



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
UNIDAD DE POSGRADOS

**TESIS EN OPCIÓN AL GRADO ACADÉMICO
DE MAGISTER EN GESTIÓN DE ENERGÍAS**

Título:

Evaluación del potencial de biomasa residual del ganado vacuno para el aprovechamiento energético en la hacienda Galpón del cantón Salcedo provincia de Cotopaxi año 2013. Diseño de un biodigestor alternativo para este propósito.

Autor: SANTOS Benavides, Willams Roberto.

Tutor: RETIRADO Mediaceja, Yoalbys. PhD.

LATACUNGA – ECUADOR

Julio – 2015



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

UNIDAD DE POSGRADOS

Latacunga – Ecuador

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de Miembros del Tribunal de Grado aprueban el presente informe en consideración de posgrados de la Universidad Técnica de Cotopaxi; por cuanto, el maestrante: Santos Benavides Willams Roberto, con el título de tesis: **“Evaluación del potencial de biomasa residual del ganado vacuno para el aprovechamiento energético en la hacienda Galpón del cantón Salcedo provincia de Cotopaxi año 2013. Diseño de un biodigestor alternativo para este propósito”**, ha 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, Julio del 2015.

Para constancia firman:

.....
MSc. Paulina Freire.
PRESIDENTE

.....
PhD. Juan José La Calle.
MIEMBRO

.....
MSc. Mercedes Toro.
MIEMBRO

.....
PhD. Gustavo Rodríguez.
OPOSITOR

AVAL DEL DIRECTOR DE TESIS

Latacunga, Julio del 2015.

En mi calidad de Director de la Tesis presentada por: Santos Benavides Willams Roberto, Egresado de la Maestría en Gestión de Energías, previa a la obtención del mencionado grado académico, cuyo título es: **“Evaluación del potencial de biomasa residual del ganado vacuno para el aprovechamiento energético en la hacienda Galpón del cantón Salcedo provincia de Cotopaxi año 2013. Diseño de un biodigestor alternativo para este propósito”**.

Considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del tribunal examinador.

Atentamente,



PhD. Yoalby Retirado Mediaceja
TUTOR DE TESIS

AUTORÍA

Yo, Santos Benavides Willams Roberto, portador del número de cédula 0502362197, declaro que la presente Tesis de Grado, es fruto de mi esfuerzo, responsabilidad y disciplina, logrando que los objetivos propuestos se culminen con éxito.

Atentamente,

Santos Benavides Willams Roberto.
C. I. 0502362197

AGRADECIMIENTO

Agradezco primero a Dios por darme la bendición del día a día, y esa fortaleza física para culminar este trabajo, a mi niño de Isinche, a mi madre que es mi complemento mi gran amiga y compañera tierna, que me apoyó en todos los momentos más alegres de mi vida y los más tristes.

A mis queridos padres Rodrigo y Esperanza que siempre han sido mi pilar fundamental y ejemplo de lucha, tenacidad y humildad de seguir triunfando. De igual forma a mi hermana Paola que me ha presta su ayuda incondicional.

A mis compañeros de trabajo Marco Silva y Paúl Hidalgo, por haberme apoyado cada vez que los necesité.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi, porque en sus aulas, recibimos el conocimiento intelectual y humano de cada uno de los docentes de posgrados.

Quiero agradecer a mi tutor, PhD. Yoalbys Retirado, a mis amigos, MSc. Eduardo Terrero y MSc. Gabriel Hernández por ser crítico de mi forma de ser; a su vez mil gracias por sus consejos, amistad, paciencia y dedicación para culminar con éxito este trabajo.

Willams

DEDICATORIA

Dedico esta tesis primeramente a Dios por darme sus bendiciones, a mis padres Rodrigo y Esperanza por el regalo más grande “La vida”, a mi querida hermana Paola para que le sirva de guía y continúe sus estudios.

A Mariana de los Ángeles.

Por los ejemplos de perseverancia, constancia y las ganas de alcanzar los objetivos a pesar de las largas noches que se pase frente al escritorio para cumplir la meta.

CERTIFICACIÓN DE CRÉDITOS QUE AVALAN LA TESIS

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
UNIDAD DE POSGRADOS**

PROGRAMA: “MAESTRÍA EN GESTIÓN DE ENERGÍAS”

“Evaluación del potencial de biomasa residual del ganado vacuno para el aprovechamiento energético en la hacienda Galpón del cantón Salcedo provincia de Cotopaxi año 2013. Diseño de un biodigestor para este propósito.”

Autor: Ing. Santos Benavides Willams Roberto.

Fecha: Julio del 2015.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
UNIDAD DE POSGRADOS

MAESTRÍA EN GESTIÓN DE ENERGÍAS

TÍTULO: Evaluación del potencial de biomasa residual del ganado vacuno en la hacienda Galpón del cantón Salcedo provincia de Cotopaxi año 2013. Diseño de un biodigestor alternativo para este propósito.

Autor: Santos Benavides, Willams Roberto.

Tutor: Retirado Mediaceja, Yoalbys. PhD.

RESUMEN

En la presente investigación se realizó un estudio teórico-experimental del potencial energético de la biomasa residual del ganado vacuno en la hacienda Galpón, con el objetivo de aprovechar los desechos biológicos en un biodigestor y así obtener una energía renovable, que ayude a reducir los gases de efecto invernadero, como el CH₄ emanado a la atmosfera por la descomposición aerobia de las excretas animales. La revisión bibliográfica pone en evidencia los objetivos alcanzados en diferentes trabajos en cuanto a la metodología utilizada para caracterizar la biomasa residual del ganado bovino y su análisis energético, se refiere, reflejando datos técnicos-económicos y medio ambientales de gran utilidad para la propuesta de un biodigestor de domo fijo. Se parte del estudio experimental del proceso anaeróbico de la materia orgánica (excretas), donde se realiza la caracterización del: nivel de pH, temperatura de biodegradación, tiempo de retención hidráulica (THR), cantidad de partículas de metano presente en el biogás y el nivel de nutrientes del bioabono; a partir de ahí se llevaran a cabo procedimientos para la evaluación y aprovechamiento de la biomasa residual del ganado vacuno en la hacienda Galpón, con el propósito de obtener dos beneficios primordiales: reducir la emanación directa del gas metano a la atmosfera e introducir un nuevo tipo de energía renovable. El proceso de bioconversión se ejecutó en dos biodigestor tipo “Batch” con y sin aislamiento térmico, donde se inmiscuyó la tecnología del monitoreo y adquisición de datos en tiempo real, que permitió obtener los datos reales del proceso anaeróbico, parámetros fundamentales para determinar la calidad de producción de biogás y bioabono que será utilizado por la hacienda Galpón; y, mediante el método experimental calorimétrico se determinó el poder calórico del biogás producido por los prototipos de biodigestores tipo “Batch”, aplicando una propiedad termodinámica. Finalmente, la evaluación financiera corroboró la viabilidad de implementar un biodigestor de domo fijo, debido a que se obtuvo un valor actual neto (VAN) positivo, para una tasa interna de retorno (TIR) superior a la tasa referencial impuesto por el Banco Central del Ecuador (BCE), lo que permitirá obtener réditos económicos a la hacienda a mediano y largo plazo.

Descriptor: Biomasa, biodigestor, bioconversión, biogás, bioabono.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
UNIDAD DE POSGRADOS**

MAESTRÍA EN GESTIÓN DE ENERGÍAS

TÍTULO: Evaluation of residual biomass potential of bovine cattle in the Galpón ranch canton Salcedo province of Cotopaxi year 2013. Digester design alternative for this purpose.

Author: Santos Benavides, Willams Roberto.

Tutor: Retirado Mediaceja, Yoalbys. PhD.

ABSTRACT

At present investigation was carried out a theoretical and experimental study of the energy potential of residual biomass of cattle on the Galpón farm, in order to take advantage of biological waste in a bio-digester to obtain a renewable energy, which helps to reduce the greenhouse gases, like CH₄ issued into the atmosphere by the aerobic decomposition of animal excrement. The literature reviewed highlights the objectives achieved in different works in terms of the methodology used to characterize residual biomass of cattle and energy analysis, refers, reflecting technical-economics and environmental data useful for the proposal of a fixed dome bio-digester. Part of the experimental study of the anaerobic process of organic matter (manure), where the characterization of the: level of pH, is temperature of biodegradation, hydraulic retention time (THR), amount of particles of methane in the biogas and the bio-fertilizer nutrient; there procedures were carried out for evaluation and residual biomass of the cattle on the Galpón farm, with the purpose of obtaining two primary benefits: reducing the direct emanation of gas methane into the atmosphere and introduce a new type of renewable energy. The bio-conversion process was implemented in two bio-digester type "Batch" with and without thermal insulation, where is interfered with the technology of the monitoring and data acquisition in real time, allowing getting the actual data of the anaerobic process, basic parameters to determine the quality of production of biogas and bio-fertilizer to be used by the Galpón farm; and, through the experimental calorimetric method determined the calorific power of the biogas produced by the prototypes of bio-digesters type "Batch", applying a thermodynamic property. Finally, the financial evaluation confirmed the feasibility of implementing a fixed dome bio-digester, where is obtained a net present value (NPV) positive, for an internal rate of return (IRR) exceeding the reference rate imposed by the Central Bank of Ecuador (BCE), which will produce economic profits to finance medium and long term.

Keywords: Biomass, bio-digester, bioconversion, biogas, bio-fertilizer.

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Pág.
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI	i
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	ii
AVAL DEL DIRECTOR DE TESIS	iii
AUTORÍA.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA	vi
CERTIFICACIÓN DE CRÉDITOS QUE AVALAN LA TESIS	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	x
ÍNDICE GENERAL.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xix
ÍNDICE DE TABLAS	xxi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. DIFUSIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.1. Introducción	3
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.3. Formulación del problema	9
1.4. Objeto de estudio.....	9
1.5. Justificación.....	9
1.6. Objetivos	11
1.6.1. Objetivo general	12
1.6.2. Objetivos específicos.....	12

1.7. Hipótesis.....	12
1.8. Enfoque de la investigación científica	12
1.9. Conclusiones del capítulo	13
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	14
2.1. Introducción	14
2.2. Antecedentes	14
2.3. Fundamentación teórica	21
2.3.1. Concepto de biomasa	22
2.3.1.1. Biomasa residual agrícola	22
2.3.1.2. Biomasa residual agroindustrial.....	23
2.3.1.3. Biomasa residual ganadera.....	23
2.3.1.4. Potencial de excretas del ganado vacuno	23
2.3.2. Definición biogás	24
2.3.2.1. Volumen del biogás.....	25
2.3.2.2. Características del biogás	25
2.3.2.3. Adaptabilidad del biogás en la generación de energía eléctrica	26
2.3.3. Cantidad volumétrica de bioabono.....	28
2.3.3.1. Características del fertilizante orgánico	28
2.3.4. Caracterización de la materia prima y productos	29
2.3.4.1. Sólidos totales	29
2.3.4.2. Sólidos volátiles	29
2.3.4.3. Demanda química de oxígeno	30
2.3.4.4. Relación carbono – nitrógeno	30
2.3.5. Proceso de digestión anaerobia	31
2.3.6. Tecnología de utilización de biodigestores	32

2.3.6.1. Tipos de biodigestores.....	32
2.3.6.2. Parámetros de control en un biodigestor	36
2.3.7. Poder calórico del biogás	39
2.3.8. Ecuación de estado de los gases.....	40
2.3.9. Definición de densidad.....	41
2.3.10. Presión de la columna de agua	41
2.3.11. Calor específico de un cuerpo	41
2.4. Conclusiones del capítulo	42
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	43
3.1. Introducción	43
3.2. Diseño de la investigación	43
3.2.1. Modalidad de la investigación	43
3.2.1.1. De campo	44
3.2.1.2. Bibliográfica y documental	44
3.2.2. Tipos de investigación.....	44
3.2.2.1. Investigación exploratoria.....	44
3.2.2.2. Investigación descriptiva.....	45
3.2.2.3. Investigación experimental	45
3.3. Operacionalización de variables	46
3.4. Lugar de la investigación	47
3.4.1. Área de influencia directa	47
3.5. Metodología	47
3.6. Levantamiento de la línea base de los recursos energéticos.	48
3.6.1. Obtención del consumo anual de electricidad.....	48
3.6.2. Cantidad de consumo por año del gas licuado de petróleo	48

3.6.3. Biomasa vegetal utilizada anualmente	49
3.6.4. Consumo anual de fertilizantes químicos	49
3.7. Determinación de la carga diaria del estiércol en la hacienda Galpón	50
3.8. Muestreo y caracterización de la materia prima	51
3.8.1. Metodología para el muestreo	51
3.8.2. Metodología para la caracterización del estiércol	51
3.8.3. Evaluación en in-situ de la materia prima.....	51
3.8.3.1. Determinación del potencial de hidrógeno y temperatura	51
3.9. Selección del modelo del biodigestor	52
3.9.1. Matriz de decisión	52
3.9.2. Definición de términos considerados en la matriz de decisiones.....	52
3.10. Cálculos y dimensionamiento del biodigestor de domo fijo.....	53
3.11. Obtención del biogás mediante reactores prototipos	54
3.12. Construcción de los reactores tipo “Batch”	54
3.12.1. Método y materiales utilizados en la construcción de los reactores	54
3.13. Ejecución del ensayo con los biodigestores tipo “Batch”.....	55
3.13.1. Ensayo 1: biodigestor tipo Batch sin aislamiento térmico	56
3.13.1.1. Materiales	56
3.13.1.2. Procedimiento	57
3.13.1.3. Equipos e instrumentos	57
3.13.2. Ensayo 2: biodigestor tipo “Batch” con aislamiento térmico	59
3.13.2.1. Materiales.....	59
3.13.2.2. Equipo e instrumentos.....	60
3.14. Análisis físico del biogás	64
3.14.1. Determinación de la cantidad de partículas de metano	65
3.14.2. Análisis comparativo de una propiedad termodinámica	65

3.15. Conclusiones del capítulo	67
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	68
4.1. Introducción	68
4.2. Análisis de los recursos energéticos utilizados por la hacienda Galpón	68
4.2.1. Consumo de energía eléctrica	68
4.2.2. Análisis del consumo anual de gas licuado de petróleo	69
4.2.3. Análisis del consumo anual de leña	70
4.2.4. Análisis del consumo anual de abonos químicos	71
4.2.5. Consumo de portadores energéticos en la hacienda Galpón	71
4.2.6. Análisis económico de los portadores energéticos.....	72
4.3. Cantidad de biomasa residual del ganado vacuno de la hacienda Galpón	72
4.4. Determinación de la potencialidad en la biomasa del ganado vacuno	73
4.4.1. Cuantificación de la biomasa utilizada para los biodigestores.....	74
4.4.2. Análisis de los parámetros que intervienen en el proceso anaeróbico	75
4.4.2.1. Análisis de la temperatura en los biodigestores	75
4.4.2.2. Control de pH en los biodigestores	76
4.4.2.3. Producción de biogás	78
4.4.3. Determinación de la cantidad de partículas de metano en el biogás.....	79
4.4.4. Análisis de datos para el muestreo experimental aplicando Taguchi	80
4.4.5. Cálculo de la masa molecular del biogás	83
4.4.5.1. Rendimiento del estiércol del ganado vacuno.....	84
4.4.6. Determinación del poder calórico del biogás mediante el análisis comparativo con el gas de uso doméstico	85
4.4.6.1. Comparación de las masas del butano y el biogás	85
4.4.6.2. Determinación del calor desprendido por el gas licuado de petróleo	86

4.4.6.3. Determinación del calor desprendido por el biogás	88
4.5. Selección del modelo de biodigestor.....	90
4.5.1. Evaluación del biodigestor modelo hindú o campana flotante	90
4.5.2. Evaluación del biodigestor tipo bolsa	91
4.5.3. Evaluación del biodigestor de domo fijo	92
4.6. Estimación de la energía del biogás	92
4.6.1. Cálculo de portadores energéticos que consume y necesita la hacienda representados en metros cúbicos de biogás.....	92
4.6.1.1. Energía eléctrica representada en metros cúbicos de biogás	93
4.6.1.2. Cantidad de gas de uso doméstico representada en metros cúbicos de biogás	93
4.6.1.3. El uso de la leña representada en metros cúbicos de biogás.....	93
4.6.1.4. Cantidad de energía total.....	93
4.7. Dimensionamiento del biodigestor de domo fijo	94
4.7.1. Cantidad de estiércol requerido.....	94
4.7.2. Cantidad de mezcla para alimentar al biodigestor	95
4.7.3. Producción de bioabono.....	96
4.7.4. Cantidad de nutrientes obtenidos del bioabono	96
4.8. Determinación de los parámetros del biodigestor	97
4.8.1. Volumen de la cámara del biodigestor.....	97
4.8.2. Diámetro del biodigestor.....	98
4.8.3. Altura del biodigestor.....	99
4.8.4. Cálculos de la curvatura de la cúpula.....	99
4.8.4.1. Cúpula superior	99
4.8.4.2. Radio del biodigestor	99
4.8.4.3. Radio de la curvatura de la esfera superior	100

4.8.4.4. Volumen de la cúpula.....	100
4.8.4.5. Volumen del cilindro.....	100
4.8.4.6. Volumen final del biodigestor.....	101
4.8.5. Cálculo de la superficie estructural.....	101
4.8.6. Cálculo del volumen del tanque de mezcla.....	102
4.8.7. Cálculo de la capacidad del tanque de descarga.....	102
4.9. Emisiones de gases de efecto invernadero.....	103
4.10. Comprobación de la hipótesis.....	104
4.11. Conclusiones del capítulo.....	106
CAPÍTULO 5. LA PROPUESTA.....	108
5.1. Introducción.....	108
5.2. Título de la propuesta.....	108
5.3. Justificación de la propuesta.....	108
5.4. Objetivo de la propuesta.....	109
5.5. Estructura de la propuesta.....	109
5.5.1. Partes constitutivas del biodigestor.....	109
5.5.2. Operación y mantenimiento básico preventivo del biodigestor.....	111
5.5.3. Análisis económico.....	112
5.5.3.1. Costos de materiales para la construcción del biodigestor.....	112
5.5.3.2. Costos de soporte técnico y mano de obra.....	113
5.5.3.3. Costo total del biodigestor domo fijo para la hacienda Galpón.....	114
5.5.3.4. Ahorro anual del gas licuado de petróleo y los abonos químicos con la implementación del biodigestor de domo fijo.....	114
5.5.4. Evaluación financiera.....	115
5.5.4.1. Criterio del valor actual neto.....	115

5.5.4.2. Tasa interna de retorno	116
5.6. Análisis socio-económico	117
5.7. Valoración ambiental	118
5.8. Conclusiones del capítulo	119
CONCLUSIONES	120
RECOMENDACIONES	121
BIBLIOGRAFÍA REFERENCIADA	122
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	126
ANEXOS	128

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1.

Figura 1.1. Representación numérica del ganado vacuno región Sierra.	6
---	---

CAPÍTULO 2.

Figura 2.1. Biodigestor estacionario o de laboratorio.	32
Figura 2.2. Biodigestor de cúpula fija.	33
Figura 2.3. Biodigestor con campana flotante fija.	34
Figura 2.4. Biodigestor horizontal o tipo salchicha.	34
Figura 2.5. Biodigestor con campana flotante movable.	35
Figura 2.6. Biodigestor con campana flotante movable separada.	35
Figura 2.7. Esquema del método experimental.	39

CAPÍTULO 3.

Figura 3.1. Vista frontal de la hacienda Galpón.	47
Figura 3.2. Registro del contador de energía.	48
Figura 3.3. Control del consumo de GLP.	49
Figura 3.4. Biomasa vegetal utilizada como leña.	49
Figura 3.5. Abonos químicos para aplicar a los cultivos.	50
Figura 3.6. Biodigestor tipo batch utilizado en el experimento.	55
Figura 3.7. Gasómetro utilizado para el experimento.	55
Figura 3.8. Biodigestor sin aislamiento térmico.	57
Figura 3.9. Instrumento HANNA HI 9813-6N.	57
Figura 3.10. Termómetro tipo carátula.	58
Figura 3.11. Manómetro analógico.	58
Figura 3.12. Sensor de metano SAW-MQ2.	58
Figura 3.13. Biodigestor con aislamiento térmico y monitoreo.	59
Figura 3.14. Pantalla del software SAW BIOGÁS.	60
Figura 3.15. Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos.	60
Figura 3.16. a) Termopar tipo “k” colocado en el biodigestor, b) Visualización de la medida de temperatura en la pantalla del PC.	61

Figura 3.17. a) Biodigestor con termopar tipo “K”, b) Simulación del termopar en la pantalla del PC.	62
Figura 3.18. a) Cintas de tornasol, b) Instrumento HANNA H9813-6N.	63
Figura 3.19. Gasómetro para almacenamiento de biogás.	63
Figura 3.20. Manómetro y sensor de presión colocado en el reactor.	64

CAPÍTULO 4.

Figura 4.1. Consumo por mes de la energía eléctrica del contador N° 75865.	69
Figura 4.2. Consumo por mes de los cilindros 45 kg de GLP.	69
Figura 4.3. Cantidad de leña utilizada por cada mes.	70
Figura 4.4. Consumo de urea por cada ciclo de fertilización.	71
Figura 4.5. Consumo de portadores energéticos en la hacienda Galpón.	72
Figura 4.6. Costos de portadores energéticos utilizados por la hacienda Galpón.	72
Figura 4.7. Porcentajes representativos de la biomasa por tipo de animal.	73
Figura 4.8. Curva representativa de los porcentajes del reactor.	74
Figura 4.9. Temperatura del biodigestor 1 vs. temperatura de retención.	75
Figura 4.10. Temperatura del biodigestor 2 vs. temperatura de retención.	76
Figura 4.11. El pH del biodigestor 1 vs. tiempo de retención.	77
Figura 4.12. El pH del biodigestor 2 vs. tiempo de retención.	77
Figura 4.13. Volumen de biogás por el tiempo de retención biodigestor 1.	78
Figura 4.14. Volumen de biogás por el tiempo de retención biodigestor 2.	79
Figura 4.15. Porcentaje de metano por el tiempo de retención del biodigestor 1.	80
Figura 4.16. Porcentaje de metano por el tiempo de retención del biodigestor 2.	80
Figura 4.17. Análisis de medias para Taguchi.	82
Figura 4.18. Análisis de desviación estándar para Taguchi.	83
Figura 4.19. Temperatura del agua vs. volumen de GLP quemado.	87
Figura 4.20. Temperatura del agua vs. volumen de biogás quemado.	89

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2.

Tabla 2.1. Cantidad de estiércol por tamaño y especie animal.	24
Tabla 2.2. Composición promedio del biogás.....	25
Tabla 2.3. Composición del biogás derivado de diversas fuentes.....	26
Tabla 2.4. Propiedades del biogás.....	26
Tabla 2.5. Implementación de 1 m ³ de biogás y su duración.....	27

CAPÍTULO 3.

