativo que aproveche las excretas del ganado porcino, se hace necesario para generar una energía alternativa y limpia, dirigida a disminuir el consumo de GLP (garrafas 45 kg GLP) no subsidiados por el gobierno, así como el consumo de leña, y tener de esta manera un abastecimiento de energía térmica, que pueda ser utilizada por la granja, de esta manera se contribuye al impulso de nuevos proyectos de energías alternativas (biogás); y su vez disminuir paulatinamente los gases de efecto invernadero (GEI).

4.3. Objetivo de la propuesta

Aprovechar los desechos biológicos del ganado porcino para generar una energía renovable para reemplazar la utilización de GLP y leña en la Granja Porcina García.

4.4. Estructura de la propuesta

La estructura de la propuesta para la implementación de un biodigestor de domo fijo alternativo que permita aprovechar las excretas del ganado porcino de la granja, para generar biogás. Se encuentra dividido en: las partes constitutivas del biodigestor, la operación y el mantenimiento preventivo, análisis económico, social y medio ambiental.

4.4.1. Partes constitutivas del biodigestor

Las partes constitutivas básicamente se resumen en: la materia prima o biomasa, tanque de mezcla, tubería de entrada, tanque reactor, gasómetro, conducto de salida del biogás, tubería de salida del efluente y tanque de descarga. En la Figura 4.1 se describen cada una de estas partes.

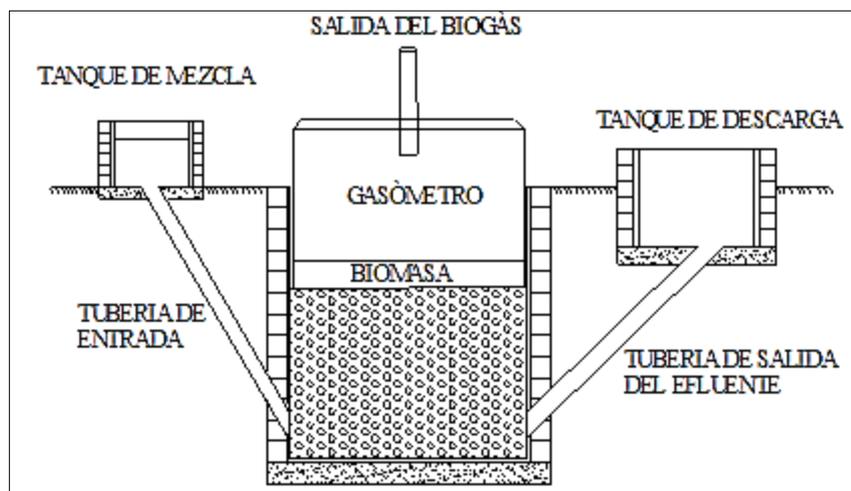


Figura 4.1. Partes del biodigestor de domo fijo.

a. Materia prima disponible

Los residuos sólidos que generan el ganado porcino en la Granja Galpón ascienden a 819 kg de estiércol fresco por día, de acuerdo a la tabulación realizada en el literal 3.3, además por cuestiones económicas y factibilidad del proyecto solo se realizará el diseño para 8 m³ de producción de biogás por día. En la tabla 4.1 se detalla la producción de biogás y la demanda que tiene la Granja.

Tabla 4.1. Portadores energéticos disponibles y su demanda.

TOTAL Litros Estiércol/día	TOTAL m ³ biogás/día	Producción m ³ biogás/mes	Potencia instalada m ³ biogás/mes
1064,7	8	240	225

Elaborado por: Mauricio Villacrés Jirón

La propuesta que se plantea con 240 m³ de biogás que se generan en el biodigestor de domo fijo que cubriría el 94 % del consumo de GLP de la granja.

b. Cámara de mezcla a la entrada del biodigestor

La cámara de mezcla tiene las siguientes dimensiones: 0,65 m de altura y 1,4 m de diámetro, con una capacidad de 1 278 litros de mezcla, se ha sobre dimensionado en 20 % por seguridad, ante cualquier eventualidad como sugiere Santos-Benavides (2015), puede ser: exceso de materia prima, por mantenimiento o por falla del biodigestor. En el Anexo 18 se presenta un esquema detallado del reactor.

c. Cilindro del biodigestor

El cilindro del biodigestor tiene una capacidad de 16 000 litros, de acuerdo a las siguientes especificaciones: altura de 2,76 m y un radio de 1,38 m. Donde, la estructura de concreto del tanque reactor según sugiere Santos-Benavides (2015), debe regir bajo la norma ASTM A 496. La misma detalla claramente las especificaciones técnicas para su construcción.

d. Cúpula del biodigestor

Las dimensiones de la cúpula del biodigestor tiene un radio de 2,7 m con una altura de 0,55 m; teniendo una capacidad de almacenamiento de 2400 litros de biogás a una presión media estimada de entre 0,5 a 1,5 bar.

e. Cámara de descarga del efluente

Tiene una capacidad de 1540 litros, teniendo las siguientes dimensiones: radio 1,4 m y altura de 1,0 m.

f. Tubería de transporte del biogás

La tubería para el transporte del biogás que va desde el biodigestor hacía el punto de utilización, será implementada de acuerdo a especificaciones técnicas de la norma NTE INEN 2 260:2008. Como se muestra en el Anexo 7.

4.4.2. Operación y mantenimiento básico preventivo del biodigestor

La operación y el mantenimiento del biodigestor de domo fijo se deben realizar bajo la supervisión de un experto en la rama, deben seguirse algunas indicaciones específicas según sugiere Santos-Benavides (2015).