Tabla 3.1. Operacionalización de la variable independiente y dependiente.	46
--	----

CAPÍTULO 4.

Tabla 4.1. Rangos para las variables descriptivas.....	81
Tabla 4.2. Diseño experimental Taguchi.	81
Tabla 4.3. Diseño experimental definiendo valores.....	82
Tabla 4.4. Matriz de preselección del diseño modelo de campana flotante.....	91
Tabla 4.5. Matriz de preselección del diseño modelo biorreactor de tipo bolsa... 91	
Tabla 4.6. Matriz de preselección del diseño modelo de domo fijo o chino.....	92
Tabla 4.7. Datos básicos para diseños de biodigestores en base a 1 kg de EF.	94
Tabla 4.8. Elementos en el estiércol fresco biodigerido.	96
Tabla 4.9. Parámetros físicos del biodigestor de domo fijo.....	103
Tabla 4.10. Disminución en la emisión de CO ₂ por el uso de biogás producido por un BDF de 8 m ³ como alternativa a la combustión de GLP.	104

CAPÍTULO 5.

Tabla 5.1. Portadores energéticos disponibles y su demanda.	110
Tabla 5.2. Costos de materiales para la construcción del biodigestor domo fijo. 113	
Tabla 5.3. Costo de soporte técnico e instalación sistema de biogás.....	113
Tabla 5.4. Ahorro de GLP y abono químico con el biodigestor domo fijo.....	115
Tabla 5.5. Análisis del VAN para el biodigestor con aislamiento térmico.....	116
Tabla 5.6. Cálculo de la TIR del biodigestor de domo fijo.....	117

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como propósito determinar la potencialidad de la biomasa residual del ganado vacuno en la hacienda Galpón del cantón Salcedo, la misma que está provocando contaminación al medio ambiente y afectando a la salud de los habitantes, para lo cual se propone implementar un biodigestor alternativo que transforme efectivamente las excretas del ganado vacuno en otra forma de energía, mediante el método de bioconversión. De esta manera se puede minimizar el impacto ambiental, así como los focos de infección que están provocando enfermedades a sus habitantes. A continuación se detalla la estructura de la tesis, que se encuentra organizada por capítulos de la siguiente forma:

En el Capítulo 1, 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, su campo de acción y su hipótesis.

En el Capítulo 2, 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 vacuno.

En el Capítulo 3, se expone la metodología de estudio 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 4, 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 5, se plantea la propuesta de: implementar un prototipo de biodigestor alternativo que aproveche efectivamente las excretas del ganado vacuno para generar energía renovable limpia a bajo costo, ayudando a mitigar el efecto invernadero y las enfermedades; así como también, su buen uso y cuidado que contribuirá enormemente a tener una energía inagotable que genere buenos réditos económicos para la hacienda y sus habitantes. Finalmente se detallarán las conclusiones y recomendaciones que se generarán a partir de los objetivos específicos.

CAPÍTULO 1. DIFUSIÓN DEL PROBLEMA

1.1. Introducción

La definición de los aspectos teórico-metodológicos que integran la metodología de la investigación es muy importante para el adecuado desarrollo de trabajos científicos. Lo anterior permite estructurar adecuadamente el proceso de investigación y obtener resultados acordes a las metas propuestas. Es por ello que el **objetivo** del presente capítulo es establecer los referidos aspectos y sus particularidades para el objeto de estudio.

1.2. Planteamiento del problema

Sogari (2006) manifiesta 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.

Cerda (2009) plantea 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).

Según Saldarreaga (2012) el metano (CH_4) 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 CH_4 tiene gran efecto por un período corto de 10 años, mientras que el CO_2 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.

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 CO_2 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.

Johnson (1995) y Kurihara (1999) señalan que las emisiones de gas metano generadas por el ganado vacuno se estiman en 58 millones de toneladas/año (datos globales), lo que representa el 73 % del total de emisiones (80 millones) de todas la especies domésticas.

Kurihara (1999) considera que se debe tomar como base para análisis, en los países en vías de desarrollo, que las emisiones tienen un registro de 55 kg de gas

metano/anual por ganado vacuno, en contraste a lo reportado en los países desarrollados de 35 kg de gas metano/anual por ganado vacuno. Esta diferencia de emisiones de gas metano por animal se debe a la calidad de alimentación que reciben los bovinos.

El gas metano a nivel mundial no puede ser controlado en su totalidad, teniendo en cuenta que existen varias fuentes de origen natural como: las de combustibles fósiles, de residuos sólidos y los producidos por la agricultura. En este sentido Johnson (1995) estima que sólo en la agricultura se generan 155 millones de toneladas por año de gas metano, distribuyéndose en: el cultivo de arroz 38 %, animales domésticos 51 %, abonos orgánicos 6 % y combustión 6 %.

Algunos países pobres obtienen el 90 % de su energía de la leña y otros biocombustibles. En África, Asia y Latinoamérica representan la tercera parte del consumo energético, y para 2 000 millones de personas es la principal fuente de energía en el ámbito doméstico. Pero, en muchas ocasiones, esta utilización masiva no se realiza mediante el uso racional y sostenible de los recursos naturales, sino como una búsqueda desesperada de la energía, lo que ha provocado la deforestación de grandes áreas, dejando indefenso al suelo frente a la erosión (Fernández, 2008).

La propia FAO reconoce que “al utilizar eficientemente los recursos de la energía de la biomasa incluidos los residuos agrícolas y las plantaciones de materiales energéticos ofrecen oportunidades de empleo, beneficios ambientales y una mejor infraestructura rural”. Incluso va más allá, al considerar que el uso eficiente de estas fuentes de energía ayudarían a alcanzar dos de los objetivos de desarrollo del milenio: “erradicar la pobreza, el hambre y garantizar la sostenibilidad del medio ambiente”. Mientras esta apuesta se hace realidad, las previsiones concretas de futuro las enmarcan en el desarrollo de los países pobres, ante lo cual, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, estableció que antes del año 2100 la cuota de participación de la biomasa en la producción mundial de energía debe estar entre el 25 % y el 46 %. Sin embargo en Europa, el 54 % de la energía primaria de origen renovable procede de esta fuente, pero su utilización sólo supone el 4 % sobre el total energético (Rico, 2007).

La FAO estima que 2 000 millones de personas carecen de energía eléctrica y cocinan con leña (biomasa vegetal); de ellas 1 500 millones tienen en alguna medida dificultades de suministro, y 125 millones se nutren de alimentos crudos por carecer de leña para su cocción (Rodríguez, 2008).

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

Según las estadísticas realizadas por el Ministerio de Agricultura y Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) en el año 2006, la población del ganado vacuno en el territorio nacional está distribuido por regiones, teniendo así en: la Región Costa 51 %, Región Sierra 36 % y resto del país 13 % (Galápagos, Amazónica, zonas en conflicto). En la sierra ecuatoriana, Cotopaxi ocupa el sexto lugar en el sector ganadero de acuerdo a la estadística del MAGAP. En la figura 1.1 se representa en forma de pastel la cantidad de animales por miles de bovinos.

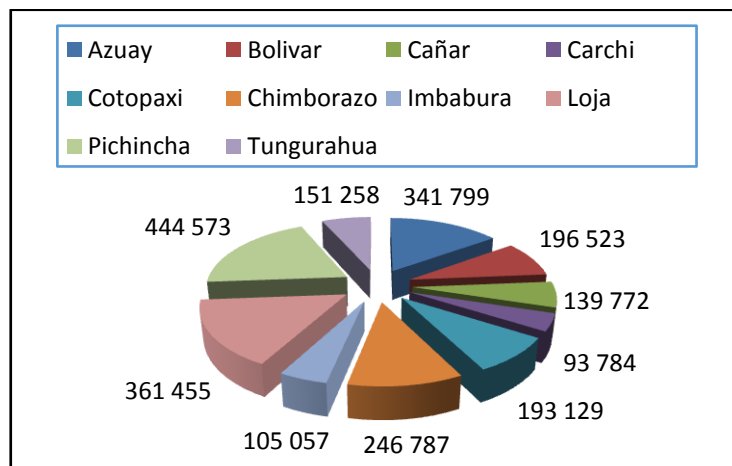


Figura 1.1. Representación numérica del ganado vacuno región Sierra.
Fuente: MAGAP, 2006.

Con el censo realizado en la Sierra ecuatoriana (Figura 1.1), en la provincia de Cotopaxi existen alrededor de 193 129 bovinos registrados, corroborando que la provincia es por excelencia ganadera, y al aprovechar todo el potencial energético que generaría este sector se tendría una energía equivalente a 28 408 tep/año, pudiendo obtener 71 341 MWh al año de energía eléctrica a través de la biomasa residual del ganado vacuno (López, 2008).

En las zonas rurales de Salcedo, especialmente en la hacienda Galpón y sus alrededores se dedican a la cría intensiva del ganado vacuno de doble propósito, donde se generan grandes cantidades de excretas, estas 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 hacienda Galpón es una empresa productora de leche desde sus inicios en 1988, el principal objetivo ha sido mantener la producción de leche y quesos de la mejor calidad, con miras al crecimiento continuo. La hacienda está ubicada a 15 km de Salcedo en la Provincia de Cotopaxi, la misma que se encuentra en una región de clima variable con temperaturas que oscilan entre los 8 y 22°C, dependiendo de la estación del año. 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 hacienda.

La hacienda cuenta con 12 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 7 767 kWh, térmica 1 350 kg de GLP, 180 kg leña y 1 000 kg de abono químico respectivamente. Como propiedad existen 190 cabezas de ganado vacuno, 15 caballos y 35 hectáreas de terreno de las cuales 20 son dedicadas a la ganadería y 15 son aplicadas a la agricultura.

Actualmente el suministro de servicio eléctrico y de los cilindros de gas en la hacienda y sus alrededores son obtenidos de forma irregular debido a la situación geográfica del lugar; una de las razones principales es la lejanía de los centros de acopio de GLP y las grandes distancias que recorre la red eléctrica de media tensión hasta los puntos de entrega, es así como se abastece la demanda requerida por el establecimiento. Estas dos fuentes de energía convencionales son utilizadas para la fábrica de quesos, el área de ordeño y para el uso doméstico de las propias instalaciones.

En los últimos años el GLP ha escaseado notablemente en los sectores rurales del cantón Salcedo, afectando directamente a las actividades de la hacienda Galpón. Un artículo publicado menciona que la principal razón del desabastecimiento de gas licuado de petróleo es por el contrabando que existe en las fronteras ecuatorianas; pues la diferencia del precio del gas en relación con otros países hace que esta actividad sea un negocio muy rentable. Mientras que en el Ecuador el cilindro de gas de 15 kg cuesta 1,60 USD (precio subsidiado por el Estado ecuatoriano), en Colombia su valor se cuadruplica en 7,65 USD y en la república del Perú su valor asciende a 15,30 USD (Vergara, 2008).

En la hacienda Galpón, el GLP es utilizado para calentar el agua que será utilizada en la limpieza de los equipos de ordeño, los instrumentos de la quesería y la cocción de alimentos de la familia y los trabajadores. Los altos costos de los fertilizantes químicos y los consumos energéticos, han provocado que la hacienda 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 vacuno, están provocando el deterioro del medio ambiente donde se desarrollan las actividades cotidianas de la hacienda 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 vacuno que se produce en la hacienda, es en base a la caracterización de los desechos biológicos de los bovinos, 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 hacienda, 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 vacuno en un biodigestor se pueden obtener tres beneficios muy importantes: el primero mediante la obtención del biogás que serviría como energía térmica para los procesos de la hacienda y las necesidades de los trabajadores etc., el segundo es

utilizar el bioabono para fertilizar los cultivos propios de la hacienda y el tercero es reducir la contaminación ambiental del lugar que es provocada por los desechos orgánicos del ganado vacuno.

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 (Lorena, 2012).

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.

1.3. Formulación del problema

Se desconoce el potencial de biomasa residual aportada por el ganado vacuno para la obtención del biogás y bioabono, aplicando la tecnología de un biodigestor alternativo en la hacienda Galpón del cantón Salcedo, durante el año 2013.

1.4. Objeto de estudio

Biomasa residual del ganado vacuno en la hacienda Galpón del cantón Salcedo.

1.5. Justificación

El uso energético más difundido de la biomasa en los hogares es para la cocción de alimentos en el sector rural, seguido por el calentamiento de agua. Cabe destacar que a pesar de la alta tasa de penetración de portadores energéticos como el GLP, una gran proporción de hogares (más del 77 y 11 % en el área rural y urbana, respectivamente) continúan empleando la leña y otras formas de biomasa como fuente de energía (Cerdeña, 2009).

Según Chiriboga (2010) la demanda energética ha crecido muy significativamente en nuestro país, concentrándose las mismas en las grandes ciudades del territorio ecuatoriano, obligando a racionar el suministro de energía en el sector rural, lo que ha provocado retraso en las actividades de la hacienda y pérdidas económicas por la falta de energía.

El consumo de GLP en el Ecuador se incrementa aceleradamente a una tasa de crecimiento promedio anual del 6 %. Desde 1990 al 2006, el consumo promedio se incrementó de 0,91 a 2,04 cilindros mensuales por familia. Al ser un país deficitario en GLP, y para satisfacer dicha demanda, el Estado está obligado a importar más del 80 % del total que se consume en el país, pues la producción nacional es insuficiente y se incrementa a un ritmo de apenas 0,8 %, mientras que las importaciones de este combustible crecen al 9 %, lo que provoca un incremento del subsidio y altos egresos fiscales al Estado (Vergara, 2008).

En la presente investigación se pretenden utilizar los residuos de los bovinos dentro de un biodigestor alternativo, con el fin de conseguir recursos energéticos alternativos que logren reemplazar a la energía convencional. Al aprovechar esa biomasa bovina se pueden obtener el bioabono así como también el biogás; al utilizar el segundo beneficio derivado del biodigestor, Rodríguez (2008) plantea que se puede producir electricidad mediante los motores de combustión interna y de esta manera conseguir instalaciones que sean autosustentables, aprovechando sus propios recursos residuales (como por ejemplo: en granjas, haciendas, industria alimenticia, serrerías, industrias papeleras o depuradoras urbanas), que generan un beneficio adicional, a veces hasta más valorado que la propia generación de electricidad, que es el evitar la degradación del medio ambiente al eliminar estos residuos que están contaminado al planeta.

Hans-Josef (2002) establece que en los países industrializados, el abastecimiento de energía constituye un gran desafío. La energía es imprescindible para el funcionamiento de la economía y el bien común. Por ello, la política energética se debe basar en tres pilares fundamentales; seguridad de abastecimiento, compatibilidad con el medio ambiente y rentabilidad.

Una publicación del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable señala que para elaborar un biodigestor comunitario, las dimensiones del recipiente tipo salchicha pueden ser de 10 metros de largo y un metro de diámetro. Este tipo de biodigestor sirve para proporcionar biogás a una familia de cinco personas. Se requiere el estiércol de cinco reses o diez cerdos. Su elaboración cuesta alrededor de 150,00 USD (Pérez, 2008).

Al aplicar esta nueva tecnología de los biodigestores en la hacienda se estará contribuyendo notablemente con el medio ambiente, pues se dejará de emitir gas metano a la atmósfera en un estimado de 55 kg de metano por cada animal que tiene la hacienda (Kurihara, 1999).

Las excretas residuales del ganado vacuno al no poder utilizarse directamente sobre los cultivos tienen un costo de oportunidad, pero al implementar la nueva tecnología de los biodigestores, ésta quedaría invalidada porque se puede tener un producto de mejor calidad que ayude a reactivar los suelos y obtener excelentes resultados en las cosechas (Hilbert, 2008).

En la explotación del ganado vacuno se generan grandes cantidades de residuos sólidos y líquidos, al descomponerse al aire libre sin ningún tratamiento y disposición final, estas crean grandes problemas de contaminación en la hacienda y sus alrededores, además afectando la salud de los habitantes.

Por las razones anotadas, la presente investigación, será de gran utilidad para el normal funcionamiento de la hacienda Galpón, al brindar un tratamiento adecuado de los desechos sólidos del ganado vacuno mediante el proceso de biodigestión, contribuyendo a obtener una fuente de energía limpia y renovable a través del biogás; así como también, se puede aprovechar el efluente que tiene excelentes propiedades nutritivas para los cultivos.

1.6. Objetivos

Los ítems que se mencionaran en este párrafo para el desarrollo del presente proyecto serán el objetivo general y los específicos.

1.6.1. Objetivo general

Evaluar el potencial de aprovechamiento energético de la biomasa residual del ganado vacuno para obtener los parámetros de diseño tecnológico de un biodigestor alternativo que permitan la producción de biogás en la hacienda Galpón del cantón Salcedo provincia de Cotopaxi, durante el año 2013.

1.6.2. Objetivos específicos

- Analizar las referencias bibliográficas relacionadas con el proceso anaeróbico de la biomasa residual del ganado vacuno aplicando la tecnología del biodigestor.
- Determinar la potencialidad de biomasa residual del ganado vacuno en la hacienda Galpón del cantón Salcedo.
- Seleccionar y determinar los parámetros de diseño de un biodigestor en correspondencia con la demanda y la potencialidad de biomasa residual del ganado vacuno en la hacienda Galpón del cantón Salcedo.
- Determinar los volúmenes de biogás y biofertilizante producido en el biodigestor.
- Caracterizar energéticamente el biogás obtenido.
- Realizar un análisis técnico-económico del biodigestor.

1.7. Hipótesis

La caracterización de la biomasa residual del ganado vacuno de la hacienda Galpón 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 del gas metano a la atmósfera.

1.8. Enfoque de la investigación científica

La investigación está enfocada en evaluar la potencialidad de aprovechamiento de la biomasa residual derivada del ganado vacuno, 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 y fertilizantes químicos utilizados en la hacienda Galpón del cantón Salcedo.

1.9. Conclusiones del capítulo

- ✓ Se establecieron los aspectos teórico-metodológicos que integran la metodología de la investigación científica. Los mismos consideran los aspectos más relevantes a tratarse en el análisis del objeto de estudio y posibilitan la estructuración adecuada del proceso de investigación.

- ✓ Las últimas estadísticas ofrecidas por el Ministerio de Agricultura y Ganadería, Acuacultura y Pesca evidenciaron que la población del ganado en el Ecuador está distribuida en un 51; 36 y 13 % para la costa, la sierra y el resto del país, respectivamente. Por otra parte, se comprobó que la hacienda Galpón cuenta con las condiciones climatológicas y la materia prima necesaria para la implementación de un biodigestor.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción

El marco teórico constituye el estudio y la sistematización de las teorías precedentes que pueden ayudar en el análisis del problema investigado. Su elaboración se realiza mediante conceptos, magnitudes, variables, leyes y modelos que existen en la ciencia; y que se sistematizan con la finalidad de determinar en qué medida estos contribuyen a la solución del problema analizado y en qué medida son insuficientes. El **objetivo** del capítulo es elaborar el marco teórico que sustenta la presente investigación.

2.2. Antecedentes

Se estima que en el mundo se emiten anualmente 6 400 millones de toneladas de metano, un 15 % de las emisiones globales de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Este gas con alto potencial de calentamiento global, se podría aprovechar para garantizar los servicios energéticos sostenibles y combatir el cambio climático en el planeta (Arristía, 2009).

De acuerdo a Carrillo (2003) los animales de granja emiten metano de dos formas diferentes: la primera causa se conoce como fermentación entérica, ocurre en el estómago de los animales rumiantes (vacas, ovejas, equinos y cabras) que durante su proceso natural de digestión crean grandes cantidades de metano.

La segunda forma es por la descomposición del estiércol cuando: vacas, cerdos y gallinas son criados con fines comerciales y existen obviamente grandes cantidades de estiércol que se generan a diario, por lo tanto, las granjas deben tener equipos apropiados para el tratamiento de estos desechos orgánicos. La manera más fácil de procesar el excremento es en piscinas cerradas o tanques.

Esta materia orgánica se descompone dentro de estos depósitos que permanecen cerrados y sin la presencia de oxígeno. Por lo tanto al provocar la biodegradación de la biomasa residual dentro del recipiente se producirán grandes cantidades de metano (EPA, 2008).

Cerca del 60 % de las emisiones de gas metano emanadas a la atmósfera son originadas por el ser humano, a través de la cría de animales domésticos, los cultivos de arroz, los vertederos y la quema de biomasa (Rodríguez, 2008).

Varias fuentes bibliográficas dan cuenta del uso de biogás para calentar el agua para el aseo personal en el siglo X a.c. en Asiria y en el siglo XVI d.c. en Persia. La primera unidad de digestión anaeróbica que era utilizado para el tratamiento de aguas residuales fue construida en el Asilo de Leprosos de Mantunga, cerca de Mumbai, India, en 1859 (Arristía, 2009).

Se llama biogás al gas que se produce mediante un proceso metabólico por descomposición de la materia orgánica en ausencia del oxígeno del aire. Este biogás es combustible, tiene un alto valor calórico de 4 700 a 5 500 kcal/m³ y puede ser utilizado en la cocción de alimentos, para la iluminación de naves y viviendas, así como para suministrar gas a los motores de combustión interna que accionan: máquinas herramientas, molinos de granos, generadores eléctricos, bombas de agua y vehículos agrícolas o de cualquier otro tipo (Rodríguez, 2006).

La generación natural de biogás es una parte importante del ciclo biogeoquímico del carbono. El metano producido por las bacterias es el último eslabón en una cadena de microorganismos que degradan el material orgánico y devuelven los productos de la descomposición al ambiente (Hernández, 1990; Borroto, 1999; Germán, 2002).

El biogás, con alto contenido de metano, puede ser aprovechado para la generación de energía eléctrica y térmica (Fernández, 2010), además se puede utilizar como gas de refrigeración, para la iluminación, la cocción de alimentos y el funcionamiento de los motores de combustión interna de los medios de transporte (automotores). La mayor parte del biogás es metano, un Gas de Efecto Invernadero que permanece en la atmósfera entre 9 y 15 años. Jan Baptist Van Helmont determinó en el siglo XVII, que de la materia orgánica en

descomposición emanan gases inflamables. Alejandro Volta concluyó en 1776 que había una correlación directa entre la cantidad de material orgánico en descomposición, y la cantidad de gas inflamable producido. En 1808, Sir Humphrey Davy determinó la presencia del metano en los gases producidos durante la digestión anaeróbica del estiércol del ganado.

En el año 1890, en la India, se construye el primer biodigestor de uso doméstico y a su vez en 1896 en Exeter, Inglaterra, las lámparas de alumbrado público eran alimentadas por el gas recolectado de los digestores que fermentaban los lodos cloacales de la ciudad (Lugones, 2000).

En 1895 se diseñó una instalación para recuperar el biogás producido en el tratamiento de aguas residuales, y se empleó como fuente de energía para el alumbrado público en Exeter, Inglaterra (Hilbert, 2008).

El consumo mundial de la energía es muy desigual entre países y bloques económicos, el 90 % de esta energía la consumen los países más industrializados (un 30 % de la población mundial), las diversas fuentes bibliográficas aportaron que en 1984: el consumo de petróleo fue 39,5 %, el gas natural un 19 %, el carbón común 31,1 %, la energía nuclear 3,7 % y finalmente la energía hidroeléctrica el 6,3 %.

Durante las dos guerras mundiales hubo interés por el biogás. La crisis energética de 1973 hizo renacer estas motivaciones como una energía alternativa, aunque decayó después, debido a la pérdida de confianza en la tecnología, producto de fallas que existió en la construcción, captación y utilización (Hilbert, 2008).

Los países que conforman la Comunidad Económica Europea (C.E.E), tenían una dependencia energética del petróleo del 46 % en 1986, con un plan energético para reducir al 40 % en 1990; mientras la energía nuclear representaba un aporte a la producción eléctrica del 21 % en 1983, ascendió al 30,7 % con la comunidad europea. Sac (2002) sugiere el uso de energías renovables, como la biomasa que es un recurso renovable cuya utilización presenta características singulares y beneficios notables. Además, se trata de una fuente prácticamente inagotable, producida cíclica y continuamente por el reino vegetal y animal, así como también se genera dentro del sistema urbano e industrial.

Sebastián y Royo (2002) plantean que la ciencia y la tecnología se han vuelto determinantes en el desarrollo económico y cultural de las sociedades actuales, y de ellas depende en forma creciente el bienestar de un país y de sus ciudadanos.

La biodigestión es una alternativa para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos, en la que se combinan procesos aeróbicos (que funcionan con oxígeno) y anaeróbicos (sin la presencia de oxígeno), donde obtienen productos como abono agrícola (compost) y gas (biológico), que puede ser utilizado (60 % CH₄, 40 % CO₂) como combustible (Soubes, 1994).

Los alimentos y otros residuos orgánicos (estiércol, madera, hojas, vegetales) pueden ser transformados a través de procesos bioquímicos (Bernal, 1992), dando como resultado estos productos que son de alto valor energético y económico. Estos sistemas permiten su aplicación en ciudades pequeñas e intermedias del país, y que además, su utilización a gran escala permite convertirlas en un excelente modelo de apropiación de tecnología y una importante fuente de empleo para las industrias y las microempresas de la región.

Dentro de las utilidades que hasta el momento se han dado al biogás están: la producción de electricidad; el funcionamiento de motores (combustible para vehículos), donde pueden utilizar sólo o mezclado con fuel oíl, producción de energía mecánica para el funcionamiento rural de fábricas de procesos agrarios; funcionamiento de refrigeradores y para la incineración en las estufas de las cocinas a gas (Camacho, 1987).

Matamorros (2013) analiza a los grandes países industrializados del mundo que utilizan energía renovable (biogás) proveniente de la biomasa residual entre ellos se destacan: Alemania, líder en la producción de biogás que produce el 53,41 % de la energía eléctrica proveniente del biogás en la Unión Europea (UE), tiene una producción al alrededor de 51,5 tep/1000 habitantes, el doble de Reino Unido que es el segundo, en el año 2011 se registraron 7 470 plantas de biogás, siendo los estados de Babaria y Baja Sajonia los más importantes. El precio de la energía generado por este tipo de combustible es de € 0,03 a 0,143 kWh y la meta para el 2020 es cubrir el 6 % de la demanda de gas natural con biogás.

Reino Unido, es el segundo productor de biogás. El 84 % corresponde a recuperación de metano a partir de rellenos sanitarios, siendo acreedor a grandes incentivos con el sistema de certificados verdes de Gran Bretaña (ROCs). Produce en total 1 772,2 ktep a partir de la energía del biogás, según datos del año 2010.

Italia, es el tercer país industrializado productor de biogás. La ley energética de este país implantó un fuerte incentivo en el 2009 con la sanción de una ley para Primas en las tarifas para las plantas que utilicen materias primas agrícolas, se paga por esta energía € 0,28/kWh para potencias menores a 1 MW instalado, siendo esta las Primas más altas de Europa. En el año 2010 se tenía en total 450 plantas productoras de biogás con una capacidad instalada de 478,5 ktep, con lo que obtuvieron rubros de facturación de € 900 millones por la venta de esta energía renovable. Además se generaron 2 600 puestos de trabajo para los italianos.

Matamorros (2013) refiere que en los años '80 se implementó en el Perú el biodigestor modelo Hindú y Chino, pero el proyecto fracasó debido a la falta de conocimientos técnicos y mano de obra calificada, ya que era una tecnología prematura que se estaba implementando en dicho país.

El biodigestor Modelo Taiwán se implementó en la década de los '90, donde se obtuvieron excelentes resultados en México, Costa Rica, Perú, Bolivia, Colombia y Nicaragua en la última década.

El 60 % de los campesinos peruanos que habitan en las zonas rurales viven en condiciones de pobreza e indigencia, con el uso de biodigestores se puede combatir la pobreza, disminuyendo el gasto en la compra de combustibles, abonos orgánicos y alimentos. Contribuyendo a un ambiente sanitario de las familias, y así evitando la emanación de metano a la atmósfera que provoca el calentamiento global del planeta. Encuestas realizadas a estos campesinos ponen en evidencia que el uso de los biodigestores aporta positivamente al bienestar familiar.

En el Perú, existen Empresas e Instituciones dedicadas al estudio de la producción de energías limpias que contribuyan a la matriz energética de ese país. Catalogadas por su gran trayectoria se mencionan a: Soluciones Prácticas, Instituto de Alternativas Agrarias, el Centro de Formación Profesional, El Centro

de Demostración y Capacitación de Tecnologías Apropriadas, las mismas que están trabajando fuertemente en la investigación desarrollo e implementación de los biodigestores en todo el país. En el territorio peruano no se tiene un registro acertado de la cantidad de proyectos realizados con este tipo de tecnología, pero asciende a más de 500 los biodigestores instaladas en toda la región. Comercial Industrial Delta S.A. (CIDELSA), en los últimos años viene siendo una de las empresas más importantes en la provisión de biodigestores para los diferentes proyectos de aprovechamiento de la biomasa residual que generan en ese país.

Bolivia, siendo un país de clima frío y templado se ha incursionado en el aprovechamiento de la biomasa residual mediante la biodegradación, iniciando: entre los años 1990 y 1995 donde se desarrolló el primer proyecto para la producción de biogás a partir de las excretas humanas y animales domésticos, con financiamiento de la Cooperación Alemana (GTZ), pero la falta de conocimiento y su respectiva capacitación no se lograron obtener buenos resultados en la instalación de los biodigestores. La iniciativa en esta investigación no tuvieron resultados prácticos visibles en el desarrollo de esta nueva tecnología.

En el periodo 2005 y 2010 el Programa de Desarrollo Agropecuario (PROAGRO) en conjunto con la Cooperación Alemana llevaron adelante una iniciativa de “Desarrollo Energético”. Se estima que 1 000 familias fueron beneficiarias de dicho programa. El éxito de la iniciativa radicó en facilitar el conocimiento técnico y práctico a las familias del área rural, para que puedan construir y mantener operativos los biodigestores en sus hogares.

Desde el 2006 la ONG y Tecnologías en Desarrollo, lleva adelante el Programa “Viviendas Autoenergéticas” en el Altiplano con más de 100 biodigestores instalados en las comunidades de los municipios de Achacachi y Tiawanaku.

El proyecto busca el manejo adecuado de los residuos humanos y animales, por medio de acciones sostenibles y acordes al equilibrio ecológico, que mejorará la calidad de vida de las personas en la zona del proyecto.

Costa Rica, desde el año 1994 la Universidad EARTH trabaja en la investigación y desarrollo de la tecnología. Hasta el año 2010 había más de 2 000 unidades del tipo Taiwán instalados y operando en fincas, agroindustrias y en hoteles.

Colombia, la empresa incursionada en Energías Renovables y Tecnologías Apropriadadas (APROTEC) ha instalado dos biodigestores en una granja agrícola donde se tienen vacas y cerdos, a su vez están trabajando fuertemente en la difusión de la tecnología para buscar usuarios interesados en implementar la nueva técnica.

Ecuador, CARE-Ecuador (Organización Internacional, sin fines de lucro) está incentivando a agricultores y ganaderos con la implementación de esta nueva tecnología para el fácil aprovechamiento de todos sus residuos agrícolas. Además se encuentra investigando acerca del correcto funcionamiento de los biodigestores de acuerdo a la temperatura, topografía de cada lugar y la utilización de los materiales amigables con el medio ambiente.

En el 2001, la Fundación Brethren y Unida (FBU) incursionó por primera vez en la construcción y manejo de biodigestores, como parte de una intervención más amplia que promovía el desarrollo productivo en la zona de Intag, con recursos financiados por el Fondo de Contravalor Ecuatoriano Suizo FOES (CEA, 2010).

En la provincia de Bolívar en el año 2006 se implementaron 10 biodigestores en las parroquias rurales mediante el “Proyecto Piloto de Tratamiento de Desechos Orgánicos”, con apoyo de la Corporación para la Investigación Energética (CIE).

En Ambato, provincia de Tungurahua en la vía a Píllaro; el Técnico Carlos Duque, elaboró un prototipo para aprovechar el gas metano de sólo tres chimeneas de las 120 que existen en el relleno sanitario de Ambato, el mismo que está ubicado en el sector de Chachoán, con una capacidad de 235 toneladas de biomasa que produce Ambato. Cada tubería de desfogue genera 0,058 m³ de biogás por segundo. Suficiente para implementar un generador eléctrico de 12 kW, que alimenta a una carga de 7,2 kW compuesta de nueve lámparas incandescentes de 800 W, que iluminan una parte del relleno sanitario (Duque, 2012).

En Bucay provincia del Guayas, se ha realizado el estudio y diseño de un biodigestor para generar biogás y bioabono, a partir de los desechos orgánicos de los animales, aplicable en las zonas agrarias del Litoral. La capacidad que tenía este biodigestor era de 50 kg, pero con una carga de biomasa residual de aproximadamente 30 kg, a un costo 600,00 USD. Los recursos energéticos

obtenidos reemplazarán en un porcentaje al consumo de GLP, en cuanto el efluente contribuirá a un ahorro en la compra de fertilizantes químicos utilizados para los cultivos (Arce, 2011).

Chiriboga (2010) en su trabajo investigativo propone el “Desarrollo del Proceso de Producción de Biogás y Fertilizante Orgánico a partir de Mezclas de Desechos de Procesadoras de Frutas”. En su estudio concluyó que la mejor mezcla para obtener biogás es utilizar 50 % de estiércol y 50 % de desechos de frutas.

Actualmente en la provincia de Cotopaxi se tienen grandes haciendas dedicadas a la cría intensiva de ganado vacuno 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 hacienda Galpón, con el fin de aprovechar los desechos orgánicos de los bovinos 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 ha analizado la cantidad de ganado vacuno que posee la hacienda, así como también la energía térmica total que consume la misma, de igual forma la cantidad de insumos fertilizantes que requieren para los procesos agrícolas.

El direccionamiento que tiene el proyecto es buscar nuevas fuentes de energía, más no a la producción de ganado vacuno. 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.

2.3. Fundamentación teórica

La fundamentación teórica básicamente abarcará el concepto de biomasa, biogás, bioabono, caracterización de la materia prima, procesos de la digestión anaeróbica y la tecnología de utilización de los biodigestores.

2.3.1. 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 (López, 2008).

No obstante, dada la heterogeneidad que la caracteriza (amplia gama de orígenes y diversidad de tecnologías para su aprovechamiento energético), el concepto de biomasa ha experimentado una evolución que se debe tener en cuenta; actualmente, el término de biomasa se utiliza para hacer referencia a los biocombustibles sólidos, distinguiéndolos de los biocarburantes y del biogás (aunque éstos provengan también de la materia orgánica). Incluye por tanto: la madera, astillas, paja, o sus formas densificadas como los pellets y briquetas, posee mayoritariamente carácter lignocelulósico y se puede utilizar con fines térmicos o eléctricos (López, 2008).

Ya se ha mencionado anteriormente que el objetivo principal de esta investigación es estimar la biomasa del ganado vacuno de la hacienda y sus alrededores para aprovechar su potencial energético. Una clasificación que realiza López (2008) de la biomasa residual de origen agrario, define como todo residuo de carácter orgánico generado en cualquier actividad agraria, ya sea agrícola, ganadera o agroindustrial. Por lo tanto, se clasifica en: biomasa residual agrícola, ganadera y agroindustrial.

2.3.1.1. Biomasa residual agrícola

En este grupo se incluye todo el material vegetal producido en las explotaciones agrícolas. Comprende los residuos de cultivos leñosos como los restos de poda de árboles frutales, y los residuos de los cultivos herbáceos como la papa, maíz, cebada, etc. El Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) en el año 2005 menciona que la disponibilidad depende de la época de recolección y de la variación de la producción agrícola, por lo que es recomendable la existencia de centros de acopio de biomasa donde se pueda centralizar su distribución. Se caracteriza por su producción dispersa en el territorio y su baja

densidad, que provoca elevados costes en la logística de su aprovisionamiento. El pretratamiento para su densificación (empacado, astillado, etc.) supone un coste adicional pero consigue un transporte más económico. Estas dos características son los obstáculos más importantes para lograr la viabilidad técnica y económica de su aprovechamiento energético.

2.3.1.2. Biomasa residual agroindustrial

Incluye los subproductos derivados de los procesos de producción industrial de productos agroalimentarios, como el bagazo de caña de azúcar, cáscara de arroz, bagazo de frutas, etc. Al igual que en el caso anterior, se encuentra concentrada allí donde se cultiva o procesa, suelen ser contaminantes, y en muchas ocasiones tiene un elevado contenido en humedad por lo que su secado supone un coste adicional. Su disponibilidad depende de la demanda industrial que la genera, y en muchos casos es estacional.

2.3.1.3. 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 vacuno en una misma área dedicada a la explotación intensiva (IDAE, 2005).

2.3.1.4. Potencial de excretas del ganado vacuno

En las granjas o haciendas dedicadas a la cría intensiva del ganado vacuno se producen elevados volúmenes de estiércol. La forma más común de tratar estos residuos es propagándoles sobre las áreas de cultivo, con el doble propósito de

disponer de ellos y obtener beneficio de su contenido nutritivo. Pero sin embargo, al no contar con medidas exactas de la cantidad de residuo orgánico que se debe aplicar por metro cuadrado de suelo, se puede provocar una sobrefertilización y hasta la contaminación de las cuencas hidrográficas. En la tabla 2.1 se presenta el tipo de animal y los kilogramos de estiércol de acuerdo a su tamaño.

Tabla 2.1. Cantidad de estiércol por tamaño y especie animal.

Especie animal	Tamaño	Peso vivo	Kg Estiércol/día	m ³ biogás/kg-excreta	m ³ biogás/animal-día	Relación C/N	Relación Excreta-Agua
Vacuno	Vaca	300	10	0,04	0,4	25:1	1:2
	Toro	400	15	0,04	0,6		
	Ternero	120	4	0,04	0,16		
Porcino	Cerdo	50	2,25	0,06	0,135	15:1	1:2 a 1:3
	Lechón	30	1,5	0,06	0,09		
	Cría	12	1	0,06	0,06		
Aves	Ponedora	2	0,18	0,08	0,014	22:1	1:3
	Pollos	1	0,12	0,08	0,010		
	Crías	0.5	0,08	0,08	0,006		
Ovino	Grande	32	5	0,05	0,25	35:1	1:2 a 1:3
	Mediano	15	2	0,05	0,1		
	Pequeño	8	1	0,05	0,05		
Caprino		50	2	0,05	0,1	40:1	1:2 a 1:3
Conejo		3	0,35	0,06	0,021	23:1	1:2 a 1:3
Equino		450	15	0,04	0,6	50:1	1:2 a 1:3

Fuente: Carrillo, 2004.

2.3.2. Definición biogás

Según Erosky (2005) 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 (CH₄), el cuál brinda las características combustibles al biogás, y dióxido de carbono (CO₂).

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.

2.3.2.1. Volumen del biogás

El volumen y las características del biogás, son muy variables y se ven directamente relacionadas con el tipo de desecho o residuo del cual provienen. Dependiendo de la composición fisicoquímica y la cantidad de carbono degradable que contenga la materia orgánica se tendrá mayor o menor producción de biogás. El volumen del gas metano producido se expresa en: m^3 biogás/ m^3 digestor o su vez m^3 biogás/kg Demanda Química de Oxígeno (DQO) y difieren según el tipo de residuo, la concentración de Sólidos Volátiles (SV), la relación de carga, el tiempo de retención y el diseño del digestor. Generalmente la producción de biogás oscila entre 1 a 5 m^3 biogás/ m^3 digestor (Carrillo, 2004).

2.3.2.2. Características del biogás

De acuerdo con Bravo (2007) 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 (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y otros gases en menor proporción (ver tabla 2.2).

Tabla 2.2. 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_2S	0,1
Hidrógeno	H_2	1 – 3
Vapor de agua	H_2O	trazas

Fuente: Hilbert, 2008.

Como se puede observar en la tabla 2.3 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 (Hilbert, 2008):

Tabla 2.3. 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 Carbono	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: Hilbert, 2008.

Como se puede observar en la tabla 2.4 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 2.4. 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: Hilbert, 2008.

2.3.2.3. Adaptabilidad del biogás en la generación de energía eléctrica

El valor calorífico del biogás tiene un promedio 6,4 kWh/m³. Es decir que 1 m³ de biogás es energéticamente equivalente a medio litro de diésel (IDAE, 2007). El biogás puede ser utilizado directamente como cualquier otro gas combustible,

aunque en algunos casos se requieren procesos previos de purificación del gas, dependiendo del uso que se le va a dar. El biogás a nivel industrial puede ser utilizado para: la generación de térmica o electricidad en calderas, secadores, hornos, en motores o turbinas para generar electricidad, en pilas de combustible (previa purificación), o como material base para la síntesis de productos de elevado valor agregado, como combustible de automoción. A nivel rural el biogás puede ser utilizado como combustible de estufas para la calefacción de animales, para la iluminación mediante lámparas de mechero donde no requieren del gas a presión, así como combustible único para refrigeradores, calentadores de agua, estufas simples para la cocción de alimentos, secadores y motores de combustión interna adecuados para el funcionamiento con biogás (Hilbert, 2008).

En la tabla 2.5 se muestra el rendimiento de 1 m³ de biogás para los diferentes artefactos que se pueden utilizar:

Tabla 2.5. Implementación de 1 m³ de biogás y su duración.

Uso	Consumo	Rendimiento (%)
Quemador de cocina	300 – 600 l/h	50 - 60
Lámpara a mantilla (60 W)	120 - 170 l/h	30 - 50
Heladera de 100 litros	30 – 75 l/h	20 - 30
Motor de gas	0,5 m ³ /kWh	25 - 30
Quemador de 10 kW	2 m ³ /h	80 - 90
Cogenerador	1 kW electricidad 0,5m ³ /kWh 2 kW térmica	Hasta 90

Fuente: Hilbert, 2008.

El biogás en mezcla con el aire, en una relación de 1:20, forma un gas altamente explosivo, con un poder calorífico aproximado de 5 500 kcal/m³, siendo un valor muy inferior al de gas propano que tiene 22 000 kcal/m³ (Matamorros, 2013). Sin embargo, el biogás puede ser considerado una fuente de energía renovable y alternativa. Además, es una solución inmediata a los problemas de contaminación por parte de los residuos orgánicos, los cuales producen gases de efecto

invernadero al ser depositados en vertederos, y que representan la principal materia prima para la generación o producción de biogás a través del proceso de biodigestión anaerobia.

2.3.3. Cantidad volumétrica de bioabono

El bioabono o 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 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.

2.3.3.1. Características del fertilizante orgánico

El biol se encuentra compuesto por diversos productos orgánicos e inorgánicos, los cuales pueden ser utilizados tanto para la fertilización de suelos, así como también para la alimentación de algunas especies.

En la digestión anaeróbica, se conservan en el efluente, todos los nutrientes originales (N, P, K, Ca, Mg) de la materia prima, los cuales son esenciales para las plantas, mientras que se remueven sólo los gases generados (CH_4 , CO_2 , H_2S) que comprenden del 5 al 10 % del volumen total del material de carga. Son estos los motivos por los cuales el bioabono posee características fertilizantes capaces de influenciar sobre plantas y cultivos, elevando su productividad (Álvarez, 2010).

2.3.4. Caracterización de la materia prima y productos

En la caracterización de la materia prima se definirá a los sólidos totales, sólidos volátiles, demanda química de oxígeno y la relación de carbono nitrógeno.

2.3.4.1. Sólidos totales

La materia orgánica que ingresa o alimenta, a un biodigestor debe estar constituida por una importante cantidad de agua y una fracción sólida que esta demandada por la concentración de sólidos totales (ST). Estos mismos, se refieren al peso del material seco remanente, después de un proceso de secado a $105\text{ }^\circ\text{C}$, hasta que no se nota la pérdida de peso (Clesceri, 1992). El porcentaje de sólidos óptimo para digestores continuos oscila entre el 8 y el 12 %, ya que si se aumenta el contenido de sólidos la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se verá limitada. Afectando de manera directa la eficiencia y producción de gas. El porcentaje óptimo de sólidos también dependerá del diseño del digestor.

En el caso del estiércol del ganado bovino, el porcentaje de sólidos totales que posee varía entre 17 y 20 %, por lo que es necesario agregar un volumen de agua para diluir la materia prima y de esta manera reducir el porcentaje de sólidos totales. Las diluciones se realizarán en función del residuo con el que se va a trabajar y del contenido de sólidos que posee el mismo.

2.3.4.2. Sólidos volátiles

Los sólidos volátiles (SV) o sólidos totales orgánicos se refieren a la parte de los sólidos totales, que se volatilizan durante la calcinación de la biomasa residual a temperaturas superiores de los $550\text{ }^\circ\text{C}$. En teoría, los sólidos volátiles contienen

todos los compuestos orgánicos que pueden convertirse en metano en el proceso de digestión anaeróbica. Dicho de otra manera, los sólidos volátiles son parte de la materia orgánica de los sólidos totales (ICAITI, 1983).

El rendimiento de un biodigestor se verá influenciado en gran parte por el contenido en materia orgánica del material de carga (% o ST), ya que al tener material de carga con un elevado porcentaje de materia orgánica degradable, esta se transformará, gracias a los procesos de digestión anaeróbica, en biogás. En este caso el proceso tendrá una elevada producción de biogás traduciéndose en un buen rendimiento del proceso. Obviamente, para que la producción de biogás sea la adecuada, se deben controlar todos los parámetros de operación del proceso y asegurar que dichos parámetros no sobrepasen sus límites óptimos de trabajo.