1. Construido el biodigestor de domo fijo, se realiza la primera carga asegurando que las tuberías de entrada y salida queden sumergidas en el líquido para tener un sello hidráulico. Tras esto, al día siguiente se hará la misma operación y en adelante toda la vida útil operativa del biodigestor.
2. En la mezcla entre el estiércol y el agua, cuando se realiza manualmente se debe considerar siempre una relación de 1:1,3 de acuerdo a lo sugerido por Hilbert (2008) y Santos-Benavides (2015); pero sí la limpieza del establo es con manguera se debe tomar en cuenta la relación antes mencionada.
3. Comprobar y registrar diariamente la presión marcada por el manómetro del biodigestor. En caso de que la presión marque cero, se debe verificar si existe fuga, esto se puede comprobar con agua y jabón entre las uniones de la tubería o donde existen tapas. Si existe fuga, se debe corregir y revisar nuevamente el manómetro para ver si la presión subió.
4. La mezcla del estiércol del ganado porcino no debe tener partículas superiores a 5 mm o restos según sugiere Santos-Benavides (2015).
5. La limpieza de las cámaras de mezcla y descarga se deben realizar con agua pura, sin aditivos jabonosos.
6. El área del biodigestor debe tener libre circulación de aire, porque el biogás es altamente explosivo y puede provocar un incendio.
7. Los parámetros de temperatura, presión y potencial de hidrogeno se deben ir monitoreando constantemente, porque la producción de biogás depende de estos factores.
8. Se tiene que vigilar que no exista condensación de líquidos en los conductos del biogás; ya que al acumularse el agua, produce golpeteos en el fuego y se apaga la llama. Por ende se deben purgar las tuberías una vez al día.

4.4.3. Análisis económico

El costo de los materiales para la implementación del biodigestor de domo fijo propuesto son detallados en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Costos de materiales para la construcción del biodigestor domo fijo.

PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN DEL BIODIGESTOR DE DOMO FIJO					
PROYECTO: REACTOR PARA LA GRANJA PORCINA GARCÍA 18,9 METROS CÚBICOS					
EMPRESA: INDUACERO&CONSTRUCCIONES					
FECHA: NOVIEMBRE 2015					
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	PRECIO TOTAL (USD)
1	Estudio de planeamiento de suelo	45	m ²	17	765
2	Compactación y nivelación de suelo	35	m ²	12,5	437,5
3	Excavación de suelo	20	m ³	20	400
4	Encofrado de pared reactor	47,7	m ²	6,5	310,05
5	Encofrado de pared cúpula	11,8	m ²	6,5	76,7
6	Acero de refuerzo	70	kg	0,9	63
7	Malla electro soldada	15	kg	1,2	18
8	Hormigón simple f'c = 210 kg/cm ²	6	m ³	130	780
9	Empedrado base	16,6	m ²	7,6	126,16
10	Impermeabilización de pared	59,9	m ²	12,5	748,75
11	Piedra triturada de relleno	70	m ³	3	210
12	Tubería PVC de 4 1/2" para mezcla y descarga.	12	m	3,35	40,2
13	Tubería PVC de 1/2" ducto del biogás	35	m ²	2,3	80,5
TOTAL (USD)					4 055,86

Elaborado por: Mauricio Villacrés Jirón

4.5.3.1. Costos de soporte técnico y mano de obra

Otros rubros complementarios son: el soporte técnico y la mano de obra que se requiere para la ejecución del sistema híbrido que abastecería de energía térmica a la Granja como se muestra en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Costo de soporte técnico e instalación sistema de biogás.

SOPORTE TÉCNICO & MANO DE OBRA		
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	DÓLARES
1	Soporte Técnico	500
2	Mano de Obra	1 500
TOTAL		2 000

Elaborado por: Mauricio Villacrés Jirón

4.4.3.2. Costo total del biodigestor domo fijo para la granja porcina García

El costo para implementar el biodigestor que reemplazaría el 94 % del consumo de GLP, que utiliza la Granja Porcina García en sus actividades productiva de la misma, es aproximadamente 6 055,86 USD.

4.4.3.4. Ahorro anual del gas licuado de petróleo y los abonos químicos con la implementación del biodigestor de domo fijo

Los beneficios directos de la implementación del presente proyecto pueden ser estimados en base al uso del biogás, como una fuente alternativa a las energías no renovables, y a la aplicación del efluente como una sustitución de nutrientes aportados por los fertilizantes químicos (Hilbert, 2008). El valor comercial del biogás como fuente de energía fue estimado en su equivalente en valor energético de un combustible convencional que puede ser reemplazado por el uso del biogás. El combustible comúnmente utilizado para obtener energía térmica en las zonas rurales es el GLP. El valor neto en calorías de un metro cúbico de biogás equivale a la energía emitida por 0,45 kg de GLP (Hilbert, 2008). Así, la producción de 240 m³ de biogás podrá suplir la demanda energética de la granja que estaría en una media de 101,25 kg de GLP.

El valor comercial de 1 kg de GLP es 1,24 USD (Congas, 2013). Calculando la cantidad de biogás por su equivalente energético en GLP por su valor comercial, los beneficios directos derivados de la combustión de biogás, aproximadamente ascienden a 1 506,6 USD.

Por otro lado aunque no ha sido un objetivo, también se pueden recibir beneficios directos derivados del biol o bioabono, debido a que puede incrementarse si el efluente se seca y se vende como fertilizante sólido a fincas o agricultores propios de la zona, a un precio mayor que el abono comercial por tener mejores características que los abonos químicos (Santos-Benavides, 2015).

4.4.4. Evaluación financiera

Criterio del valor actual neto:

Este criterio permite determinar el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuro, producidos por una inversión (ver tabla 4.4). La ecuación 4.1 presenta los parámetros para calcular el VAN (Mahmood, 2005).

$$VAN = -A + \frac{Q_1}{(1+k_1)} + A + \frac{Q_1}{(1+k_1).(1+k_2)} + \dots + \frac{Q_n}{(1+k_1) \dots (1+k_n)} \quad (4.1)$$

Dónde:

- **VAN.**- Valor Actual Neto de la Inversión
- **A.**- Valor de la Inversión Inicial
- **Qi.**- Flujos de caja. Se trata del valor neto así cuando en un mismo período se den flujos positivos y negativos será la diferencia entre ambos flujos.
- **ki.**- Tasa de retorno del período

Tabla 4.4. Análisis del VAN para el biodigestor con aislamiento térmico.

INVERSIÓN	6 055,8
TASA BCE	12 %
VIDA ÚTIL	20 años

Año	Flujo Caja	VAN 12 %
1	3486,4	3112,86
2	3486,4	2779,34
3	3486,4	2481,55
4	3486,4	2215,67
5	3486,4	1978,28
6	3486,4	1766,32
7	3486,4	1577,07
8	3486,4	1408,10

9	3486,4	1257,23
10	3486,4	1122,53
11	3486,4	1002,26
12	3486,4	894,87
13	3486,4	798,99
14	3486,4	713,39
15	3486,4	636,95
16	3486,4	568,71
17	3486,4	507,77
18	3486,4	453,37
19	3486,4	404,79
20	3486,4	361,42
VAN		26 041,47

Elaborado por: Mauricio Villacrés Jirón

El Valor actual neto de la inversión es de **26 041,47 USD** lo que significa que el biodigestor de domo fijo generará beneficios económicos a la administración de la Granja, determinando que el proyecto es viable.

Tasa interna de retorno: el TIR es un indicador de rentabilidad de un proyecto, al ser mayor se puede decir que el proyecto es aceptable caso contrario se rechaza, para

obtener este valor se calcula con la ecuación 4.2 (Mahmood, 2005). En la tabla 4.5 se tiene un resumen del cálculo del TIR.

$$TIR = \frac{-I_0 + \sum_{t=1}^n F_t}{\sum_{t=1}^n x F_t} \quad (4.2)$$

Dónde:

- **Ft.**- Flujos de caja en el período t
- **n.**- Número de años
- **Io.**- Inversión inicial

Tabla 4.5. Cálculo de la TIR del biodigestor de domo fijo.

INVERSIÓN	6 055.8
TASA BCE	0,12
VIDA ÚTIL	20 años
Año	TIR 12 %

Io	-6055.80
1	3112.86
2	2779.34
3	2481.55
4	2215.67
5	1978.28
6	1766.32
7	1577.07
8	1408.10
9	1257.23
10	1122.53
11	1002.26
12	894.87
13	798.99
14	713.39
15	636.95
16	568.71
17	507.77
18	453.37
19	404.79
20	361.42
TIR =	41 %

Elaborado por: Mauricio Villacrés Jirón

De acuerdo a la tabla 4.5, la Tasa Interna de Retorno de la inversión es del 41 %, lo cual significa que el biodigestor domo fijo es superior a la tasa referencial del Banco Central del Ecuador, determinando así que el proyecto es aceptable.

4.6. ANÁLISIS SOCIO-ECONÓMICO

El sistema de abastecimiento de energía térmica actual (GLP) en la granja porcina García es de 1 215 kg de GLP (cilindros 45 kg no subsidiado) lo que representa un costo de 1510 USD. Con la implementación del biodigestor de domo fijo, el consumo anual de GLP se reducirá a 45 kg de GLP (1 cilindro de 45 kg) a un precio de 55,93 USD obteniendo un ahorro aproximado de 1170 kg de GLP a un monto de 1 454 USD.

CONCLUSIONES GENERALES

1. El total de biomasa residual derivados del ganado porcino, disponible en los corrales de la Granja Porcina García, asciende a 819 kg/día. Su potencial energético tabulado de acuerdo al tipo de animal representa para el caso de hembras en reemplazo el 4,9%, los machos el 4,4%. las hembras en gestación 68% y los lechones el 22%.
2. A partir de los cálculos correspondientes se comprobó que para las condiciones de explotación de la granja se obtienen 819 kg/día de excretas frescas sólidas, las que mezcladas con agua según la relación recomendada de 1:1.3 permite conseguir 1064,7 litros de mezcla de biomasa residual. Esta cantidad, usada en un biodigestor de domo fijo, posibilitará obtener alrededor 2538 kg/año de biogás.
3. A partir del método experimental calorimétrico alternativo fue determinado el poder calórico del biogás producido por el prototipo de biodigestor tipo "Batch". Su valor ascendió a 5 713 kcal/m³, para un gas que contenía 61,2 % de partículas de metano.
4. Se seleccionó el biodigestor de domo fijo por ser el más apropiado según estudio bibliográfico realizado. Los parámetros de diseño del tanque reactor son: diámetro 2,76 m, altura 2,96 m, volumen total del biodigestor 18,9 m³, volumen de la cámara de mezcla de 0,65 m³ y el volumen de la cámara de efluente es de 1,54 m³.
5. A partir de la evaluación financiera, se obtuvo un VAN con valor positivo de 26 041,47 USD para una TIR de 41 %, lo que evidenció la viabilidad económica del proyecto de investigación. La implementación del biodigestor propuesto permitirá ahorrar alrededor de 1 506,6 USD a la granja, al dejar de combustionar alrededor de 1 215 kg de gas licuado de petróleo. Lo anterior, favorecerá al medio ambiente, por cuanto se estaría dejando de emitir a la atmósfera 4,2 t de CO₂ por año.

RECOMENDACIONES

1. Proponer la socialización del presente trabajo de investigación a otras granjas de la región para seguir identificando potencialidades en el uso racional de los portadores energéticos y que a su vez sea la base de la fundamentación de un proyecto de financiamiento para el uso eficiente del estiércol porcino.
2. Profundizar en la validación del estudio experimental del estiércol porcino generado y acumulado en las corraletas durante el transcurso de un ciclo de producción para determinar rendimiento óptimo de biogás.
3. Investigar la posibilidad de implementación, en la Granja Porcina García, de otros tipos de biodigestores y tecnologías para la producción de biogás.