2.3.4.3. Demanda química de oxígeno

La demanda química de oxígeno es un parámetro aproximado, que mide el contenido total de materia orgánica presente en una muestra líquida. La DQO cuantifica la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica degradable, y se expresa en mg de oxígeno consumido para la oxidación de las sustancias reductoras presentes en un litro de muestra, (mg O₂/l).

2.3.4.4. Relación carbono – nitrógeno

Un parámetro muy importante para el crecimiento bacteriano y para la capacidad fertilizante del biol es la relación carbono nitrógeno (C/N).

Las bacterias necesitan carbono y nitrógeno para vivir. Al momento de introducir el material de carga a un biodigestor, generalmente materia orgánica, se está facilitando la obtención de estos elementos a la flora microbiana, ya que los mismos se encuentran presentes en la materia orgánica en forma de carbohidratos y proteínas. Estos carbohidratos y proteínas serán indispensables para el crecimiento, desarrollo y actividad de las bacterias anaeróbicas.

2.3.5. Proceso de digestión anaerobia

La digestión anaeróbica es un proceso biológico en el cual diferentes grupos bacterianos interactúan en ausencia del oxígeno, degradando la materia orgánica para transformar en un gas rico en metano, denominado biogás y un efluente rico en nitrógeno, denominado bioabono o biol. Este proceso biológico se lo puede dividir en tres etapas importantes que son: hidrólisis-acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Funes, 2004).

Es importante recordar que al iniciar el funcionamiento o al poner en marcha un biodigestor, se encuentra el desarrollo y formación de dos tipos de bacterias: las desnitrificantes las cuales son aerobias y cumplen la función de remover el oxígeno disuelto, permitiendo crear las condiciones anaeróbicas necesarias para la existencia de las bacterias productoras de biogás; y las sulfato-reductasas las cuales siempre están presentes y producen ácido sulfhídrico (Funes, 2004).

En la primera etapa de hidrólisis y acidogénesis un grupo de bacterias fermentativas, principalmente bacterias proteolíticas y celulolíticas, actúan sobre la materia orgánica (polisacáridos, lípidos y proteínas) mediante una reacción de hidrólisis enzimática transformando los polímeros a monómeros individuales. Posteriormente, bacterias acidogénicas realizan la conversión de estos monómeros a productos como ácidos orgánicos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno molecular (H_2), dióxido de carbono (CO_2) y amoníaco (NH_3). Estos productos son el sustrato de otro tipo de bacterias denominadas acetogénicas (acetogénesis), las cuales producen acetato, H_2 y CO_2 . Simultáneamente, un grupo de bacterias homoacetogénicas, degradan los ácidos de cadena larga a acetato, H_2 y CO_2 .

El ácido acético constituye el principal sustrato para las bacterias metanogénicas (metanogénesis), las cuales transforman el mismo a metano. Las bacterias formadoras de ácido generan mayoritariamente ácido acético y en menores cantidades ácido propiónico y butírico. El 72 % de metano producido proviene del ácido acético (CH_3COOH) y el 13 % proviene del ácido propiónico (CH_3CH_2COOH) o butírico (C_3H_7COOH). El 15 % restante se forma a partir de hidrógeno molecular y dióxido de carbono, reducción de metanol, y degradación de otros compuestos intermedios.

Las bacterias metanogénicas que transforman el ácido acético y los ácidos propiónico y butírico en metano se denominan bacterias metanogénicas acetoclásticas, mientras que las bacterias metanogénicas que transforman el hidrógeno molecular junto con dióxido de carbono en gas metano se suelen denominar bacterias metanogénicas hidrogenoclásticas (Funes, 2004).

Al interactuar y desarrollar de forma balanceada y equilibrada las tres etapas antes mencionadas, se asegura un funcionamiento estable y eficiente del biodigestor.

2.3.6. Tecnología de utilización de biodigestores

Los biodigestores son reactores donde se provocan de manera controlada la digestión anaeróbica para la obtención de biogás y biol. La mezcla de biomasa y agua se introduce en el biodigestor, donde permanece a una cierta temperatura durante un tiempo determinado, que varía en función del tipo de biomasa introducido y del tipo de digestor.

2.3.6.1. Tipos de biodigestores

En forma general, los biodigestores se clasifican, según su modo de operación, en los siguientes: de régimen estacionario o de Batch, de régimen semicontinuo, horizontales de desplazamiento y de régimen continuo.

Régimen estacionario o de laboratorio (figura 2.1) son muy utilizados para obtener fertilizante orgánico, el mismo que consiste en un tanque hermético con una salida de gas. Se carga una sola vez y se descarga cuando han dejado de generar gas.

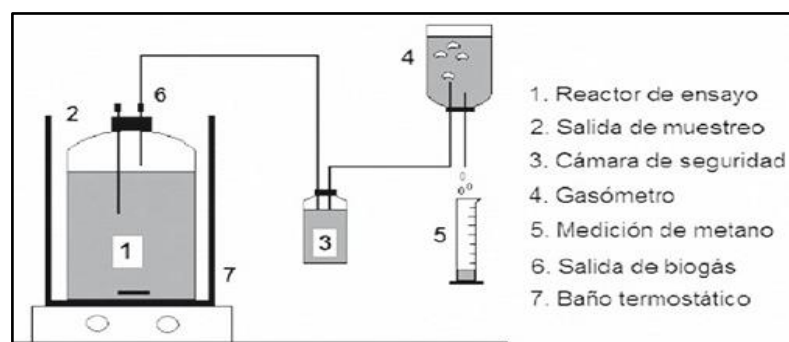


Figura 2.1. Biodigestor estacionario o de laboratorio.
Fuente: Botero, 2011.

Los de régimen semicontinuo se construyen enterrados, se cargan por gravedad una vez al día. En la parte superior flota una campana donde se almacena el gas. En otros diseños se construyen enterrados, se operan a régimen semicontinuo, entrando la carga por un extremo del biodigestor y saliendo el efluente por el extremo opuesto.

Un tipo de biodigestor de régimen semicontinuo es el de cúpula fija, existiendo alrededor de 7 millones de sistemas de biodigestión construidos en China, los cuales son fabricados de distintas formas y capacidades con diferentes materiales; pero tienen un diseño básico en el que el biogás es recolectado en una cúpula fija. Este tipo de biodigestor está compuesto por una caja de registro de carga y mezcla, el digestor, y una caja de descarga del afluente (biofertilizante). Este biodigestor se caracteriza por tener una forma cilíndrica y estar enterrado lo cual favorece el proceso de fermentación, ya que existe poca influencia por los cambios de temperatura. Este modelo de biodigestor se construye con ladrillos o con bloques, debido a ello es importante tener mano de obra calificada (albañiles) para poder construirlo y seguir el diseño que han elaborado los expertos en sistemas de biodigestión (figura 2.2).

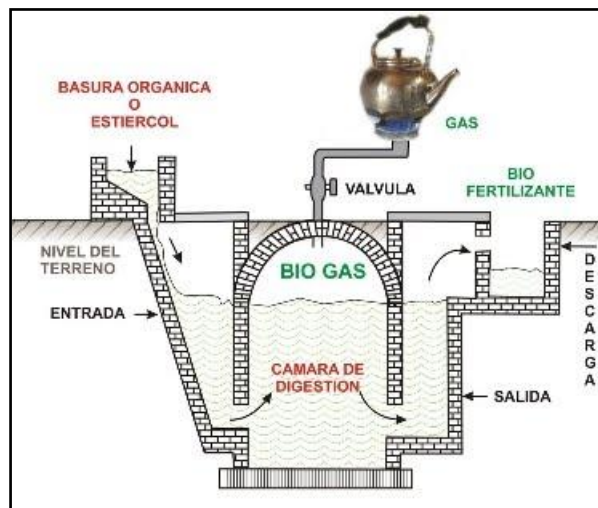


Figura 2.2. Biodigestor de cúpula fija.

Fuente: Implementación de Sistemas de Biodigestión en Ecoempresa, 2013.

Los de régimen continuo se utilizan principalmente para tratamiento de aguas negras; son plantas muy grandes que emplean equipos para proporcionar su

calefacción y agitación. En la figura 2.3 se puede apreciar un diseño de biodigestor de esta naturaleza.

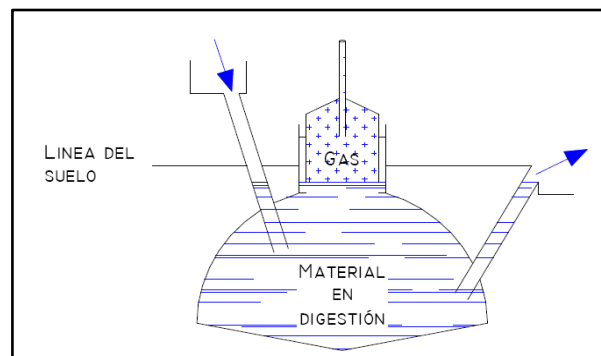


Figura 2.3. Biodigestor con campana flotante fija.
Fuente: García, 2010.

Los biodigestores horizontales o tipo salchicha, que se observan en la figura 2.4, se utilizan en efluentes donde la concentración de microorganismos es elevada, y ha sido aplicado en diferentes tipos de residuos: municipales, desechos de la cocina y de los animales domésticos. Éste tipo de biodigestor es sencillo y económico, apropiado para las granjas pequeñas, posee tuberías de entrada y salida de las aguas residuales, y como elemento fundamental una bolsa de polietileno o PVC que sirve como reactor (Samayoa, 2012).

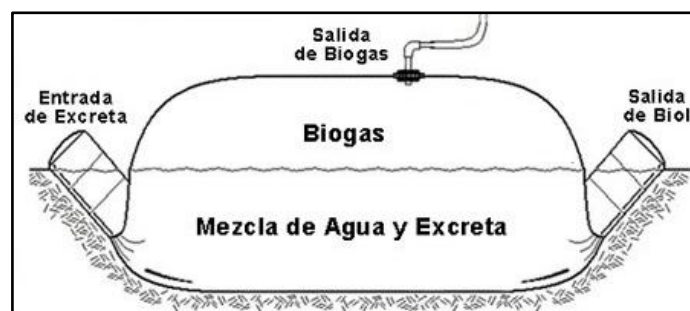


Figura 2.4. Biodigestor horizontal o tipo salchicha.
Fuente: García, 2010.

Las plantas continuas son también apropiadas para viviendas rurales donde se puede aprovechar los desechos orgánicos producidos por los desperdicios de la cocina o desechos biológicos de animales domésticos. Se integran fácilmente a la vida diaria y a su vez se tiene buena producción de gas. Este tipo de biodigestor

también tiene la ventaja de adaptarse al uso industrial, por ejemplo en granjas donde se deben tratar grandes cantidades de estiércol y no se tiene ninguna disposición final, es factible implementar esta tecnología.

Entre las instalaciones más sencillas se puede encontrar los reactores de cúpula fija y de campana flotante. Este último tiene la ventaja de soportar fluctuaciones en el consumo de gas, manteniendo la presión constante. En la figura 2.5 se puede observar un esquema detallado del mencionado biodigestor.

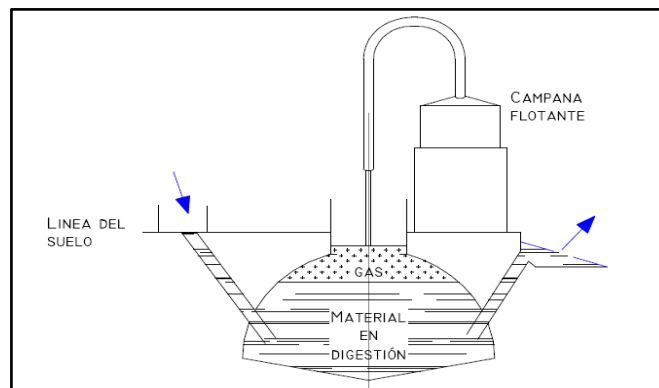


Figura 2.5. Biodigestor con campana flotante móvil.
Fuente: García, 2010.

La campana también se construye separadamente del biodigestor. La misma que almacena el biogás y sirve también como regulador de presión tal como se indica en la figura 2.6.

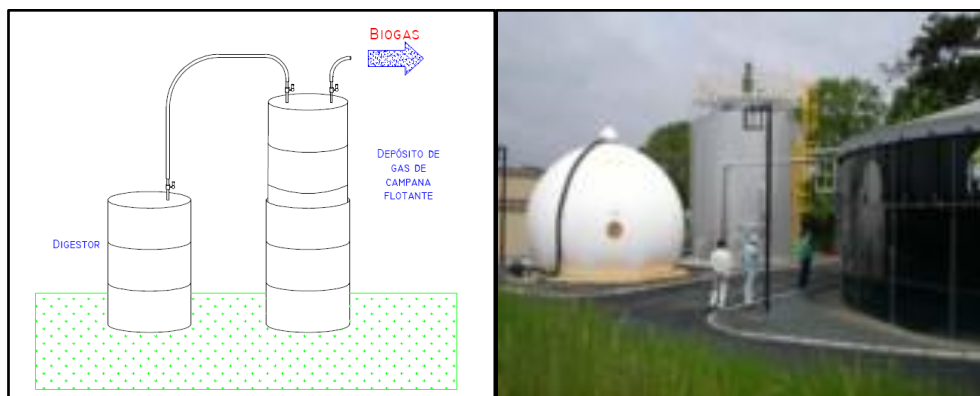


Figura 2.6. Biodigestor con campana flotante móvil separada.
Fuente: García, 2010.

2.3.6.2. 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.

2.3.6.2.1. Temperatura 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 ante 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 (Ly, 2001).

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.

2.3.6.2.2. Potencial de hidrógeno

El rango óptimo del potencial de hidrógeno (pH), bajo el cual un biodigestor opera de manera eficiente y presenta buena producción de biogás, tiene valores de 6,5 hasta 7,5 de pH; es decir, un valor neutro. Al operar un biodigestor es muy importante mantener el 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 tendrían valores de pH sobre los 8, durante la operación del mismo; motivo por el cual, solo se tratan medidas correctivas para descensos en el pH.

2.3.6.2.3. Cantidad volumétrica de carga y descarga

Es el tiempo en que la materia orgánica permanece dentro del digestor, también denominado volumen de carga y descarga. 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 2.1 para TRH, según Hilbert (2008).

$$\tau = \frac{V}{\dot{V}} \quad (2.1)$$

Dónde:

τ .- tiempo de retención hidráulico; día.

V .- volumen del digestor; m³.

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

2.3.6.2.4. Presión del biogás

La presión del 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 presión ascendente. Estos sistemas alcanzan presiones máximas de 1,4 psi, encontrándose la media en 0,45 psi, presión a la cual funcionan correctamente los artefactos domésticos. Para reducir el volumen de almacenaje se puede comprimir el gas y almacenar a presiones medias (0,5 a 1,5 bar) y altas hasta 300 bar. Este tipo de almacenamiento demanda un gasto extra de energía para comprimir el gas y además se debe purificar extrayendo el vapor de agua, el dióxido de carbono y el ácido sulfídrico. Los contenedores de gas para estas presiones (cilindros en general), son costosos debido a que deben tener suficiente rigidez estructural para poder soportar los esfuerzos a los que esta sometidos (Hilbert, 2008).

2.3.6.2.5. 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, teniendo como resultado la homogeneización de la materia orgánica, preservación de las condiciones de temperatura e incremento en la producción de biogás.

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.

2.3.6.2.6. Cantidad volumétrica de agua

Hilbert (2008) considera que la mezcla ideal entre las excretas del ganado vacuno y el agua deben tener una relación de 1:1.5, es decir; 1 kg-estiércol:1,5 litros-agua,

la misma que debe formar un fluido pastoso de 50 000 cetipoise. En la tabla 2.1 se encuentra la relación de estiércol-agua de acuerdo a cada especie animal por tipo y tamaño.

2.3.7. Poder calórico del biogás

Se propone un método experimental alternativo para la medición del poder calórico inferior del biogás. Según Martina (2006) 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 calórico a presión constante de gases y líquidos. En la figura 2.7 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.

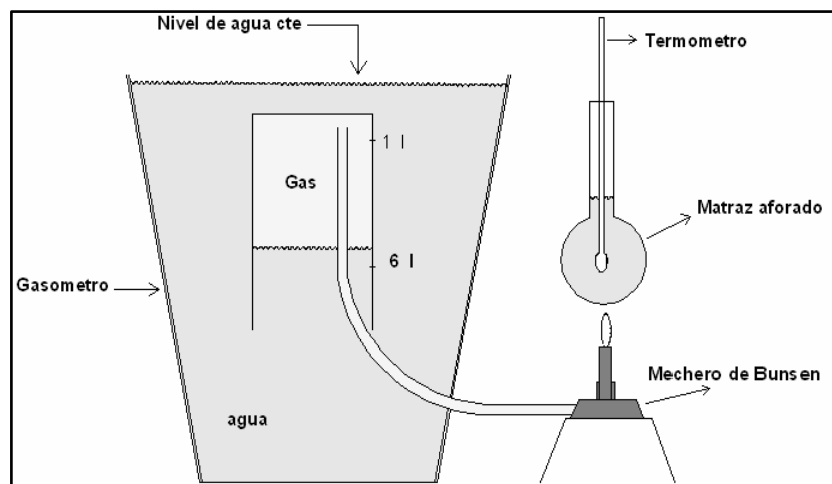


Figura 2.7. Esquema del método experimental.
Fuente: Martina, 2006.

El método calorimétrico propuesto consiste en quemar en idénticas condiciones de temperatura y presión un volumen de biogás (cuyo poder calórico se quiere determinar) y el mismo volumen de un gas cuyo poder calórico se conoce de antemano, 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 calórico 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.

2.3.8. 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).

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (2.2)$$

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.

2.3.9. 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).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.3)$$

Dónde:

m.- masa; kg.

ρ .- densidad; kg/m³.

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

2.3.10. 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):

$$p = \rho \cdot h \cdot g \quad (2.4)$$

Dónde:

h.- altura; m.

g.- gravedad (9.80665); m/s².

2.3.11. 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).

$$Q = m \cdot ce \cdot \Delta T \quad (2.5)$$

Dónde:

Q.- calor; kcal.

ce.- calor específico; kcal/kg °C.

ΔT .- variación de temperatura; °C.

2.4. Conclusiones del capítulo

- ✓ Se establecieron, mediante el marco teórico, los conceptos básicos que permiten la descripción y comprensión del proceso de la biodegradación de la materia orgánica en un ambiente anaeróbico para la obtención de biogás y bioabono. Lo anterior posibilitó la estructuración teórica de la investigación, referente a las energías renovables y el aprovechamiento energético de la biomasa residual del ganado vacuno en la hacienda Galpón.
- ✓ Se establecieron ecuaciones que permiten el cálculo de la densidad, la presión y el calor específico. Estos parámetros son importantes para la instalación investigada por cuanto determinan su funcionamiento termodinámico.

CAPÍTULO 3. METODOLÓGIA

3.1. Introducción

La selección y establecimiento de metodologías para el desarrollo de investigaciones es de gran importancia, por cuanto la misma constituye la conexión necesaria entre el problema y los resultados obtenidos. En este sentido el **objetivo** del presente capítulo es establecer una metodología que posibilite el desarrollo satisfactorio de la investigación.

3.2. Diseño de la investigación

La investigación científica se desarrollará a partir de la modalidad bibliográfica. Permitiendo el enriquecimiento del estado del arte en su cultura general del objeto a investigar. A su vez se ejecutará trabajo de campo, el cual consistirá en explicar la causa y efecto de una variable con respecto a la otra, entendiendo su naturaleza, así como sus factores característicos que pueden definir el control la predicción del proceso que es el objeto de estudio. Finalmente se procederá al trabajo de gabinete para el procesamiento de la información, análisis y discusión de los resultados disponibles.

3.2.1. Modalidad de la investigación

Según Sampieri (1991) se clasifican en: de campo, bibliográfica y documental. En el cual, para el presente trabajo se desarrolla una investigación de campo, tomando como zona de estudio la hacienda Galpón, perteneciente al cantón Salcedo provincia de Cotopaxi, lugar donde se genera y almacena a la intemperie las excretas del ganado, sin los requerimientos técnicos adecuados.

3.2.1.1. De campo

La modalidad del proyecto es de campo, ya que se analizará metódicamente el problema que provoca la biomasa residual del ganado vacuno en los establos y en el área de acopio de la hacienda Galpón, con el fin de analizar las causas y efectos de las excretas del bovino; con los resultados obtenidos se planteará un recurso alternativo donde se pueda aprovechar estos residuos para generar nuevas fuentes de energías limpias. También será necesaria la intervención directa de las personas que se encuentran involucradas en las actividades de la hacienda.

Para esta investigación se recopilarán datos directos de la biomasa animal que se genera a diario en los establos y potreros; mediante cálculos, toma de muestras, mediciones, entrevistas al veterinario y al personal que se encuentra a cargo del mantenimiento de la hacienda.

Se realizarán varias tomas de muestra de las excretas del bovino, con el propósito de determinar un valor promedio de kilogramos de biomasa por día, para llenar al biodigestor alternativo.

3.2.1.2. Bibliográfica y 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.

3.2.2. Tipos de investigación

Por la característica de la investigación se pretende realizar indistintamente la exploratoria, descriptiva, comparativa y experimental.

3.2.2.1. Investigación exploratoria

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 aplica un aislante térmico al proceso de digestión anaeróbica para mejorar su eficiencia en la producción de biogás. Donde se analizará 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.

3.2.2.2. Investigación descriptiva

Los estudios descriptivos buscan especificar las propiedades importantes de cualquier proceso sometido a análisis (Sampieri, 1991). En la presente investigación se recolecta información relacionada con el caudal, presión y rendimiento del biogás, en un biodigestor aislado térmicamente, demostrando su causa y efecto.

3.2.2.3. Investigación experimental

Se refiere a un estudio de investigación en el que se manipulan deliberadamente una o más variables independientes para analizar las consecuencias de esa intervención directa sobre el proceso de biodegradación de la materia orgánica, dentro de una situación controlada por el investigador (Sampieri, 1991). En este proyecto se tiene como variable independiente al potencial de biomasa residual del ganado vacuno, donde se realizaran los experimentos observando y midiendo su relación con la variable dependiente que es el aprovechamiento energético.

Relacionando el proceso de digestión anaeróbica, el potencial energético de esta biomasa residual del ganado vacuno en estudio, depende directamente de la temperatura del sustrato, tipo de sustrato (nutrientes disponibles), la carga volumétrica, el tiempo de retención hidráulica y nivel de acidez (pH).