Referencias bibliográficas

- Alonso, M. (1986). *Física Mecánica y Termodinámica*. Argentina: ADDISON-WESLEY IBEROAMERICANA.
- Andrade, W. R., Souza, J. E. d., Arruda, L. D. d. O., Gomes, F. O. d. C., & Xavier, C. d. A. N. (2014). Monitoramento do pH e alcalinidade na partida de biodigestores contínuos operados com diferentes dejetos. *ANAIS DO ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA-ENIC*, 1(5).
- Armendáris, G. (1989). *Química General Moderna*. Quito: Publicaciones Modernas.
- Barrera Cardoso, E. (2006). *Propuesta tecnológica para producir biogás con fines energéticos, un estudio de caso en la Granja Remberto Abad Alemán*. (Tesis de Maestría), Universidad de Cienfuegos
- Barrera, P. (1993). *Biodigestores: energía, fertilidade e saneamento para a zona rural: Ícone*.
- Borroto Nordelo, A. (2006). *Gestión y economía energética*. Cienfuegos: Unverso Sur.
- Brown, D., Shi, J., & Li, Y. (2012). Comparison of solid-state to liquid anaerobic digestion of lignocellulosic feedstocks for biogas production. *Bioresource technology*, 124, 379-386.
- Campos, M. (1999). Procedimientos para programas de control y mejoramiento de la eficiencia energética en empresas de producción y servicios.
- Caraballo, M. E. (2006). *Diseño y construcción del biodigestor atípico del ISMMM*. (Trabajo de Diploma Tesis de Ingeniería Mecánica), Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa.
- Carrillo, L. (2004). Energía de la biomasa, Conversión por microorganismos, Biogás, Etanol, Biodiesel.
- Cobián, B. D. (2008). *Tratamiento aerobio-anaerobio de residuos ganaderos para obtención de biogás y compost*. (Tesis de Doctorado), Universidad de León, España.
- Comas Rodríguez, R. (2011). Indicador general de gestión energética para la Empresa de Cigarrillos Juan D. Mata Reyes.
- Congas, C. (2013). Compañía Nacional de Gas. *Quito*.
- Chungandro, K. (2010). *Diseño y construcción de un biodigestor para pequeñas y medianas granjas*. Quito: EPN.
- Díaz, Y. (2012). *Influencia de la adición de residuos de matadero procesados a dietas porcinas en la producción y calidad del biogás y los biofertilizantes en biodigestores de cúpula fija La Habana*. Tesis de Maestría en Ciencias Técnicas Agropecuarias. Universidad Agraria de La Habana.
- Domínguez, P. (2009). Biodigestores como componentes de sistemas agropecuarios integrados. Punta Brava, La Habana: Instituto de Investigaciones Porcinas.
- Domínguez, P. L., & Ly, J. (2000). Biodigestores como componentes de sistemas agropecuarios integrados. *Instituto de Investigaciones Porcinas. La Habana, Cuba. P.*

- Domniguez, G., Salazar, G., Galindo, J., Xelhuantzi, J., Castneda, M., Sanchez, F., & Hernandez, P. (2012). Implementación de biodigestores para pequeños y medianos productores porcícolas. *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Pacífico Centro. México.*
- Doria, A. (2001). Energías Alternativas *Programa Con/Ciencia* (pp. 78).
- Fernández Castillo, E. (2003). Estudio de las Condiciones de Operación para la Digestión Anaerobia de residuos Sólidos Urbanos. Colombia: Universidad de Santander.
- Field, J. (1987). Medición de Metano del Biogás. www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd68/000866/000866c.pdf
- Ge, X., Matsumoto, T., Keith, L., & Li, Y. (2014). Biogas energy production from tropical biomass wastes by anaerobic digestion. *Bioresource technology*, 169, 38-44.
- Gomero Osorio, L. (2005). Los biodigestores campesinos, una innovación para el aprovechamiento de los recursos orgánicos. *Leisa revista de agroecología (Perú)*.(Jun, 21(1), 25-27.
- GTZ;. (1987). Difusión de la tecnología del biogás en Colombia.
- Guardado, J. A. (2007). Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas: CUBASOLAR.
- Herrero, J. M. (2008). *Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación*: Jaime Marti Herrero.
- Hilbert. (2008). Manual para la Producción de Biogás. *Argentina-Castelar*.
- Hilbert, I. A. M. S. J. A. (2008). *Manual para la Producción de Biogás*. Argentina-Castelar.
- IDAE. (2007). Digestores Anaeróbicos. *BESEL, S.A. (Departamento de Energía)*, 6-7.
- Kovács, E., Wirth, R., Maróti, G., Bagi, Z., Rákhely, G., & Kovács, K. L. (2013). Biogas production from protein-rich biomass: fed-batch anaerobic fermentation of casein and of pig blood and associated changes in microbial community composition. *PLoS one*, 8(10), e77265.
- Lara. (2011). Diseño de un Biorreactor y Conducción del Biogás Generado por las Excretas de Ganado Vacuno, Estación Tunshi-Espoch. *Ingeniería en Biotecnología Ambiental*, 63-65; 85-92; 99-112.
- León, C., & Mabel, F. (2012). Aprovechamiento del estiércol de gallina para la elaboración de biol en biodigestores tipo Batch coma propato al manejo de residuos avícola.
- Liew, L. N., Shi, J., & Li, Y. (2012). Methane production from solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. *Biomass and Bioenergy*, 46, 125-132.
- Liu, X., Gao, X., Wang, W., Zheng, L., Zhou, Y., & Sun, Y. (2012). Pilot-scale anaerobic co-digestion of municipal biomass waste: focusing on biogas production and GHG reduction. *Renewable energy*, 44, 463-468.
- Lizama, W. T., González, L. V., Uicab, A., Caamal, J. C., Maldonado, A. C., Casso, R. B., & Ricalde, R. S. (2014). EFICIENCIA DE REMOCION DE MATERIA ORGÁNICA DE AGUAS RESIDUALES PORCINAS CON BIODIGESTORES EN EL ESTADO DE YUCATÁN, MEXICO. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 17(2), 321-323.