En el proceso se manipulan deliberadamente uno o más variables independientes como son: tipo de sustrato, temperatura del sustrato, nivel de pH, tiempo de retención hidráulica; para analizar las consecuencias de esa intervención sobre una o más variables dependientes, dentro de una situación de control de la investigación.

Los experimentos auténticos y puros manipulan las variables independientes para ver sus efectos sobre las variables dependientes, de acuerdo a un escenario de

control (Sampieri, 1991), por ello dentro del diseño de la investigación, se usará la experimentación por la flexibilidad que proporciona este método.

3.3. Operacionalización de 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 3.1.

Tabla 3.1. Operacionalización de la variable independiente y dependiente.

VARIABLE INDEPENDIENTE:		Potencial de biomasa residual del ganado vacuno				
Concepto	Categoría	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos	
Cantidad de biomasa residual (agrícola, industrial, urbana) que puede ser aprovechada para obtener energía alternativa y biofertilizantes	Excreta animal de ganado vacuno	Potencial de excretas	de Kg	Cálculo	Ecuaciones	
	Capacidad del biodigestor	Cantidad volumétrica carga/descarga	m ³	Cálculo	Ecuaciones	
	Portador energético		Potencial de hidrógeno	de pH	Medición	pH-metro Cintas
			Temperatura del sustrato	del °C	Medición	Termómetro Sensor
			Volumen del biogás	del m ³	Medición	Gasómetro
Agua natural para la mezcla	Cantidad volumétrica de agua	de 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	Poder calórico	%	Cálculos	Ecuaciones	
		Presión del biogás	PSI	Medición	Manómetro Sensor	
		Volumen de biogás	de m ³	Medición	Caudalímetro	
	Bioabono	Cantidad volumétrica	%	Cálculos	Ecuaciones	

3.4. Lugar de la investigación

La investigación se llevará a cabo en la sierra centro, provincia de Cotopaxi, cantón Salcedo, parroquia San Miguel, comuna Galpón, desmembrando la hacienda Galpón.

3.4.1. Área de influencia directa

La hacienda Galpón, se encuentra a 15 km de Salcedo, provincia de Cotopaxi, según coordenadas geográficas de Google Earth (2013), 1°03'14.90" Sur y 78°34'01.43" Oeste, a 2 738 m.s.n.m., con una altura de vista cartográfica máxima de 6 km (Anexo 23), zona que se caracteriza por su temperatura promedio anual de 15 °C, siendo un clima apropiado para aplicar esta tecnología, además con la disponibilidad del agua de regadío hacen a esta zona un lugar propicio para dedicarse a la agricultura y ganadería, pero que atraviesa un déficit en los servicios básicos como: GLP, electricidad y agua potable. En la figura 3.1 se puede observar una fotografía de la parte frontal de la hacienda Galpón.



Figura 3.1. Vista frontal de la hacienda Galpón.

3.5. Metodología

Haciendo referencia a todos los objetivos planteados en la evaluación del potencial energético de la biomasa residual del ganado vacuno en la hacienda Galpón, se caracterizaron las variables establecidas en la Matriz de Operacionalización, las mismas que serán descritas en los siguientes literales.

3.6. Levantamiento de la línea base de los recursos energéticos.

La metodología utilizada permitirá efectuar el levantamiento de la línea base de los recursos energéticos utilizados en la hacienda Galpón.

3.6.1. Obtención del consumo anual de electricidad

Para la obtención del consumo anual de la potencia consumida se solicitó a la administración de la hacienda Galpón las planillas de pago del consumo eléctrico del contador de energía Nro. 75865, que abastece la carga de la residencia, la iluminación del establo y la demanda de la quesería.

Para contrastar los datos históricos de las planillas de los meses de enero a septiembre del 2013, se registró manualmente los meses de octubre, noviembre y diciembre del año antes mencionado (ver Anexo 12), en la figura 3.2 se aprecia el contador de energía que se encuentra instalado en la hacienda.



Figura 3.2. Registro del contador de energía.

3.6.2. 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 hacienda para los meses de enero a septiembre del 2013. Pero en octubre, noviembre y diciembre del mismo año, se realizó un registro personalizado de cuantos cilindros de GLP (cilindros de 45 kg) se consume durante todo el mes, permitiendo así generar datos para analizar la cantidad de gas utilizado (ver Anexo 12). En la figura 3.3 se observa los cilindros de GLP dispuestos en la parte posterior de la hacienda, los mismos que se

encuentran al aire libre, por seguridad, ante una posible fuga que se pueda presentar en la válvula o manguera.



Figura 3.3. Control del consumo de GLP.

3.6.3. Biomasa vegetal utilizada anualmente

La leña (eucalipto, capulí, pino, desechos de cosechas y otros) es un recurso energético sustituyente al GLP en temporadas de escasez, también es utilizado en las chimeneas y fogones de la hacienda para obtener energía térmica (figura 3.4). 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 septiembre del 2013, además para octubre, noviembre y diciembre se realizó un registro manual del consumo de leña, para constatar los datos de los meses anteriores (ver Anexo 12).



Figura 3.4. Biomasa vegetal utilizada como leña.

3.6.4. Consumo anual de fertilizantes químicos

La adquisición de los abonos químicos (fertilizantes) utilizados por la hacienda para los diferentes cultivos propios de la sierra (patatas, abas, melloco, maíz, arveja y otros), se realizó de acuerdo al requerimiento del cultivo. Para el análisis

del consumo anual de los fertilizantes comprados entre los meses de enero a septiembre del 2013, se solicitaron las facturas a la administración de la hacienda; y en los meses de octubre, noviembre y diciembre se tomaron datos manualmente para validar las adquisiciones de los abonos químicos de los meses anteriores (ver Anexo 12). En la figura 3.5 muestra un saco de urea al 46 % de nitrógeno.



Figura 3.5. Abonos químicos para aplicar a los cultivos.

3.7. Determinación de la carga diaria del estiércol en la hacienda Galpón

Se realizó el análisis estadístico del ganado vacuno según sexo y crías, datos levantados in-situ en conjunto con el ingeniero agrónomo encargado del cuidado de la hacienda, con esos datos se tomó un valor promedio del peso por animal vivo, de acuerdo esto, se clasificó al ganado vacuno por tipo, y los equinos se tabularon en una sola clase. En el Anexo 15 se detallan los kilogramos y el total de número de animales.

Para el análisis del porcentaje de la carga diaria del estiércol disponible en los establos de la hacienda Galpón, se utilizaron cinco vacas elegidas aleatoriamente, entre un peso de 270 a 300 kg, las excretas generadas diariamente se sumaron y se dividieron para las cinco reses, de esta manera se pudo determinar el porcentaje de carga diaria que Monar (2008) sugiere en su literatura (60 %).

La prueba se realizó durante cinco días, utilizando un balde de 12 litros de capacidad, una pala manual y una balanza (50 kg), de esta manera se determinó el peso del estiércol, esto se realizó en los meses de agosto y octubre del año 2013, 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.

3.8. Muestreo y caracterización de la materia prima

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

3.8.1. Metodología para el muestreo

Para el ensayo se recogieron excretas frescas directamente del establo, en distintos sitios representativos, 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 (ver Anexo 2). Materiales: guantes de nitrilo, mascarilla, pala manual, termómetro, recipiente y una balanza.

3.8.2. Metodología para la caracterización del estiércol

Con el fin de obtener una mezcla pastosa de alrededor 50 000 centipoise de color verdoso (ATPP, 2008). Las excretas del ganado vacuno recogidas directamente del establo, se mezclaron hasta tener una solución homogénea, de acuerdo a lo sugerido por Hilbert (2008), donde se aplica una relación de 1:1,5; es decir, 1 kg de excretas ganado vacuno y 1,5 litros de agua sin cloro (ver Anexo 2). Preferible utilizar agua de los canales de regadío o vertientes, pues el cloro, disminuye el crecimiento de la población de los microorganismos.

3.8.3. 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.

3.8.3.1. 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 (ver Anexo 2).

3.9. Selección del modelo del biodigestor

Para la selección del modelo de biodigestor se hace referencia de acuerdo a la parte teórica relacionada con la tecnología de los biorreactores, posteriormente se elaboró una matriz de decisiones por cada tipo de reactor, poniendo en consideración aspectos económicos, físicos (topografía del sector), operatividad, facilidad, flexibilidad (aplicar nueva tecnología) y factibilidad de construcción, todo esto con el único objetivo de seleccionar el biodigestor que mejor se adapte a las condiciones de la hacienda Galpón (Lara, 2011).

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 vacuno) producido en la hacienda, 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.

3.9.1. Matriz de decisión

Con el planteamiento de la matriz de decisiones, se seleccionará el biodigestor que mejor se adapte a las condiciones del sitio donde se encuentra ubicada la hacienda Galpón (Lara, 2011).

3.9.2. Definición de términos considerados en la matriz de decisiones

En la matriz de decisiones se deben caracterizar los términos básicos más relevantes a la hora de seleccionar un tipo de biodigestor, el mismo debe cumplir los siguientes parámetros técnicos:

a). Tipo de materia prima para el reactor

Es el tipo de biomasa residual con que son alimentados y podrán operar sin ningún problema los diferentes tipos de biodigestores, de acuerdo a su diseño.

b). Vida útil del biodigestor

Se refiere al tiempo de operatividad que tendrá el biodigestor, de acuerdo al tipo o material con el que fue construido.

c). Disponibilidad de área

El área requerida para la implementación del reactor es un factor fundamental en la toma de decisiones. La poca disponibilidad de terreno o el alto costo del mismo pueden influir de manera decisiva en la factibilidad del proyecto a ejecutar.

d). Costos de implementación

Este es un factor muy importante en el diseño de un biodigestor porque se considerarán los costos de ingeniería, construcción, operación y mantenimiento.

f). Materiales de construcción

Este concepto se refiere a la disponibilidad de los materiales, modelo del reactor y el grado de complejidad en la construcción del tanque.

g). Operación y mantenimiento del reactor

Bajo este parámetro se agrupan principios que están relacionados con el funcionamiento y el mantenimiento del biodigestor, para garantizar el proceso de digestión anaeróbica programada de acuerdo a la factibilidad, disponibilidad y confiabilidad de la producción de biogás.

h). Rendimiento del biodigestor

Es un término muy importante en la toma de decisión, ya que pone énfasis en la productividad y la eficiencia que tiene el biodigestor.

3.10. Cálculos y dimensionamiento del biodigestor de domo fijo

Para el dimensionamiento del biodigestor de domo fijo chino, se utilizaron ecuaciones y se realizaron cálculos de ingeniería, de esta forma se determinaron

los parámetros geométricos del tanque y el gasómetro, los cuales se dibujaron en el programa de Auto CAD.

3.11. 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 siguiente:

- Construcción de los tanques tipo “Batch”
- Ejecución del ensayo con los biodigestores tipo “Batch”
- Análisis físico del biogás obtenido

3.12. Construcción de los reactores tipo “Batch”

Para la ejecución del experimento se construyeron dos tanques en lámina de acero inoxidable (no influyen en el proceso anaeróbico), ambos a escala de laboratorio tipo “Batch”. En este tipo de reactor la carga del estiércol se realiza una sola vez y se descarga cuando finaliza el proceso de biodegradación.

3.12.1. Método y materiales utilizados en la construcción de los reactores

La construcción de los dos tanques se realizó en lámina de acero galvanizado de un espesor de 1,58 mm (1/16”), cada uno 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 3.6 se puede observar el sistema de agitación manual tipo manivela.

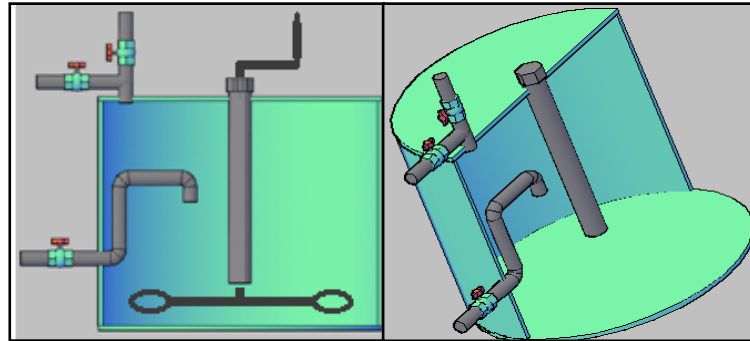


Figura 3.6. Biodigestor tipo batch utilizado en el experimento.

Finalmente, se tiene el gasómetro (figura 3.7), 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 3.7. Gasómetro utilizado para el experimento.

3.13. Ejecución del ensayo con los biodigestores 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 para los dos biodigestores: se pesó el estiércol del ganado vacuno, 10 000 gramos en total y se agregó 15 000 ml de agua sin cloro, este

procedimiento se realizó para cada reactor, asumiendo la relación 1:1,5 sugerida por Hilbert (2008). Luego se diluyó hasta formar una mezcla homogénea; se tomó la lectura del pH y su temperatura (ver Anexo 2), en estas condiciones se cargó a los dos tanques.

Monitoreo de la producción de biogás: una vez cargados los dos reactores con la materia prima, se los colocó dentro de una cubierta que está forrada con plástico de invernadero, el mismo que tiene una área de 6,25 m² con una altura de 1,80 m y su estructura es de madera, el objetivo primordial es formar un micro clima que ayude a mantener una temperatura óptima para el proceso de biodegradación de la materia orgánica (ver Anexo 10). El monitoreo ejecutó desde el 3 de octubre hasta el 25 de noviembre del 2013 (ver Anexo 3 y 4).

Agitación: los dos tanques reactores cuentan con un sistema de agitación manual tipo manivela, en el interior del tanque se encuentran las espas, las mismas que son las encargadas 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 los biodigestores tipo Batch “con y sin” aislamiento térmico, se ejecutaron manualmente 3 y 8 movimientos circulares (360°) durante todo el día.

3.13.1. Ensayo 1: biodigestor tipo Batch sin aislamiento térmico

Es un prototipo de biodigestor tipo Batch sin aislamiento térmico (B1), que posee características herméticas, por su sello hidráulico que realiza internamente la tubería por donde ingresa la biomasa.

3.13.1.1. Materiales

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 3.8 muestra un biodigestor sin aislamiento térmico 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 3.8. Biodigestor sin aislamiento térmico.

3.13.1.2. 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 siguiente horario: 8H00, 14H00 y 21H00 horas. En el Anexo 3 se encuentra el formato mencionado, para luego transcribir en una hoja de cálculo y realizar su respectivo análisis técnico (Anexo 4). Las muestras de biogás utilizadas para medir la cantidad de partículas de metano fueron recogidas en una jeringa de 60 ml (ver Anexo 9).

3.13.1.3. 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. En la figura 3.9 se puede observar la medición realizada directamente en campo.



Figura 3.9. Instrumento HANNA HI 9813-6N.

La temperatura del medio ambiente se midió con un termómetro analógico tipo bolígrafo de carátula, que tiene un rango de -10 a 140 °C. La figura 3.10 muestra el termómetro tipo carátula.



Figura 3.10. 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 3.11 muestra la ubicación del instrumento de medida.



Figura 3.11. 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 (ver Anexo 16). La figura 3.12 muestra el sensor.

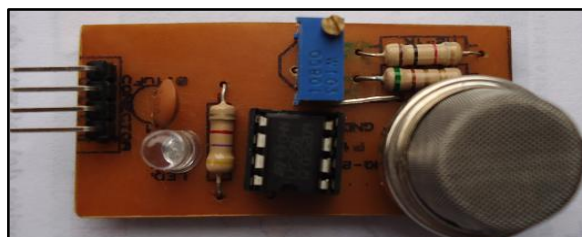


Figura 3.12. Sensor de metano SAW-MQ2.

3.13.2. Ensayo 2: biodigestor tipo “Batch” con aislamiento térmico

El prototipo de biodigestor con aislamiento térmico (B2), se encuentra recubierto con una capa aislante de fibra de vidrio, el mismo que es aplicado para disminuir la transferencia de calor por conducción, de esta forma no permitirá perder energía calorífica del sustrato cuando se encuentre en la etapa de biodegradación.

3.13.2.1. Materiales

Se utilizó un tanque reactor, lana de vidrio de un espesor de 25 mm, una termocupla tipo “K”, un sensor de presión HGRADE-MV 15PSI-D, dos llaves de globo, un manómetro (redundante), tubería de salida de biogás, una tarjeta análogo-digital PCI-6120 DAQ-NI y laptop HP-Pavillon 1140-go con la herramienta LabView 7.1 de National Instruments (NI). En la figura 3.13 se observa los elementos para llevar a cabo el monitoreo de la biodigestión anaeróbica producida por las excretas del ganado vacuno.

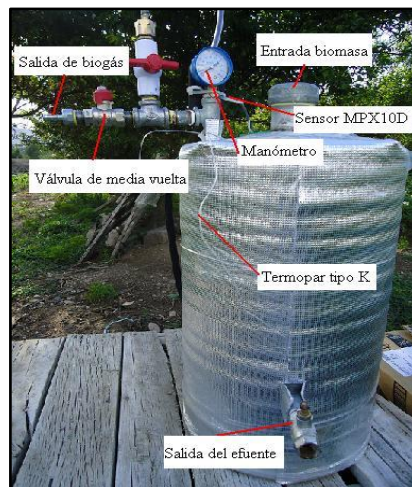


Figura 3.13. Biodigestor con aislamiento térmico y monitoreo.

Además de tener recubrimiento térmico el reactor, fue necesario buscar alternativas que mejoren la producción de biogás, una excelente alternativa es tener un micro clima a través de una estructura para invernadero y contar con un sistema de agitación tipo manivela. 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. En la figura 3.14 se observa el ambiente gráfico del software.

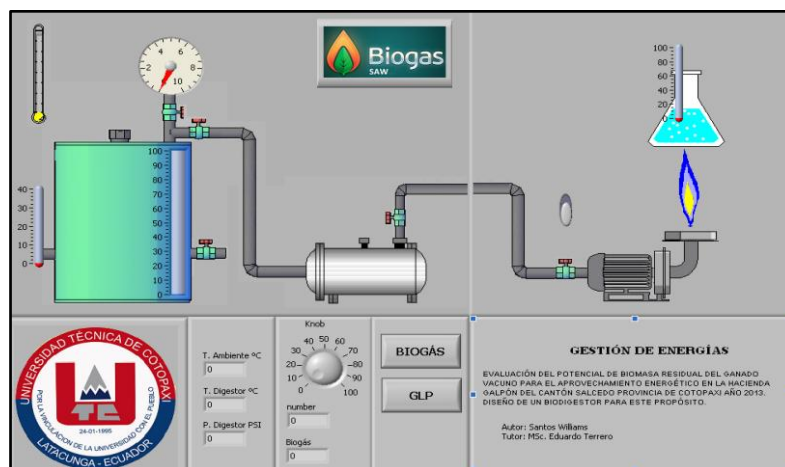


Figura 3.14. Pantalla del software SAW BIOGÁS.

3.13.2.2. Equipo e instrumentos

En el diagrama de bloques de la figura 3.15 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 (ver Anexo 11).

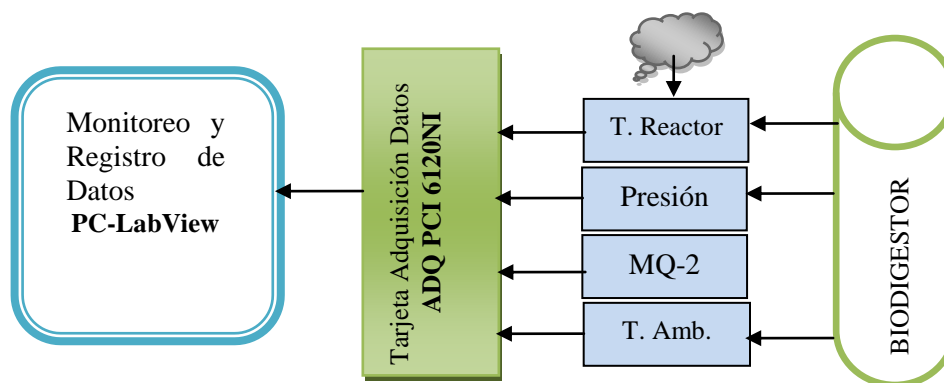
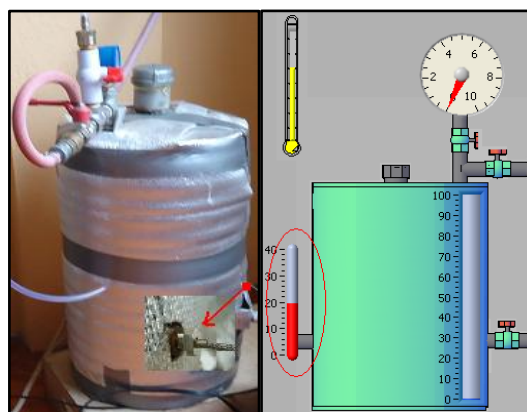


Figura 3.15. Diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos.

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 3.16 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-BIOGÁS que fue diseñado para este propósito, en la figura 3.16 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 11, columna 3 se visualiza el valor de temperatura registrado por el software y almacenado en una matriz de datos.

Se debe tener precaución con los cambios bruscos de temperatura en el biodigestor, pues la manera más fácil de contrarrestar esos cambios violentos de temperatura es aplicando un material aislante; dichas variaciones ocurren en los días soleados y en las noches frías, es donde se deben amortiguar el cambio climático por la gran sensibilidad que presentan estas bacterias microorgánicas a las variaciones de temperatura (Hilbert, 2008).

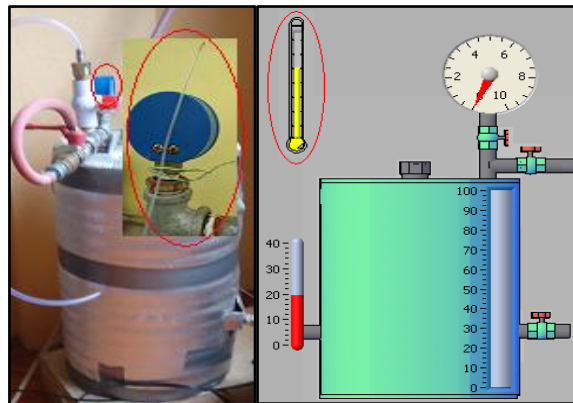


a) b)

Figura 3.16. 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 3.17 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 36 días de la investigación dando una máxima temperatura de 24,4 °C y mínima de 5,9 °C. Los mencionados datos se encuentran archivados en la columna 2 del Anexo 11.



a) b)

Figura 3.17. a) Biodigestor con termopar tipo “K”, b) Simulación del termopar en la pantalla del PC.

c) Potencial de hidrógeno

El valor de acidez (pH) es muy importante para la producción de biogás, por esta razón, en la presente investigación se tomaron datos a diario; el primero a las 08H00 y el segundo a las 18H00 horas, permitiendo así obtener un control efectivo del pH. Hilbert (2008) sugiere 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 3.18 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 proporcionan valores decimales (figura 3.18 literal “a”). En el Anexo 11 columna 8 se encuentran registrados los

valores de pH del biodigestor. Teniendo al inicio picos de variables de pH, pero conforme pasa el tiempo se va estabilizando hasta tener valores de pH homogéneos.