- Loaiza, C., & Del Cisne, S. (2015). *Obtención de Biol a partir de estiércol de ganado porcino y vacuno producido en la finca bella Maria, Cantón Quito, sector Nanegalito km 34, año 2014*. Universidad Internacional SEK.
- Losada, L. M., Barragán, M. V., & Rodriguez, M. P. (2015). Evaluación de inóculos para la digestión anaerobia de aguas residuales domésticas en condiciones del Piedemonte Amazónico. *Momentos de Ciencia*, 9(2).
- Lovaina, B. J. (2003). Nuevas tecnologías para el uso eficiente de la energía. La Habana: CUBASOLAR.
- Lucas Júnior, J. (1994). *Algumas considerações sobre o uso do estrume de suínos como substrato para três sistemas de biodigestores anaeróbios*. 1994. 137 f. Tese (Livre-Docência)-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.
- Mahmood, N. (2005). *Matemática Financiera* Bogotá: ISBN.
- Martí-Herrero, J., Acosta Bedoya, F., & Gonzales, L. (2013). Plan del Programa Nacional de Biodigestores de Bolivia: Document] sl: HIVOS, SNV, CIMNE (BeeGroup), Soluciones Practicas.
- Martina. (2005). Estudio de la producción de biogás en función de la cantidad de residuos de madera en un biodigestor tipo de carga única o Batch. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 23-27.
- Martina, P., Yank, L., Corace, J., & Aeberhard, R. (2003). Ensayo en un biodigestor con aserrín de diferentes maderas.
- Mediacejas Granda, I. (2011). *Propuesta de un biodigestor a partir de una caracterización energética de la Unidad Básica de Producción Cooperativa "Rolando Lores Cuesta"*. (Máster en Eficiencia Energética Tesis de Maestría), Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- Moreta Criollo, M. L. (2013). *Diseño de un biodigestor de estiércol porcino para una granja agrícola ubicada en el Barrio La Morita, parroquia de Tumbaco para el año 2012-2013*. Universidad Internacional SEK.
- Mudhoo, A., & Kumar, S. (2013). Effects of heavy metals as stress factors on anaerobic digestion processes and biogas production from biomass. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10(6), 1383-1398.
- Organización Panamericana para la Salud. (1999). Manual para la Elaboración de Compost.
- Orozco Varas, E. (2015). Manejo y uso del estiércol porcino.
- Pedraza, G., Chará, J., Conde, N., Giraldo, S., & Giraldo, L. (2002). Evaluación de los biodigestores en geomembrana (pvc) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino. *Livestock Research for Rural Development*, 14(1).
- Rajendran, K., Aslanzadeh, S., & Taherzadeh, M. J. (2012). Household biogas digesters—A review. *Energies*, 5(8), 2911-2942.
- Ramón, A., Romero, F., & Simanca, J. (2013). Diseño de un biodigestor de canecas en serie para obtener gas metano y fertilizantes a partir de la fermentación de excrementos de cerdo. *Revista Ambiental agua, aire y suelo*, 1(1).

- Rodas Corrales, E. M. (2015). Creación de una empresa productora de bioabono utilizando estiércol de cerdo producido en el área de influencia del cacao del cantón Santa Rosa.
- Rodríguez, J. C. S. (2008). *Energías Renovables y Eficiencia Energética*. Canarias: ISBN.
- Saldarreaga, D. (2012, Agosto 8). El metano es 23 veces más fuerte que el dióxido de carbono. *El Comercio*.
- Santos-Benavides, W. R. (2015). *Evaluación del potencial de biomasa residual del ganado vacuno para el aprovechamiento energético en la Granja Galpón del cantón Salcedo provincia de Cotopaxi año 2013. Diseño de un biodigestor alternativo para este propósito*. Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Seixas, J., Folle, S., & Marchetti, D. (1981). Construção e funcionamento de biodigestores *EMBRAPA circular técnica* (Vol. 4): Embrapa.
- Stuckey, D. (1983). Technology Assessment Study of Biogas in Developing Countries. *International Reference Center for Waste Disposal*, 16-22.
- Thu, C. T. T., Cuong, P. H., Van Chao, N., Trach, N. X., & Sommer, S. G. (2012). Manure management practices on biogas and non-biogas pig farms in developing countries—using livestock farms in Vietnam as an example. *Journal of Cleaner Production*, 27, 64-71.
- Tobares, L. (2013). La importancia y el futuro del biogás en la Argentina. *Petrotecnia*.
- Torres, A., Quipuzco, L., & Meza, V. (2013). INFLUENCIA DE LA FERMENTACIÓN LÁCTICA (ABONO BOCASHI) EN EL PRECOMPOST PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y BIOL EN BIODIGESTORES TIPO BATCH. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 16(32).
- Trejo-Lizama, W., Vázquez-González, L., Uicab, A., Castillo-Caamal, J., Caamal-Maldonado, A., Belmar-Casso, R., & Santos-Ricalde, R. (2014). REMOVAL EFFICIENCY OF ORGANIC MATTER OF PIG SLURRY WITH BIODIGESTERS IN YUCATAN STATE, MEXICO. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 17(2).
- Ushñahua, L. Q., Quispe, W. B., & Cruz, O. T. (2014). Evaluación de la calidad de biogas y biol a partir de dos mezclas de estiércol de vaca en biodigestores tubulares de PVC. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 14(27).
- Utria, M. T. N. (2014). *Potencialidades de la Biomasa en la Unidad Básica de Producción Avícola "Frank País García" de Moa*. (Tesis de Maestría), Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- VAZQUEZ GONZALEZ, G. E. (2015). PERSPECTIVAS DEL BIOGÁS COMO FUENTE DE ENERGÍA PARA LAS ZONAS RURALES DE MÉXICO: CASO CHIAPAS.
- Vega, M. E. L., & Herrero, R. S. (2012). Estudio preliminar del comportamiento de rellenos sanitarios como biodigestores a escala de laboratorio. *Afinidad*, 69(558).
- Villanueva, S. M. (Producer). (2008). Proyecto de Biogás.

ANEXOS

Anexos 1: Tabla para recopilación de datos manualmente del biodigestor

HOJA DE ENSAYOS BIOMASA RESIDUAL ANIMAL

NOMBRE: _____

FECHA: _____

TIPO: _____

VOLUMEN _____

BIOMASA (kg): _____

FECH A	HOR A	T. Amb. (°C)	T. Biomasa (°C)	pH	ppm METAN O	PRESIÓ N ATM. (hPa)	PRESIÓ N (psi)

Anexo 2: Tabla de datos del biodigestor.

(1) N°	(2) Temperatura ambiental del aire [°C]			Temp. promedi o [°C]	Presión Promedi o [kg/cm ²]	Presión Ambient [kg/cm ²]	(6) Presión Total (7) [kg/cm ²]	Volumen Biógás (8) [ml]	Acidez Biógás (9) [pH]	Masa Generad a [kg]
	T [Norm]	TM [Máx]	Tm [mín]							
18	27,6	27	14	28	0,01025	1,035	1,0453	185,3	6,5	0,0002
19	28	27,2	15	28,1	0,01125	1,035	1,0463	274,6	6,6	0,0003
20	26	25	16	30,1	0,01265	1,036	1,0487	354,4	6,6	0,0004
21	28	26	14	31	0,01617	1,035	1,0512	568,1	6,7	0,0006
22	27	30	14,5	32	0,01968	1,035	1,0547	615	6,5	0,0007
23	26	33	15	32,1	0,0232	1,036	1,0592	760,4	6,6	0,0008
24	26,5	28	16	33	0,02671	1,034	1,0607	923,4	6,8	0,0010
25	27,5	29	15	32,1	0,03164	1,034	1,0656	1037	6,7	0,0011
26	27	27	17	31	0,03867	1,034	1,0727	1113	6,7	0,0012
27	25	25	16,5	30	0,04288	1,035	1,0779	1051	6,8	0,0012
28	25,3	28	16	30,2	0,0418	1,036	1,0778	1069	6,9	0,0012
29	26,4	28	15	31,2	0,05273	1,035	1,0877	1455	7	0,0016
30	27,5	29	15,1	33	0,06257	1,036	1,0986	1581	7	0,0018
31	26,5	28,1	17	32	0,0604	1,036	1,0964	1518	7,1	0,0017
32	27	29	18	31,5	0,06679	1,036	1,1028	1724	7,1	0,0020
33	28	27,5	18,1	32,1	0,07733	1,034	1,1113	2662	7,2	0,0031
34	29	26	19	34,6	0,08295	1,034	1,117	3523	7,2	0,0041
35	27,5	28	16	35,2	0,08506	1,034	1,1191	3626	7,3	0,0042
36	29	28	16,1	34,6	0,08647	1,035	1,1215	3636	7,3	0,0042
37	25	29	15,1	35,4	0,08647	1,035	1,1215	3581	7,3	0,0041
38	26	30	19	35,2	0,08277	1,035	1,1178	3640	7,2	0,0042
39	28,5	29	18	34,8	0,08647	1,036	1,1225	3365	7,2	0,0039
40	27	28	17,1	34,3	0,08577	1,035	1,1208	3326	7,2	0,0038
41	26,1	29	16	33,8	0,08577	1,036	1,1218	3263	7,1	0,0038
42	27,5	27	18	33,7	0,08436	1,036	1,1204	3060	7,1	0,0035
43	28,1	26,8	17,1	33,3	0,08506	1,035	1,1201	2984	7	0,0035
44	27	29	17	32,5	0,07333	1,034	1,1073	2837	7	0,0033
45	26	27	16,5	32,6	0,0696	1,033	1,1026	3021	7	0,0035
46	27,1	28	15	33,5	0,06889	1,034	1,1029	2831	7	0,0032
47	26	28	15,1	32,3	0,06489	1,034	1,0989	2515	7	0,0029
48	25	27,6	16	32,8	0,06819	1,035	1,1032	2597	7	0,0030
49	22	29,1	17	31,6	0,06449	1,036	1,1005	2326	7	0,0027
50	25	25	14,5	32,3	0,06046	1,034	1,0945	2313	7	0,0026
51	26,1	24	16,5	32,4	0,05576	1,035	1,0908	2067	6,9	0,0023
52	27	26	15	32,8	0,06046	1,036	1,0965	2086	7	0,0024
53	27,1	26,1	18	32,2	0,05976	1,036	1,0958	1858	7	0,0021

Anexo 3: Tabla de datos de las ppm del metano obtenido en el biodigestor.

BIODIGESTOR		
Día	ppm del Metano	%
21	9703,491	48,52%
23	10882,46	54,41%
25	12029,85	60,15%
27	12586,12	62,93%
29	12360,15	61,80%
31	12419,1	62,10%
33	12511,76	62,56%
35	13209,03	66,05%
37	12795,29	63,98%
39	12961,78	64,81%
41	13304,28	66,52%
43	12424,73	62,12%
45	12588,5	62,94%
47	12107,97	60,54%
49	12086,73	60,43%
51	12069,36	60,35%
53	12043,6	60,22%
	12240,2471	61,20%

Anexo 4: Materiales y equipos para el análisis físico del biogás.



Figura 1. Equipo utilizado en el experimento.

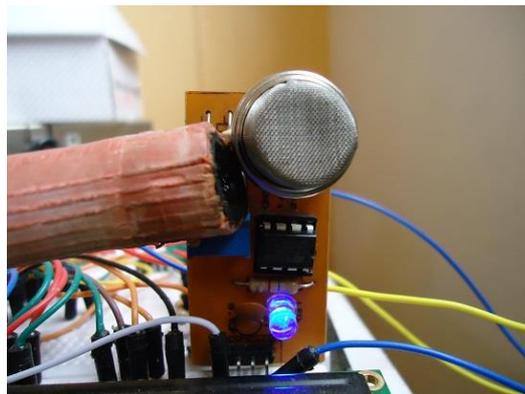


Figura 2. Determinación de las partículas de metano del biogás.

Anexo 5: Tablas de valores biomasa por especie

Cantidad de biomasa por especie animal porcino					
Especie animal	Peso vivo medido (kg)	Número animales	kg Estiércol/día	TOTAL kg Estiércol/día	Metros cúbicos de biogás/días
Hembras en reemplazo	150	6	6,75	40,5	4,0905
Machos	250	4	9	36	3,636
Hembras en gestación	250	50	11,25	562,5	56,8125
Lechones	100	40	4,5	180	18,18
TOTAL	750	100	31,5	819	82,719

Anexo 6. Datos de temperatura del agua vs volumen de biogás y GLP

Tabla 1. Datos de temperatura del agua vs volumen de GLP.