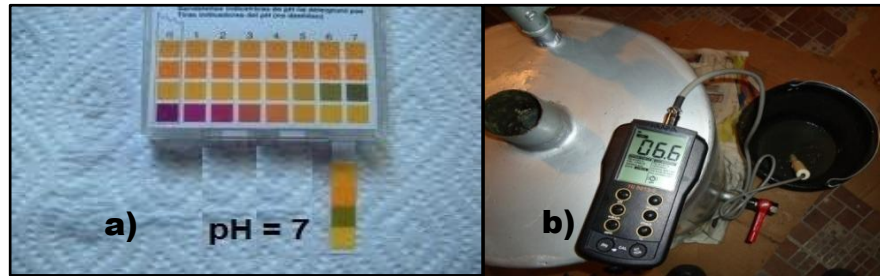


Figura 3.18. a) Cintas de tornasol, b) Instrumento HANNA H9813-6N.

d) Volumen de biogás

Para almacenar el biogás generado se utilizó una boya de carro (gasómetro) de una capacidad volumétrica de 25 litros (figura 3.19), la misma se une al biodigestor mediante una manguera de presión. En el Anexo 11 columna 7 se encuentran los datos del volumen generados por el biodigestor.

La producción de biogás en el reactor es continua a lo largo de las 24 horas del día; no ocurre lo mismo con el consumo, que por lo general está concentrado en una fracción corta de tiempo. Todos los sistemas de reactores no superan como máximo 1,42 psi de presión, encontrándose una media de 0,5 psi, presión a la cual funciona correctamente los artefactos domésticos (Hilbert, 2008).



Figura 3.19. Gasómetro para almacenamiento de biogás.

e) Presión interna del reactor

La medición de presión interna del reactor se realiza con un sensor de estado sólido HGRADE-MV 15PSI D, el mismo que tiene una escala entre 0-15 psi, suficiente para este tipo de ensayo; en el Anexo 11 columna 4 se presentan los valores de presión interna del biodigestor. Además, se puede visualizar la presión en un manómetro analógico redundante colocado en la misma tubería, con un rango comprendido entre 0-50 psi, pero que no era muy sensible ante valores mínimos de presión. En la figura 3.20 se visualiza la ubicación del sensor y del manómetro.



Figura 3.20. Manómetro y sensor de presión colocado en el reactor.

3.14. Análisis físico del biogás

El objetivo primordial del presente proyecto es evaluar el poder calórico del biogás que producen los biodigestores tipo “Batch”. Para esto se necesita determinar el porcentaje de partículas de metano contenidos en el biogás y realizar una prueba de inflamabilidad.

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.

3.14.1. Determinación de la cantidad de partículas de metano

La cantidad de partículas de metano (en ppm) presentes en el biogás determinará el poder calórico, el mismo será medido por un sensor de estado sólido SAW-MQ2. Según Gilbert (2008) 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
- Laptop hp
- Jeringa de 60 ml

Procedimiento

Se utilizaron 60 ml de biogás tomados directamente de los biodigestores B1 y B2, 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 21).

Las muestras de biogás para su respectivo análisis se tomaban cada dos días, dichos valores se presentan en el Anexo 9.

3.14.2. Análisis comparativo de una propiedad termodinámica

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 (Vergara, 2008).

Y para la prueba del biogás se utilizó el gas metano que se producía diariamente en el biodigestor 2 tipo “Batch”, procedente de la descomposición anaeróbica de las excretas del ganado vacuno.

En la ejecución del ensayo se realizaron tres pruebas por cada tipo de gas, una cada día, buscando que cumplan dos condiciones fundamentales: primero, 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 (ver Anexo 22). Finalizado el ensayo con el GLP, inmediatamente se cargaba el gasómetro con el biogás y se realizaba el mismo procedimiento antes indicado.

Antes de iniciar el ensayo se debe registrar los valores de: presión atmosférica, volúmenes de los gases, temperatura ambiente y del agua (ver Anexo 17).

3.15. Conclusiones del capítulo

- ✓ Se estableció la metodología de la investigación y mediante la misma se desarrolló el diseño del proceso investigativo. También, se realizó un ensayo experimental tomando como base la población de estudio y la muestra que será utilizada para la ejecución del proyecto.

- ✓ Se seleccionó como base para la construcción un prototipo de biodigestor tipo “Batch”, que será aplicado en el desarrollo de la investigación. Con la muestra seleccionada se llenaron los biodigestores sin y con aislamiento térmico y se determinaron las variables físicas que intervienen en el proceso de la biodegradación de la materia orgánica.

- ✓ Se estableció el procedimiento para la determinación y posterior comparación del poder calórico del gas licuado de petróleo y el biogás, lo anterior permitirá determinar las características energéticas del gas producido con el empleo del biodigestor.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Introducción

Los resultados de una investigación permiten inferir si se han cumplido los objetivos propuestos para la misma. Además, posibilitan al investigador llegar a conclusiones de la factibilidad del trabajo realizado. Por tales razones el **objetivo** del presente capítulo es analizar los resultados obtenidos en la investigación a partir de su interpretación.

4.2. Análisis de los recursos energéticos utilizados por la hacienda Galpón

Se caracterizan las fuentes de energía que son utilizadas por la hacienda, donde se aprecia que la energía eléctrica, el gas licuado de petróleo (GLP), la leña y los fertilizantes sintéticos forman parte de los recursos energéticos más utilizados en las actividades productivas de la hacienda.

4.2.1. Consumo de energía eléctrica

La hacienda ha registrado un consumo de energía eléctrica durante el año 2013, un total de 7 767 kWh, representando 633,79 USD con un promedio de 52,8 USD por mes. Como se puede observar en la figura 4.1 en los meses de marzo y diciembre se experimentó la mayor demanda eléctrica, debido a que en estas fechas existió gran consumo de productos lácteos en el mercado local, por las festividades de Semana Santa y Navidad. Concluyendo así, que la energía eléctrica es un gasto significativo para la administración de la hacienda.

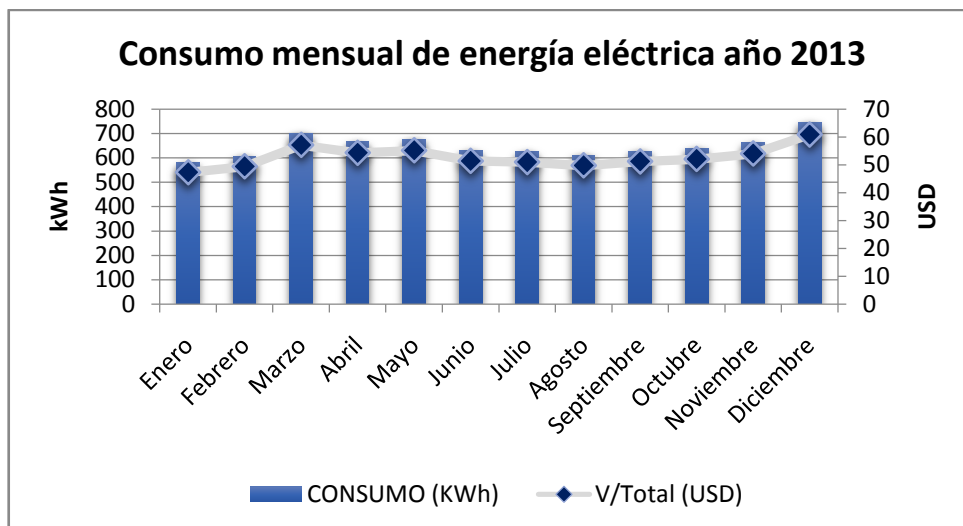


Figura 4.1. Consumo por mes de la energía eléctrica del contador N° 75865.

4.2.2. Análisis del consumo anual de gas licuado de petróleo

En la hacienda Galpón se procedió a solicitar a la administración las facturas de pago del gas de uso industrial (no subsidiado) de 45 kg, cilindros que se compró durante el año 2013 (ver Anexo 12). En la figura 4.2 se puede observar que en los meses de marzo, abril, julio, agosto, noviembre y diciembre existió mayor consumo de gas licuado de petróleo (3 cilindros de 45 kg) debido a dos factores, por las bajas temperaturas de la zona y el incremento de la demanda de productos lácteos.

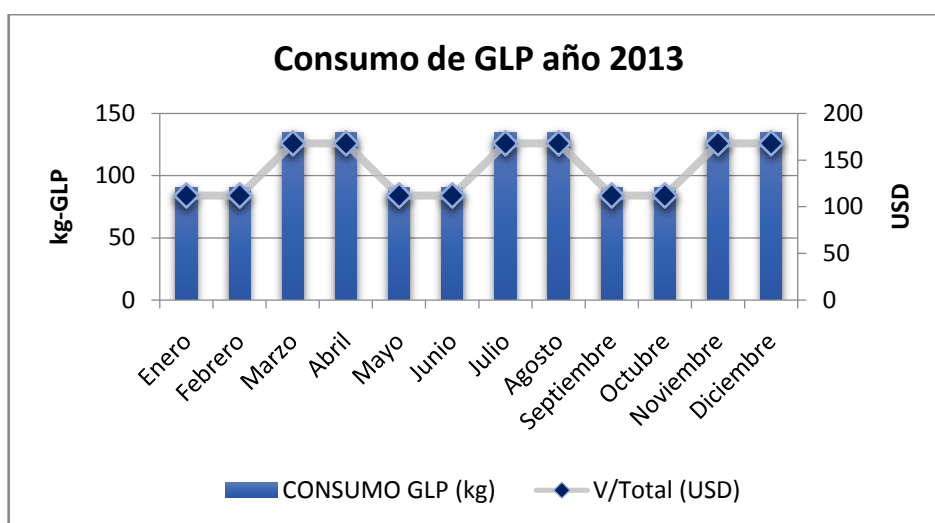


Figura 4.2. Consumo por mes de los cilindros 45 kg de GLP.

El consumo de GLP durante el año 2013 fue de 30 cilindros de 45 kg, representando un total de 1 678,00 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 hacienda, la misma que puede ser reemplazada por biogás al aprovechar las excretas del ganado vacuno mediante el proceso de bioconversión.

4.2.3. Análisis del consumo anual de leña

De acuerdo a estudios efectuados por la Agencia Internacional de Energía (IEA), la leña seguirá siendo el principal combustible 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 hacienda se utiliza la leña por tradición milenaria, siendo un recurso energético casi inagotable, y de bajo poder adquisitivo. El mismo es utilizado en los fogones, chimeneas y en los hornos de leña. En la figura 4.3 se puede observar el consumo de los kilogramos de leña por mes. Donde, el mayor consumo fue en febrero (30 kg de leña) debido a que hubo temperaturas muy bajas; y en octubre se registró un consumo mínimo (5 kg de leña) porque se tenían días calurosos y no se utilizó la chimenea.

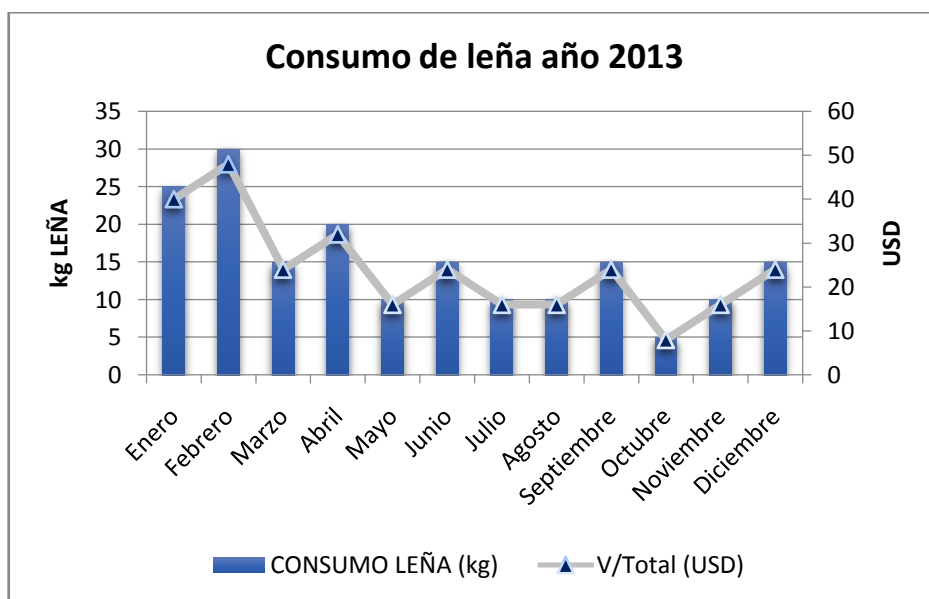


Figura 4.3. Cantidad de leña utilizada por cada mes.

4.2.4. Análisis del consumo anual de abonos químicos

La compra de abonos químicos que realizó la administración de la hacienda para los diferentes cultivos propios de la zona, fueron en total 20 quintales de urea a un costo de 960,00 USD durante el año 2013; en el Anexo 14 se detallan claramente estos valores. Por lo tanto, se procedió a solicitar a la administración todas las facturas de las compras realizadas a la tienda agroquímica, durante ese periodo que se adquirió los productos químicos. En la figura 4.4 se puede observar que en febrero existió una compra de fertilizante sintético de 400 kg, debido a que al iniciar el año se proceden a fertilizar todos los potreros y las áreas de cultivo.

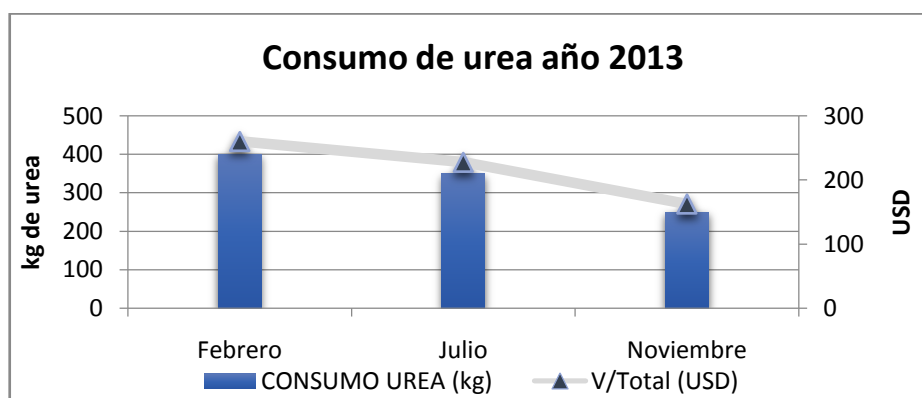


Figura 4.4. Consumo de urea por cada ciclo de fertilización.

4.2.5. Consumo de portadores energéticos en la hacienda Galpón

Con el propósito de verificar y analizar el consumo de portadores energéticos consumidos por la hacienda Galpón en el año 2013, para las diferentes actividades cotidianas y de producción. En la figura 4.5 se representan en forma de barras los consumos de portadores energéticos así teniendo: en primer lugar a la energía eléctrica con 7 767 kWh los mismos que fueron consumidos por los artefactos electrodomésticos y los equipos de la producción láctea; en segunda instancia se tiene el consumo de GLP con 1 350 kg utilizados por el sistema de calentamiento de agua sanitaria y de la quesería; en tercer lugar se encuentra la leña con 180 kg de biomasa vegetal incinerados en las chimeneas y en ciertas ocasiones por el fogón y por último se tiene el empleo de 1 000 kg de abono químico, necesario para fertilizar todas las áreas de cultivo pertenecientes a la hacienda. La información recopilada servirá de referencia para proyectar a nuevas inversiones

dentro de la hacienda. Adicionalmente, en el Anexo 14 se tabulan cada mes todos estos consumos energéticos utilizados por la hacienda.

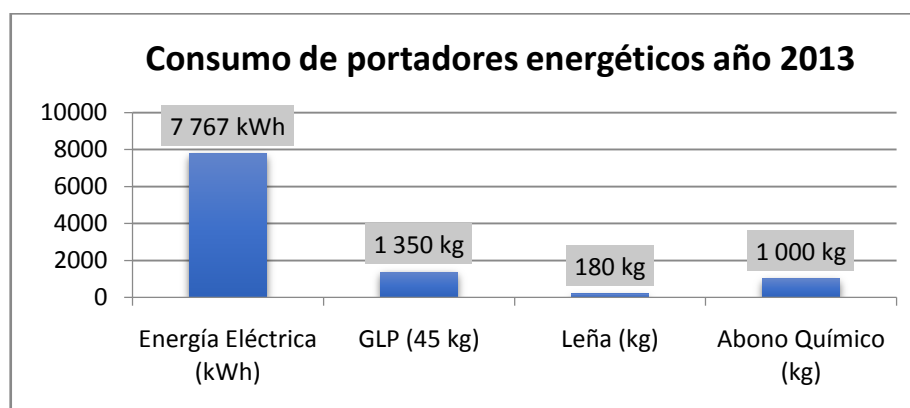


Figura 4.5. Consumo de portadores energéticos en la hacienda Galpón.

4.2.6. Análisis económico de los portadores energéticos

Una vez analizado el costo económico que generan los portadores energéticos a la administración de la hacienda, se puede concluir que el mayor valor de inversión recae en el consumo de gas licuado de petróleo, con un rubro de 1 678,00 USD que representa 2,6 veces más que el consumo de energía eléctrica y abono químico (ver Anexo 14). En la Figura 4.6 se representa en forma de barras los costos de estos portadores energéticos.

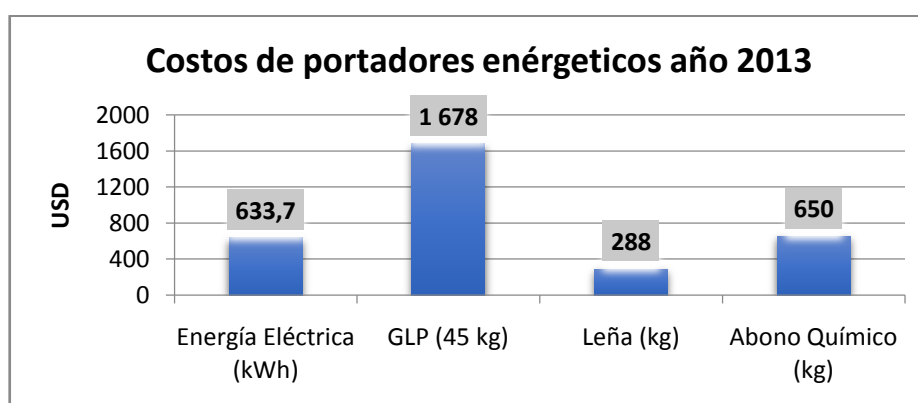


Figura 4.6. Costos de portadores energéticos utilizados por la hacienda Galpón.

4.3. Cantidad de biomasa residual del ganado vacuno de la hacienda Galpón

La biomasa residual del ganado vacuno recopilada de los patios del establo, se tabularon en el Anexo 14, donde se puede verificar que los 205 animales presentes

en los corrales, consiguen generar una biomasa de 1 953 kg de estiércol por día y que puede ser aprovechado en un biodigestor para la producción de biogás y bioabono. En la figura 4.7 se observa que el mayor porcentaje de biomasa residual es de las vacas con un 56,3 % y la mínima de los terneros con 10,7 %, estos valores fueron calculados, teniendo en cuenta que solo se dispondrá del 60 % de la totalidad de la biomasa, es decir 1 172 kg de excretas disponibles para el biodigestor.

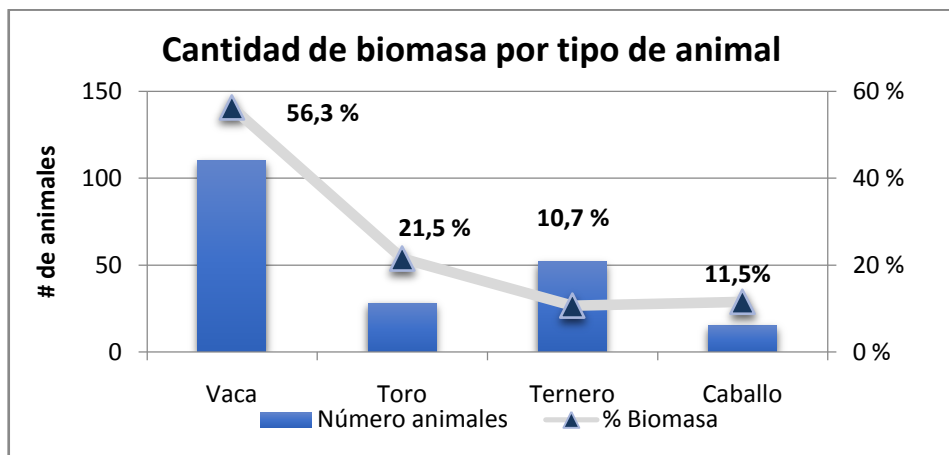


Figura 4.7. Porcentajes representativos de la biomasa por tipo de animal.

4.4. Determinación de la potencialidad en la biomasa del ganado vacuno

El ensayo realizado con el estiércol del ganado vacuno perteneciente a la hacienda Galpón del cantón Salcedo, se inició el 03 de octubre del 2013, donde se realiza la carga de la biomasa residual a los biodigestores tipo Batch (cierre hermético), el mismo que finaliza el 22 de noviembre del mismo año, contabilizando un total de 50 días del tiempo de retención hidráulica de la biomasa. El volumen de mezcla de las excretas del ganado vacuno que se utilizó en el biodigestor se describe en el capítulo 3 literal 3.13. En el tanque reactor se debe mover manualmente la manivela que conecta a las aspas para producir una mezcla interna de la biomasa y así evitar la formación de una costra espumosa. La presión interna del reactor empezó a marcar recién a los 18 días de haber cerrado el biodigestor. Para determinar la potencialidad de la biomasa del ganado vacuno 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 (Stuckey,1983), 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).

4.4.1. Cuantificación de la biomasa utilizada para los biodigestores

Para iniciar los ensayos en los biodigestores con y sin aislamiento térmico (Biodigestor 1-B1; Biodigestor 2-B2), se necesitaron mezclar un total de 20 kg de excretas del ganado vacuno y 30 litros de agua, obteniendo una composición neta de 50 litros de biomasa. En la tabla 2 del Anexo 15 se encuentran detallados estos valores para cada tipo biodigestor, tomando en cuenta que la relación de la mezcla estiércol-agua es de 1:1,5 tal como sugiere Hilbert (2008). En la figura 4.8 se observa la distribución del espacio del tanque reactor; donde, el 70 % es ocupado por la biomasa y el 30 % restante es un espacio libre para la interacción del proceso anaeróbico encargado de producir el biogás. En el mismo Anexo se encuentra la tabla 3, donde está representado los valores de la distribución del espacio para la biomasa y el gasómetro.

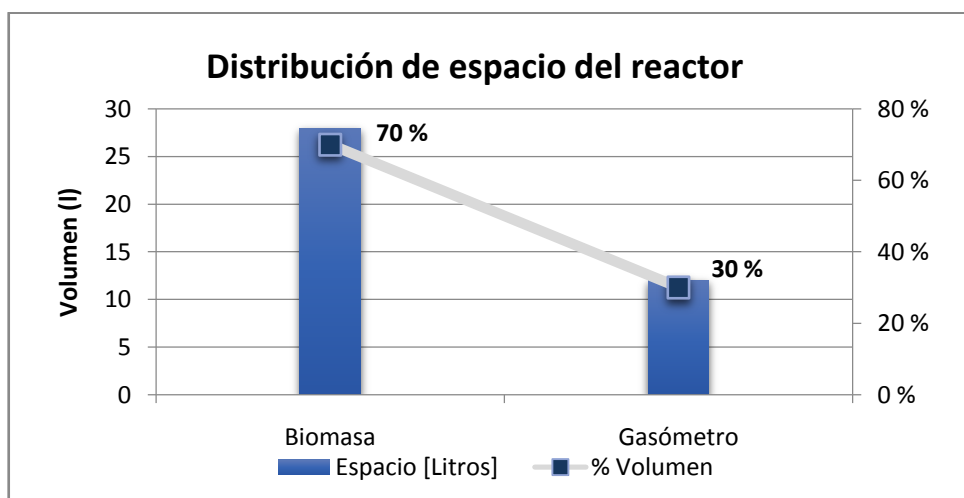


Figura 4.8. Curva representativa de los porcentajes del reactor.

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

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

4.4.2.1. 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 los biodigestores 1 y 2 tipo “Batch”, era fundamental medir la temperatura de la mezcla estiércol-agua, antes de llenar los reactores. Dicha temperatura inició con 18,1 °C medidos directamente en la mezcla (ver Anexo 2). Posteriormente, se registraron estos valores de temperatura en una base de datos, durante todo el tiempo que perduró el ensayo (ver Anexo 4). En la figura 4.9 se tiene la curva del biodigestor 1 (resumen de datos), donde se puede verificar claramente que a partir del día 26 la temperatura del sustrato empieza a ingresar dentro del rango mesofílico (entre 20 °C y 40 °C), punto para tener la mayor producción de biogás.

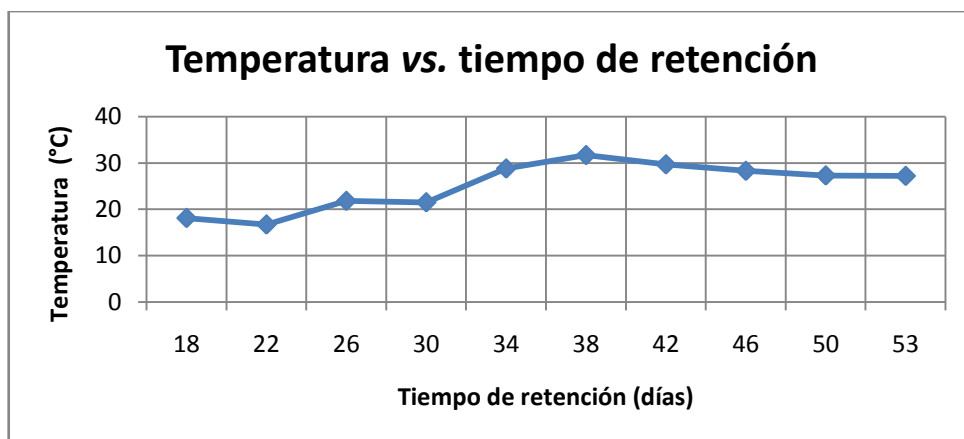


Figura 4.9. Temperatura del biodigestor 1 vs. temperatura de retención.

En el experimento ejecutado con el biodigestor 2, los registros de datos se encuentran recopilados en el Anexo 11. En la figura 4.10 se presenta un resumen de los datos de temperatura; y se observa que a partir del día 24, la temperatura

del sustrato alcanza el rango mesofílico (de 20 °C a 40 °C), donde se tiene la mayor producción de biogás. De acuerdo al análisis efectuado a estas dos curvas, el biodigestor 2 alcanza su rango mesofílico un día antes que el reactor 1.

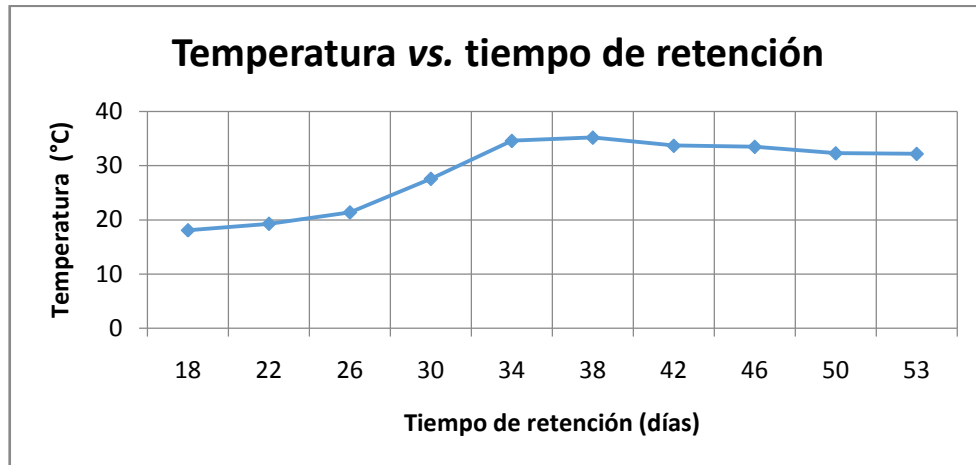


Figura 4.10. Temperatura del biodigestor 2 vs. temperatura de retención.

4.4.2.2. Control de pH en los biodigestores

Los valores de pH se midieron directamente con la sonda del instrumento HANNA HI 9813-6. A continuación se realiza el análisis para los dos ensayos.

En el experimento realizado con el reactor 1 durante los 36 días, periodo que se midió el pH de la mezcla estiércol-agua. El mismo inició con un valor de pH ácido ($\text{pH} < 7$). Consecutivamente se siguieron registrando las mediciones del pH al efluente, durante el tiempo de retención hidráulica de la materia orgánica. Obteniendo así los siguientes valores promedios: en los días 18 al 36 el pH es 6,6; para los días 37 y 42 el pH fue de 7,1; y en los días 43 al 53 se tuvo un pH de 6,7. Determinando que en los días 32 al 42 el pH fue ligeramente alcalino ($\text{pH} > 7$) favoreciendo directamente a la producción del gas metano. Comparando estos valores de pH con el ensayo realizado por Martina (2005), se evidencia que tienen gran similitud, lo que demuestra que se tiene gran confiabilidad en la presente investigación. En la figura 4.11 se muestran los valores de pH del biodigestor 1, donde a partir del día 18 al 30 el pH asciende hasta el valor neutro y en los días 34 al 42, es ligeramente alcalino, luego descienda a ser ácido.

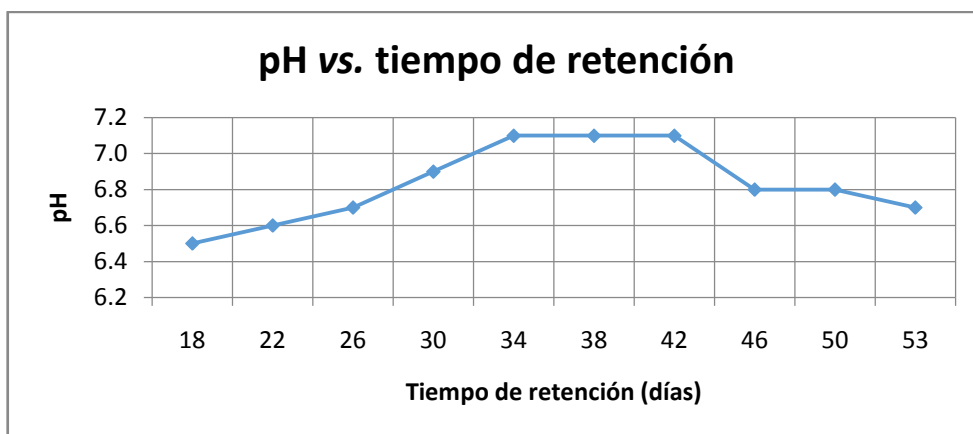


Figura 4.11. El pH del biodigester 1 vs. tiempo de retención.

Al analizar el biodigester 2 durante los 36 días, ciclo en el que se midió el pH de la biomasa líquida. La mezcla ingresada al reactor inició con un pH ácido ($\text{pH} < 7$), y paulatinamente se realizaron medidas del pH durante los días de retención hidráulica de la materia orgánica del ganado vacuno, resultando así los siguientes valores promedios: en los días 18 al 25 el pH es de 6,6; para los días 26 y 35 el pH es 6,9; entre los días 34 al 40 se tuvo un pH de 7,2 y finalmente en los días 41 al 53 el pH fue de 7,0. Determinando así que en los días 34 al 40 el pH fue ligeramente alcalino ($\text{pH} > 7$) favoreciendo la producción de metano. Comparando los valores de pH con el ensayo realizado por Martina (2005), se tienen mejores resultados porque el pH se mantuvo ligeramente superior al neutro, favoreciendo mayoritariamente a la producción de biogás. En la figura 4.12 se observa que en el día 29 alcanza el valor neutro ($\text{pH} = 7$) y permanece ligeramente superior hasta finalizar el ensayo.

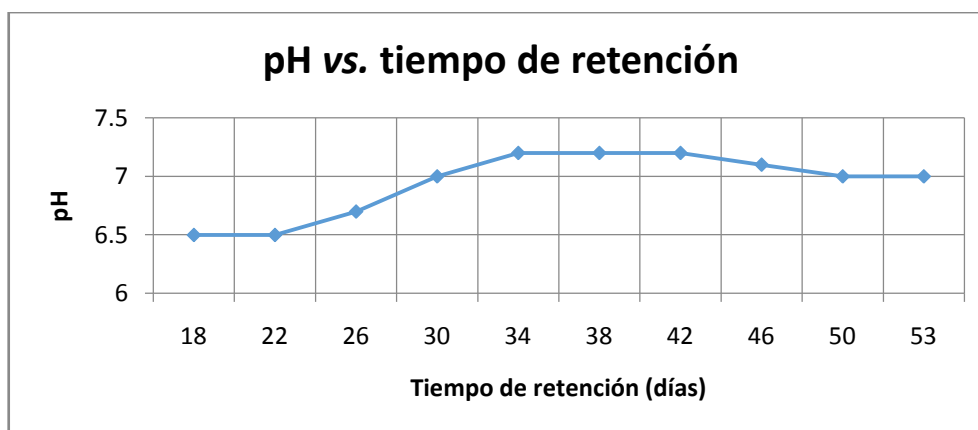


Figura 4.12. El pH del biodigester 2 vs. tiempo de retención.

4.4.2.3. Producción de biogás

El volumen de biogás producido por los biodigestores fue almacenado en sus respectivos gasómetros aforados, a continuación se realiza un análisis de los volúmenes obtenidos en cada reactor.

Los valores máximos de volumen de biogás que reportó el primer biodigestor es: 1 491,8 ml, 1505,2 ml y 1494,1 ml; que corresponden a los días 38, 39 y 40 del tiempo de retención hidráulico del proceso de biodegradación anaeróbica de la biomasa residual del ganado vacuno. En la figura 4.13 se puede observar una curva ascendente desde el día 18 hasta el 39, en la cual se obtiene la mayor producción de biogás, luego empieza a decrecer paulatinamente hasta la finalización del experimento. Tiempo en la cual se registró una producción de biogás de 31,1 litros, en los 36 días que duró el ensayo. Para mayor apreciación de los valores, en el Anexo 4 se encuentra la tabla con todos los datos registrados.

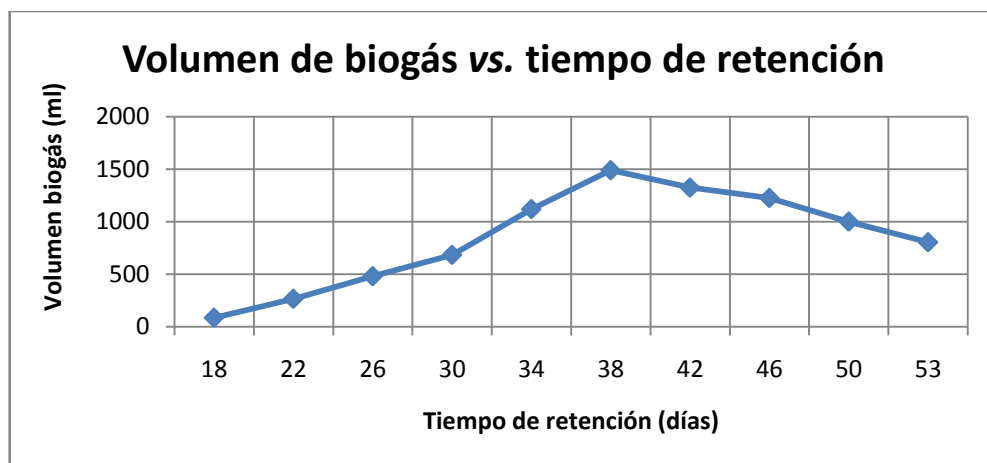


Figura 4.13. Volumen de biogás por el tiempo de retención biodigestor 1.

En el segundo experimento se obtuvieron los siguientes volúmenes: 3 522,1 ml, 3 619,6 ml, 3 564,1 ml, 3 571,4 ml y 3 640,1 ml; los mismos que corresponden respectivamente a los días 34 al 38, del tiempo de retención hidráulico del proceso anaeróbico de la biomasa residual del ganado vacuno. En la figura 4.14 se aprecia una curva pronunciada ascendente desde el día 30 hasta el día 34 donde se tiene la mayor producción de biogás, manteniendo este pico máximo hasta el día 42 con más de 3 000,00 mililitros, y a partir de esa fecha desciende su producción a

valores inferiores, hasta culminar el ensayo. La producción total de biogás en los 36 días fue de 75,2 litros (ver Anexo 11).

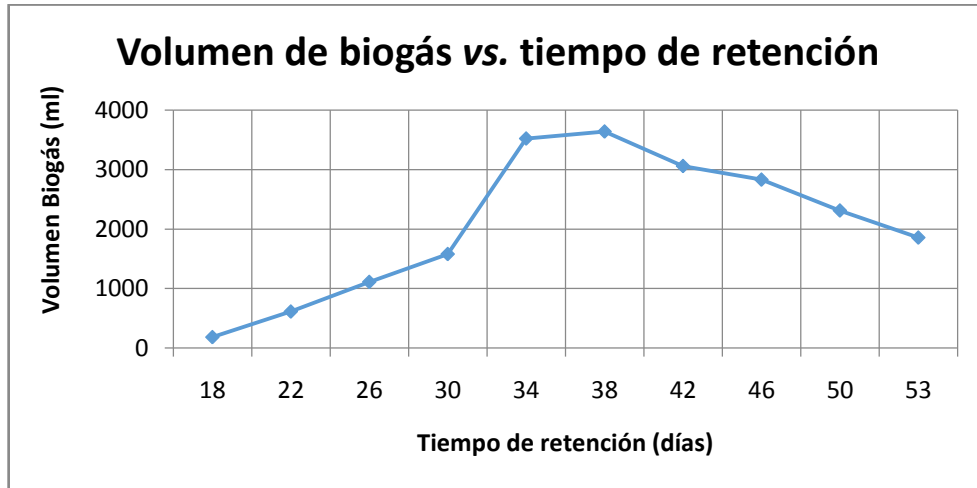


Figura 4.14. Volumen de biogás por el tiempo de retención biodigestor 2.

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

Para determinar las partículas del gas metano producidos por los dos biodigestores se tomaron muestras directamente de los tanques reactores con una jeringuilla de 60 mililitros, el mismo se aplicaba directamente al sensor SAW BIOGÁS y de esta manera se podía obtener la cantidad de partículas de metano presentes en el biogás, a continuación se describen los procedimientos realizados a los dos biodigestores.

En el experimento realizado al biodigestor 1 tipo “Batch” se recopiló muestras cada dos días, a partir del 21 de octubre del tiempo de retención hidráulico, para así poder determinar la cantidad de partículas de metano que contiene el biogás. Los datos obtenidos con el sensor de gas metano SAW-MQ2 en el ensayo, arrojó un promedio de 9 806,9 ppm de metano contenido en el biogás (ver Anexo 9), dando un porcentaje de 49 % de CH₄. Los porcentajes recomendables que debe tener el biogás de acuerdo a Hilbert (2008) es de 60 % CH₄ y 40 % de CO₂, pero al no cumplir el biodigestor 1 con el porcentaje de metano sugerido por el autor antes mencionado, se decide no realizar cálculos para determinar el poder calórico producido por éste reactor. En la figura 4.15 se puede apreciar un valor máximo alcanzado en el día 39 con un 59,80 % y el resto son valores inferiores.

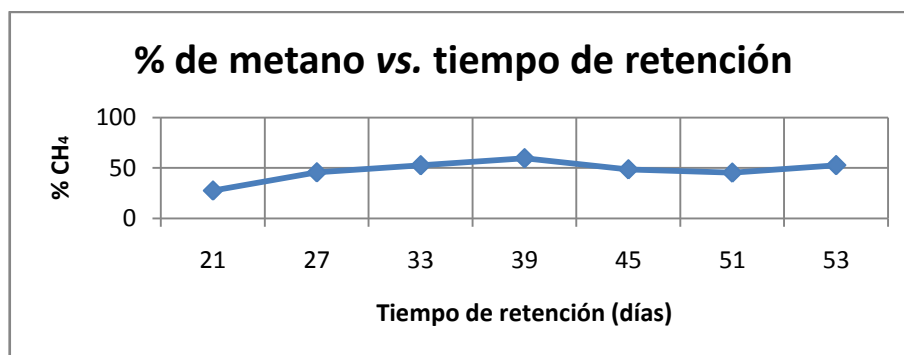


Figura 4.15. Porcentaje de metano por el tiempo de retención del biodigestor 1.

En el biodigestor 2 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 9), dando un porcentaje de 61,2 % de CH₄. Concluyendo así, que el ensayo realizado con el biodigestor 2 tiene un porcentaje de metano ligeramente superior al recomendado por el autor antes mencionado. En la figura 4.16 se observa que a partir del día 27 la curva del porcentaje de metano permaneció casi constante y ligeramente superior al 60 %.

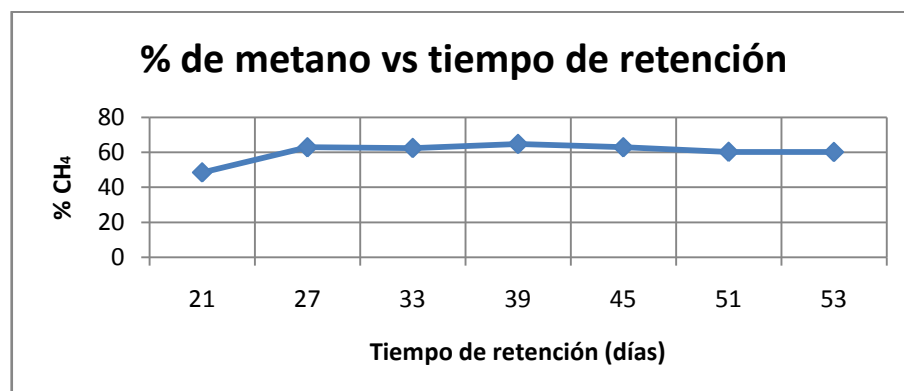


Figura 4.16. Porcentaje de metano por el tiempo de retención del biodigestor 2.

4.4.4. Análisis de datos para el muestreo experimental aplicando Taguchi

En el presente experimento se ha realizado varias pruebas preliminares en diferentes escenarios con el fin de buscar la mejor alternativa para el aprovechamiento energético del estiércol del ganado vacuno en la hacienda

Galpón, en cuanto a pruebas de funcionamiento, se definirá cual biodigestor produce la mayor cantidad de partículas de metano presentes en el biogás, la misma que servirá para ser usado en el sistema híbrido de la hacienda, por ello, mediante la técnica de Taguchi, se realizó un diseño de experimentos, con la finalidad de encontrar un equipo eficiente para la producción de biogás, así teniendo como variables descriptivas, el aislamiento y la agitación, las mismas que son presentadas en la tabla 4.1, con sus respectivos niveles.

Tabla 4.1. Rangos para las variables descriptivas.

FACTOR	NIVEL 1	NIVEL 2
Aislamiento	Sin	Con
Agitación	Media	Normal

La variable biodigestor se ha determinado en función de tener o no recubrimiento térmico, con el fin de evitar pérdidas de energía térmica en las paredes del biodigestor y así obtener la mayor producción de biogás.

La agitación mediante aspas, es un mecanismo que permite romper internamente una costra o nata que se forma al interior del biodigestor. Esta interrumpe la producción de biogás. Entonces, se ha tomado dos variables: media y normal, correspondiendo a mezclar durante todo el día 3 y 8 veces, respectivamente.

Se ha elegido un diseño de 2 niveles, 2 factores, con un diseño L-2 para Taguchi, lo que implica que se realizarán 4 experimentos, donde los factores y niveles queda como sigue:

El resultado de los experimentos se presenta en la tabla 4.2, de acuerdo al resultado del software Minitab, nótese que el nivel 1 y 2 corresponde a los rangos de operación de cada variable.

Tabla 4.2. Diseño experimental Taguchi.

	AISLAMIENTO	AGITACIÓN
Experimento1	1	1
Experimento2	2	1
Experimento3	1	2
Experimento4	2	2

Entonces de lo anterior, con los datos de la cantidad de partículas de metano obtenidos en el biodigestor 1 y 2, el diseño experimental queda como se muestra en la tabla 4.3. Dónde, se debe realizar cuatro experimentos con las dos variables, y mínimo tener cuatro réplicas de las muestra del biogás, del mismo gasómetro.

Tabla 4.3. Diseño experimental definiendo valores.