Ensayo con GLP			ΔT agua	Tiempo del ensayo
Nº	Volumen [l]	Temp. [°C]	°C	Segundos
1	0	16,8	40,2	386
2	1	19,2		
3	2	29,5		
4	3	39		
5	4	48,6		
6	5	57		

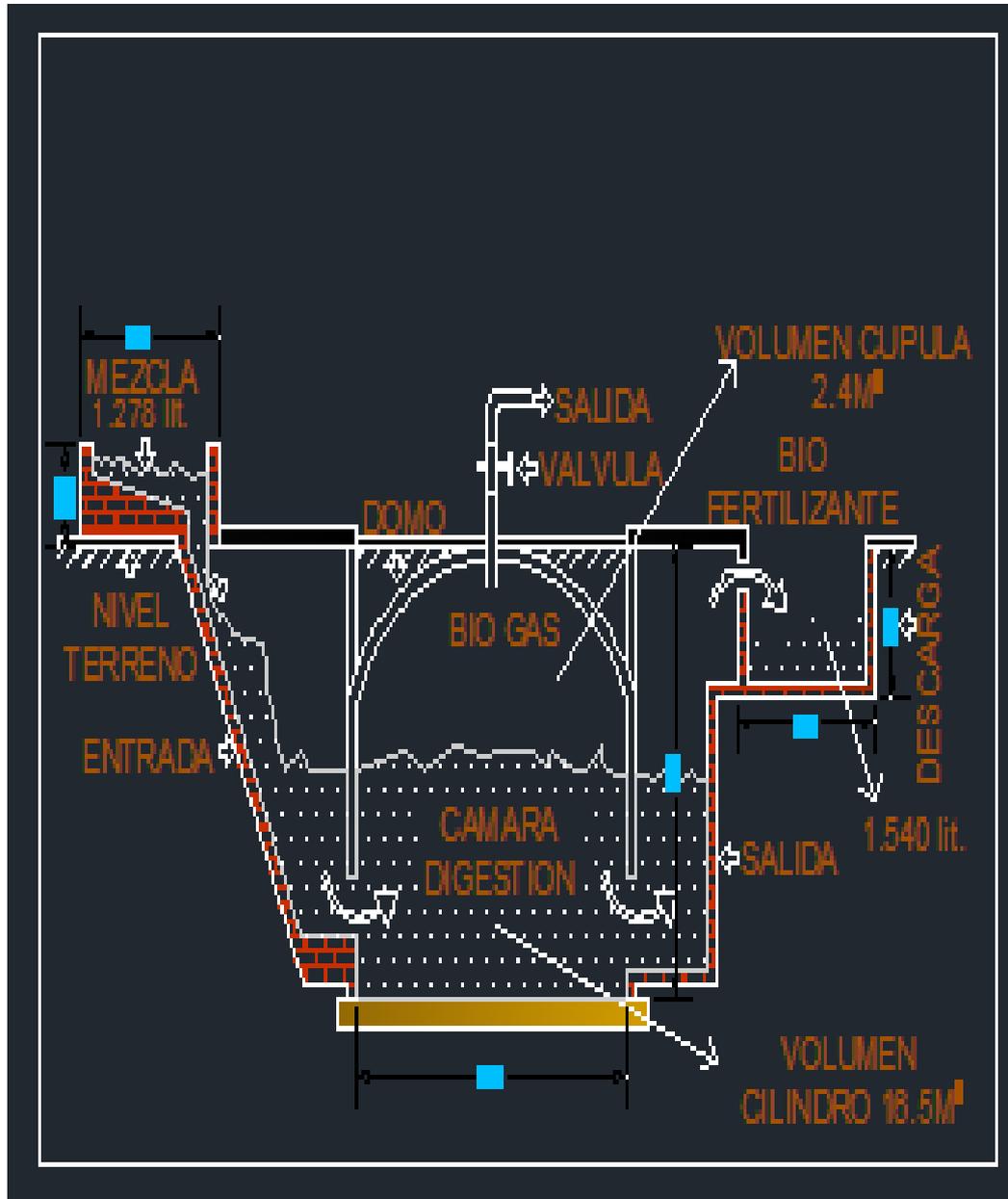
Tabla 2. Datos de temperatura del agua vs Volumen de biogás.

Ensayo con Biogás (Biodigestor con aislamiento)			ΔT agua	Tiempo del ensayo
Nº	Volumen [l]	Temp. [°C]	°C	Segundos
1	0	16,8	10,2	318
2	1	17		
3	2	18,2		
4	3	20,5		
5	4	22,7		
6	5	27		

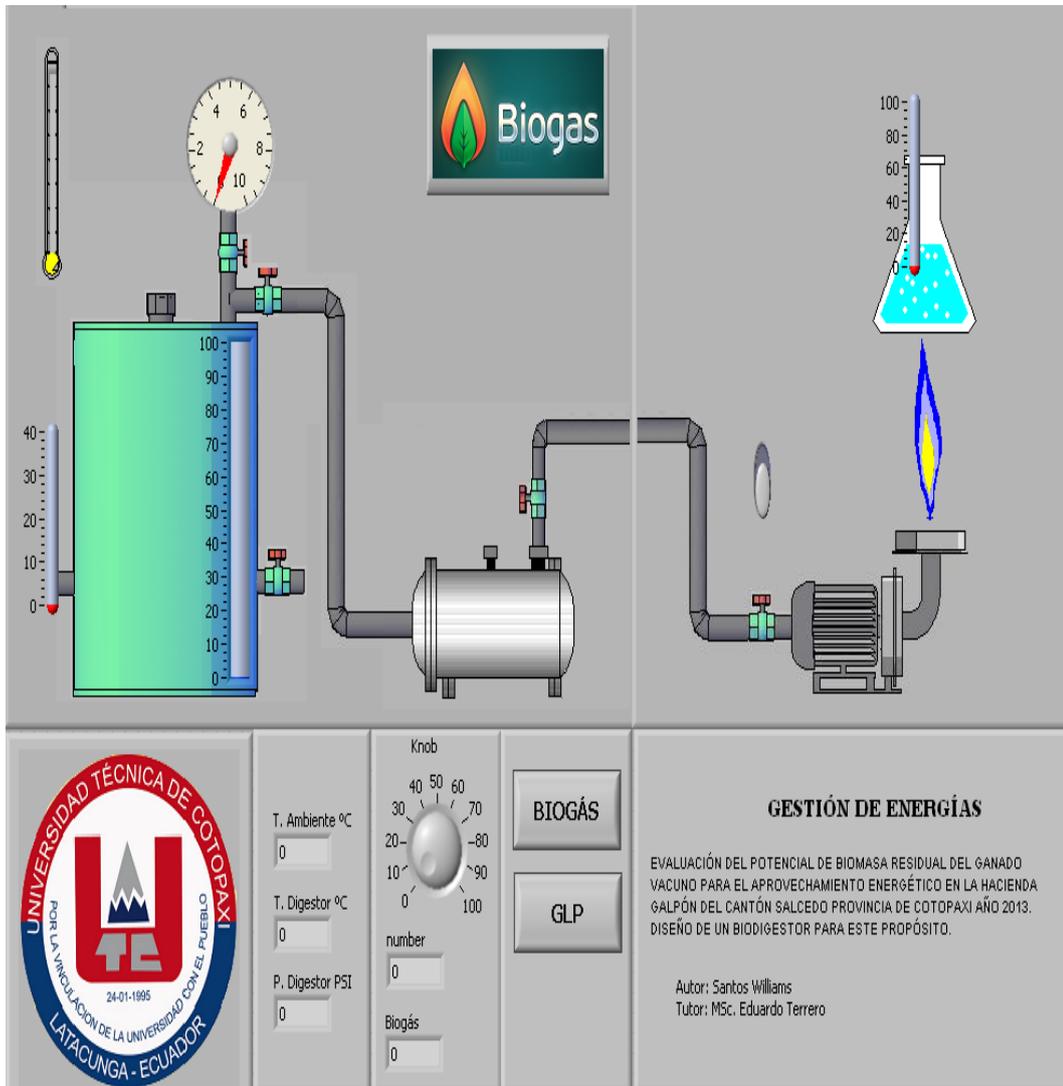
Tabla 2. Tabulación de la muestras de estiércol del ganado vacuno.

	Excretas de Ganado vacuno [kg]	Agua [kg]	Biomasa [kg]	Relación
Biodigestor	10	13	23	1:1.3

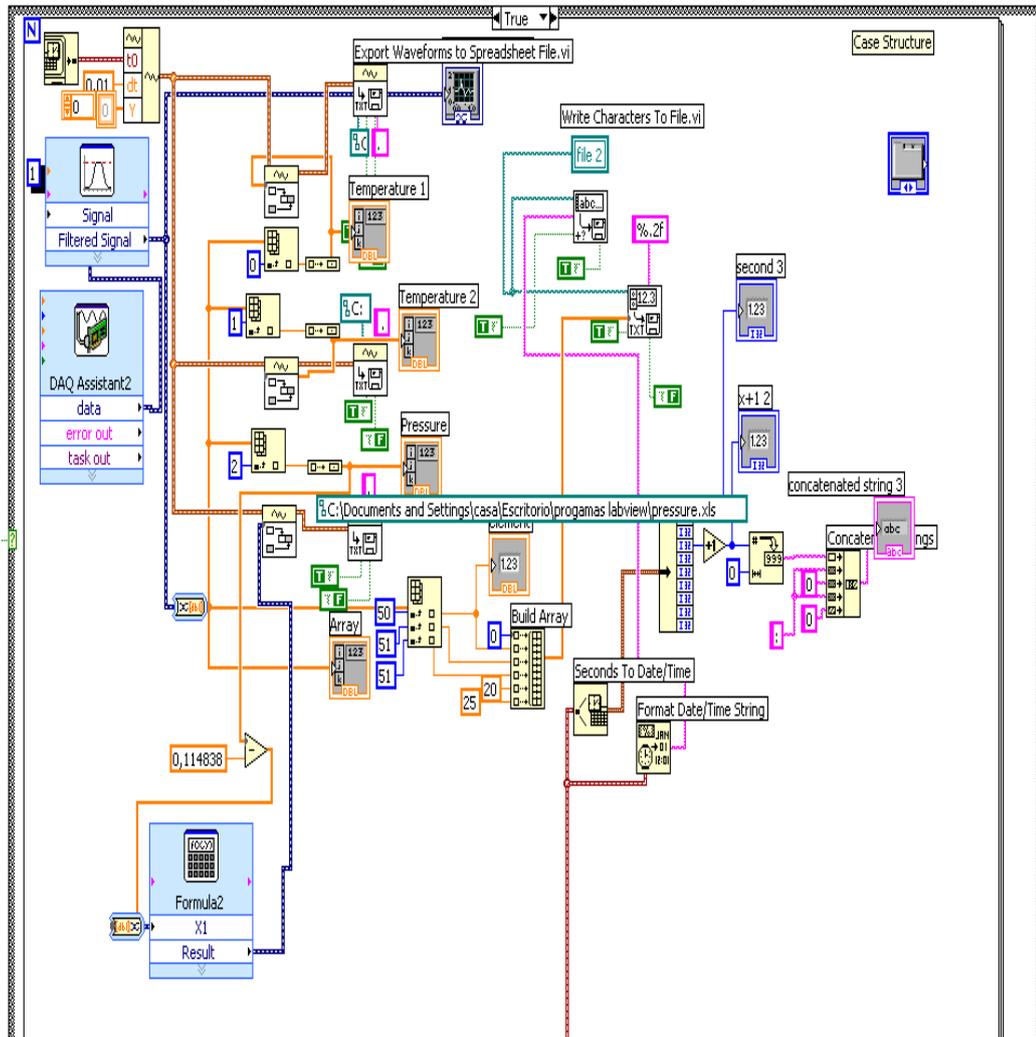
Anexo 7. Partes del Biodigestor de Domo Fijo



ANEXO 8. Pantalla de monitoreo de datos del biodigestor con aislamiento térmico.



Pantalla gráfica del monitoreo y registro de datos del biodigestor con aislamiento.



Programación de la pantalla gráfica del monitoreo y registro de dat