	Aislamiento	Agitación	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Rep. 4	Media	Desv. std
E-1	1	1	9148.3	9149.8	9147.3	9146.5	9147.97	1.42
E-2	2	2	12512.2	12515.4	12514.8	12513.4	12513.95	1.44
E-3	1	1	9797.5	9798.3	9797.2	9799.4	9798.1	0.98
E-4	2	2	13209	13211.4	13209.8	13212.6	13210.7	1.61

Derivado de la tabla 4.3, y haciendo el análisis de datos con el software Minitab, se puede definir lo siguiente:

Para el factor aislamiento, el nivel 2 corresponde a una elevada concentración de partículas de metano que estaría alrededor de 13 000 ppm de CH₄, teniendo un efecto de satisfacción mucho mayor que el nivel 1 (figura 4.17), para el factor agitación, el nivel 2 tiene mejor desempeño, sin embargo este desempeño no están significativo con respecto al nivel 1, sin embargo en la práctica es mejor utilizar el nivel 2 porque se tiene la certeza de romper la costra y homogenizar la biomasa que se encuentra al interior de los biodigestores.

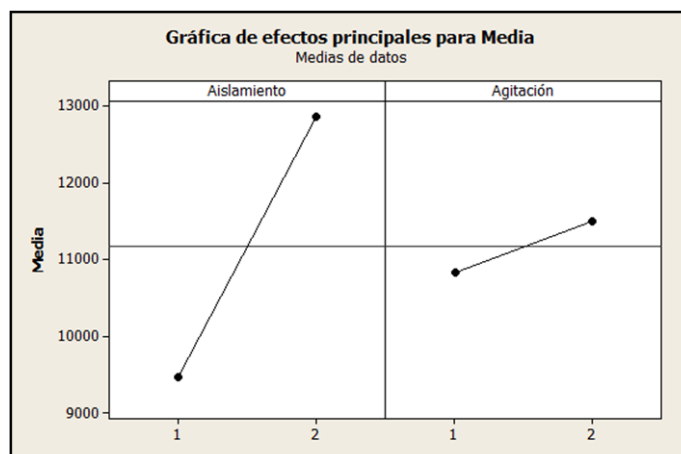


Figura 4.17. Análisis de medias para Taguchi.

En la figura 4.18, se analiza la desviación estándar, de los resultados obtenidos por el software, en el cual se puede concluir que para el factor aislamiento, el nivel 1 tiene mejor desempeño que el nivel 2, pero en la práctica se deberá elegir siempre el nivel 2.

Por otra parte, en el factor agitación, muestra un buen desempeño en el nivel 1, sin embargo este desempeño no es tan significativo como en el nivel 2, pero por circunstancias de operatividad siempre se deberá tomar el nivel 1.

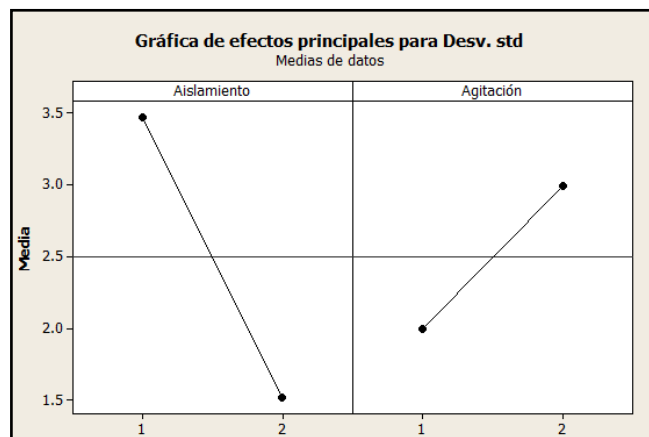


Figura 4.18. Análisis de desviación estándar para Taguchi.

De lo anterior se concluye que el mejor parámetro para producir biogás a partir de las excretas del ganado vacuno de la hacienda Galpón es: implementar un biodigestor con aislamiento térmico y provocar una agitación normal en la mezcla para que no se produzcan las costras y baje la producción del gas metano generado por la degradación de la materia orgánica, al interior del biodigestor.

4.4.5. Cálculo de la masa molecular del biogás

La masa molecular del biogás se calculó de acuerdo a los datos obtenidos del biodigestor 2, donde se obtuvieron 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: 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). 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:

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

La producción de biogás recién comenzó a los 18 días del periodo de retención hidráulica de la biomasa residual del ganado vacuno, esta masa fue calculada en función de la ecuación 2.2 (estado de los gases perfectos) y se detalla los valores en el Anexo 11, columna 9. Como ejemplo se calcula la masa del biogás generada en el día 18, pero en el anexo antes mencionado, se encuentran todos los valores de cada día.

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

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

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

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

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

$$M = 0,0898 \text{ kg (masa de biogás obtenida)}$$

4.4.5.1. Rendimiento del estiércol del ganado vacuno

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

$$\text{rend.} = \frac{0,0898 \text{kg}(\text{gas})}{10 \text{kg}(\text{estiercol})} = 0,00898 \frac{\text{kg}(\text{gas})}{\text{kg}(\text{estiercol})} \cdot 100\%$$

$$\text{Rend} = 0,898 \%$$

Con el rendimiento calculado y la disponibilidad diaria de 1 172 kg/excretas de ganado vacuno, se obtendrían 10,5 kg de biogás, lo que representaría un 70 % de un cilindro de 15 kg de gas de uso doméstico.

4.4.6. 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.

4.4.6.1. Comparación de las masas del butano y el biogás

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

Se calcula la masa del butano (Mbt) contenida en los 5 litros aforados en el gasómetro.

Datos:

Masa molecular del butano = 58,12 kg/kmol

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

$T = 294,96 \text{ °K}$

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

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

Para estos valores, de acuerdo a la ecuación del estado de los gases, se calculó en función de la ecuación 2.2:

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

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

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

Obteniendo una masa $M_{bt} = 0,017904$ kg de butano.

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

Datos:

$$V = 5 \text{ l} = 5000 \text{ m}^3$$

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

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

$$R_{\text{particular}} \text{ del biogás} = 31,566 \text{ kgm/kg } ^\circ K \text{ (obtenido en el literal 4.4.5)}$$

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

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

Obteniendo una masa $M_b = 0,0041377$ kg de biogás.

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

En el presente proyecto se requiere conocer el poder calórico desprendido por el biogás, por esta razón, se realizará un método experimental alternativo donde se quema un gas con características conocidas como es el GLP y de esa forma se puede encontrar el poder calórico del gas incógnita. En la figura 4.19 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 puede apreciar al combustionar 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 $40,2 \text{ } ^\circ C$ (ver Anexo 17).

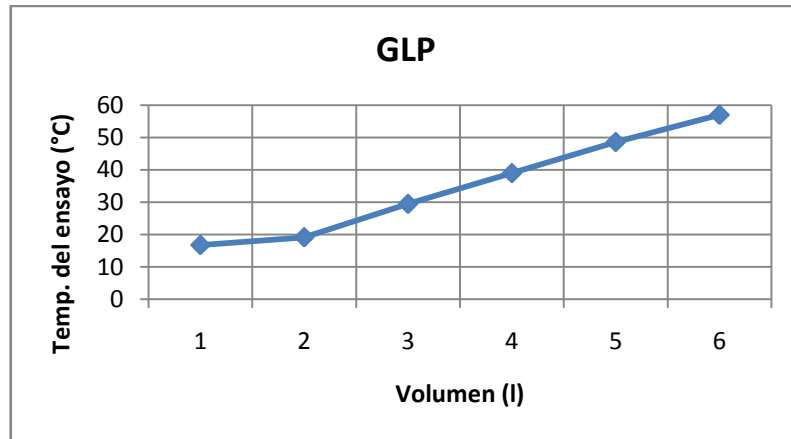


Figura 4.19. Temperatura del agua vs. volumen de GLP quemado.

De acuerdo al experimento realizado, a continuación se calculará 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).

$$Q_{bt} = \frac{P_c \cdot M_{bt}}{dbt} \quad (4.1)$$

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

$$Q_{bt} = 147,523 \text{ kcal}$$

Por otro lado de acuerdo a la teoría de transmisión de calor, el agua contenida en el recipiente recibe cierta cantidad de energía. El calor recibido por el agua (Q_{abt}) se calculará de acuerdo a la ecuación fundamental de calorimetría (ecuación 2.5), 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 (Alonso, 1986):

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

$$Q_{abt} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 40,2 ^\circ\text{C} = 40,2 \text{ kcal}$$

$$Q_{abt} = 40,2 \text{ kcal}$$

De toda la energía entregada por el GLP al quemarse, solo una parte es aprovechada por el agua, el resto se pierde en el recipiente y hacia el medio ambiente. Con los datos calculados se puede determinar el rendimiento de ésta combustión, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Rend. = \frac{Q_{abt}}{Q_{bt}} \quad (4.2)$$

$$Rend. = \frac{40,2 \text{ kcal}}{147,523 \text{ kcal}}$$

$$Rend. = 0,272 \cdot 100 \%$$

$$Rend. = 27,2 \%$$

El rendimiento al quemar el GLP y el biogás es el mismo, ya que las condiciones de las dos combustiones fueron iguales en: presión y temperatura del gas, presión y temperatura del ambiente, ubicación relativa entre el mechero y el recipiente de agua, de acuerdo a Martina (2005). A partir de esa suposición se comienza el cálculo de los parámetros del biogás, tomando como referencia el rendimiento alcanzado por el GLP.

4.4.6.3. Determinación del calor desprendido por el biogás

Con los datos de las pruebas realizadas con el GLP en los tres ensayos, se podrá comparar y determinar el poder calórico del biogás obtenido en este proyecto. En la figura 4.20 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 pudo observar en el ensayo realizado con el GLP. Permitiendo así obtener una variación de temperatura de aproximadamente 10,2 °C. En el Anexo 17 se encuentra la tabla 2 con los datos que se registraron durante el ensayo.

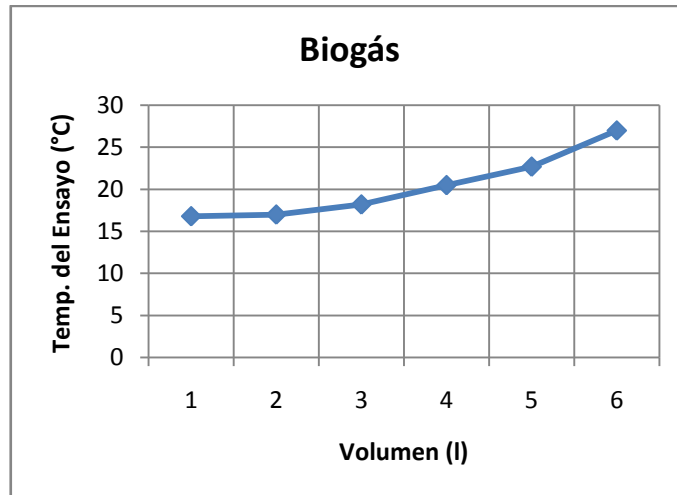


Figura 4.20. Temperatura del agua vs. volumen de biogás quemado.

Con el experimento realizado al quemar biogás, el agua contenida en el recipiente de 1 litro recibe una parte de esa energía. El calor recibido por el agua Q_{ab} se calculará de acuerdo a la ecuación 2.5:

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

$$Q_{ab} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 10,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Q_{ab} = 10,2 \text{ kcal}$$

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 4.2:

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

$$Q_b = \frac{10,2 \text{ kcal}}{0,272}$$

$$Q_b = 36,697 \text{ kcal}$$

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, 2006). Se despejará el poder calórico del biogás (Pc) de la ecuación 4.1.

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

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

$$Pc = \frac{36,697 \text{ kcal} \cdot 1,08 \text{ kg/m}^3}{0,0041377 \text{ kg}}$$

$$Pc = 9\,578 \text{ kcal/m}^3$$

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 4.4.3 se determinó el porcentaje de la cantidad de partículas de metano que contiene el biogás producido por el biodigestor 2, dicha medición se realizó con el sensor SAW-MQ2, obteniendo un valor de 61,2 % de CH₄. Con éste porcentaje se puede determinar el poder calórico real del biogás, siendo este valor de 5 861 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. Demostrando así, que el experimento es confiable.

4.5. Selección del modelo de biodigestor

La selección del modelo de biodigestor se realizará de acuerdo a una matriz de evaluación técnica, donde se calificará las características más relevantes de los biodigestores modelo hindú, tipo bolsa y de domo fijo.

4.5.1. Evaluación del biodigestor modelo hindú o campana flotante

El biodigestor modelo hindú o Campana Flotante se evalúa en la tabla 4.4, teniendo una aceptación del 64 %, su principal desventaja es su tiempo de vida útil, por su gasómetro tipo campana, el mismo que está construido de metal y tiende a ser vulnerable a la corrosión, por ende se deteriora fácilmente.

Tabla 4.4. Matriz de preselección del diseño modelo de campana flotante.

BIORREACTOR DE CAMPANA FLOTANTE O HINDÚ					
	A	B	C	D	E
Nº	%	ASPECTO EVALUADO	CALIFICACIÓN	C/5	D*A
0=No aplica; 1=Suficiente; 3=Adecuado; 5=Muy bueno					
1	5	Tipo de Materia Prima	5	1	5
2	15	Vida Útil	3	0,6	9
3	5	Requerimientos de Área	5	1	5
4	20	Costos	3	0,6	12
5	15	Construcción	5	1	15
6	15	Operación y Mantenimiento	1	0,2	3
7	25	Rendimiento	3	0,6	15
Total	100	Porcentaje Evaluado			64 %

Fuente: Monar, 2008.

4.5.2. Evaluación del biodigestor tipo bolsa

Los biodigestores Tipo Bolsa tienen una aceptación del 62 %, en la tabla 4.5 se puede observar la evaluación técnica realizada, la misma que tiene muy poca aceptación para el proyecto requerido en la hacienda Galpón, debido principalmente a su rendimiento y tiempo de vida útil, donde interviene directamente los materiales utilizados en su construcción, los mismos que no favorecen técnicamente.

Tabla 4.5. Matriz de preselección del diseño modelo biorreactor de tipo bolsa.

BIORREACTOR DE BOLSA					
	A	B	C	D	E
Nº	%	ASPECTO EVALUADO	CALIFICACIÓN	C/5	D*A
0=No aplica; 1=Suficiente; 3=Adecuado; 5=Muy bueno					
1	5	Tipo de Materia Prima	5	1	5
2	15	Vida Útil	1	0,2	3
3	5	Requerimientos de Área	5	1	5
4	20	Costos	5	1	20
5	15	Construcción	5	1	15
6	15	Operación y Mantenimiento	3	0,6	9
7	25	Rendimiento	1	0,2	5
Total	100	Porcentaje Evaluado			62 %

Fuente: Monar, 2008.

4.5.3. Evaluación del biodigestor de domo fijo

El Biodigestor de domo fijo tiene una aceptación del 76 % de acuerdo a la calificación que se realiza en la tabla 4.6, siendo éste valor el más alto con respecto a los biodigestores de cúpula móvil y tipo bolsa, sus principales características de aceptación son: su costo de construcción, operación, mantenimiento y su eficaz rendimiento comprobado por muchos años, hacen que este diseño sea elegido para la hacienda Galpón.

Tabla 4.6. Matriz de preselección del diseño modelo de domo fijo o chino.

BIORREACTOR DE DOMO FIJO O CHINO					
	A	B	C	D	E
Nº	%	ASPECTO EVALUADO	CALIFICACIÓN	C/5	D*A
0=No aplica; 1=Suficiente; 3=Adecuado; 5=Muy bueno					
1	5	Tipo de Materia Prima	5	1	5
2	15	Vida Útil	5	1	15
3	5	Requerimientos de Área	5	1	5
4	20	Costos	3	0,6	12
5	15	Construcción	3	0,6	9
6	15	Operación y Mantenimiento	5	1	15
7	25	Rendimiento	3	0,6	15
Total	100		Porcentaje Evaluado		76 %

Fuente: Monar, 2008.

4.6. Estimación de la energía del biogás

Para la estimación de la energía del biogás se debe conocer la demanda energética de la hacienda, la misma que debe estar representada en metros cúbicos de biogás, y con los kilogramos de excretas del ganado vacuno se determinará los parámetros requeridos para el biodigestor seleccionado.

4.6.1. Cálculo de portadores energéticos que consume y necesita la hacienda representados en metros cúbicos de biogás

Con los datos de los portadores energéticos consumidos por la hacienda durante el año 2013, se calcularán los metros cúbicos de biogás necesarios para cubrir toda la demanda energética, de acuerdo a la tabla de equivalencias de biogás con otras fuentes de energía (IDAE, 2007).

4.6.1.1. Energía eléctrica representada en metros cúbicos de biogás

Con los 7 667 kWh de energía eléctrica que consume la hacienda Galpón, para reemplazar necesitaría al alrededor de 6 472,5 m³ biogás/año; teniendo un valor promedio mensual de 539,3 m³ biogás/mes.

$$\frac{7667kWh}{año} \cdot \frac{1m^3biogás}{1,2kWh} = 6472,5m^3biogás / año$$

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

El consumo de GLP en la hacienda fue de 1 350 kg durante todo el año, para sustituir dicha energía se necesita 3 000 m³ biogás/año; teniendo un valor promedio mensual de 250 m³ biogás/mes.

$$\frac{1350kg \cdot GLP}{año} \cdot \frac{1m^3biogás}{0,45kg \cdot GLP} = 3000m^3biogás / año$$

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

Para suplir 180 kg de leña, se requieren 90 m³ biogás/año; teniendo un valor promedio mensual de 7,5 m³ biogás/mes.

$$\frac{180kg \cdot Leña}{año} \cdot \frac{1m^3biogás}{2kg \cdot Leña} = 90m^3biogás / año$$

4.6.1.4. Cantidad de energía total

La cantidad de energía total (C_{ET}) es la suma de todos los valores parciales de m³ de biogás convertidos de otras fuentes de energía, las mismas que fueron utilizadas por la hacienda, en la siguiente expresión matemática se realiza la suma algebraica:

$$C_{ET} = 539,3 \frac{m^3biogás}{mes} + 250 \frac{m^3biogás}{mes} + 7,5 \frac{m^3biogás}{mes} = 796,8 \frac{m^3biogás}{mes}$$

Los 796,8 m³ de biogás, es la cantidad promedio por mes para abastecer al 100 % la demanda energética de la hacienda Galpón, entre la energía eléctrica, GLP y leña. Pero, 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 representaría el 96 % del consumo de GLP.

4.7. Dimensionamiento del biodigestor de domo fijo

De acuerdo a la selección realizada por la tabla de evaluaciones de biodigestores en el literal 4.5, el biodigestor elegido es de domo fijo, por lo tanto se debe determinar la biomasa disponible del ganado vacuno de la hacienda Galpón y con estos antecedentes se calcularía los parámetros de diseño del tanque reactor.

4.7.1. Cantidad de estiércol requerido

Para producir 8 m³ diarios de biogás se necesita calcular la cantidad de estiércol de ganado vacuno, para este procedimiento se utilizará la tabla 4.7 que fue generada por Larry (1979) en sus experimentos. Estos estudios fueron realizados específicamente para el estiércol del ganado vacuno, así mismo en el presente proyecto se estaría enfocado a utilizar la misma materia prima.

Tabla 4.7. Datos básicos para diseños de biodigestores en base a 1 kg de EF.

DATOS BÁSICO PARA EL DISEÑO DE BIODIGESTORES
1 kg de Estiércol Fresco (EF) = 0,20 kg de Sólidos Totales (ST)
1 kg de Sólidos Totales (ST) = 0,8 kg de Sólidos Volátiles (SV)
1 kg de Sólidos Totales (ST) = 0,3 m ³ de biogás a 35 °C y Pr. Atm.
1 kg de Sólidos Totales (ST) = 0,25 m ³ de biogás a 30 °C y Pr. Atm.
1 kg de Sólidos Totales (ST) = 0,2 m ³ de biogás a 25 °C y Pr. Atm.
1 kg de Sólidos Totales (ST) = 0,16 m ³ de biogás a 22 °C y Pr. Atm.
1 kg de Sólidos Totales (ST) = 0,10 m ³ de biogás a 18 °C y Pr. Atm.
1 kg de Sólidos Totales (ST) = 0,08 m ³ de biogás a 15 °C y Pr. Atm.

Fuente: Larry, 1979.

De acuerdo a la tabla 4.7 se tomaron los siguientes valores; el primero corresponde a 1 kg de estiércol fresco (EF) a sólidos totales (ST) y el segundo

valor corresponde a la temperatura promedio a la cual se encuentra la hacienda Galpón, que oscila entre los 15 °C.

1 kg de Estiércol Fresco (EF) = 0,20 kg de Sólidos Totales (ST)
1 kg de Sólidos Totales (ST) = 0,08 m ³ de biogás a 15 °C y Pr. Atm.

A continuación se calculará la Cantidad de Estiércol (CE) necesario para la producción de 8 m³ de biogás, que aportará al consumo energético de la hacienda.

$$CE = 8 \frac{m^3 \text{ Biogás}}{\text{día}} \cdot \frac{1kgEF}{0,20kgST} \cdot \frac{1kgST}{0,08m^3 \text{ Biogás}} \quad (4.3)$$

$$CE = 500 \text{ kg EF/día}$$

4.7.2. Cantidad de mezcla para alimentar al biodigestor

Para producir los 8 m³ diarios de biogás se requiere de terminarla cantidad de excretas residuales del ganado vacuno, que se necesitan a diario, de esta forma se determinará el volumen total de la mezcla de biomasa, en una relación estiércol y agua de 1:1,5 (Hilbert, 2008), y asumiendo que 1 kg de EF = 1 l EF se tiene:

$$\text{Carga Diaria (CD)} = CE + \text{Agua} = 500 \frac{1kgEF}{día} \cdot \frac{1l}{1kg} + 750 \frac{l}{día} \quad (4.4)$$

$$CD = 1250 \frac{l - \text{Mezcla}}{día}$$

$$CD = 1,25 \frac{m^3 - \text{Mezcla}}{día}$$

El cálculo de la mezcla se realizó en base a las excretas del ganado vacuno 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 1:1,5.

4.7.3. Producción de bioabono

Depende en gran medida del tipo de tecnología y de las materias primas utilizadas para la digestión. Durante la fermentación, parte de los sólidos totales se transforman en metano, por lo que el contenido de materia orgánica es menor al de las materias primas. Esta fracción depende de la producción específica de gas y está comprendido entre el 5 al 30 % de sólidos totales. Para el respectivo cálculo se tomó el 20 % de sólidos totales (Monar, 2008).

A continuación se determinará la cantidad de bioabono producido para 8 m³ de biogás por día, de acuerdo a la ecuación 4.5:

$$\text{Bioabono} = \text{Carga Diaria (CD)} - (\text{Carga Diaria (CD)}) \cdot (\% \text{ ST})/100 \quad (4.5)$$

$$\text{Bioabono} = (1250 \text{ kg/día} - (1250 \text{ kg/día} \cdot 0,2))$$

$$\text{Bioabono} = 1\ 000 \text{ kg/año}$$

4.7.4. Cantidad de nutrientes obtenidos del bioabono

La cantidad de nutrientes que se puede obtener del bioabono se calculó de acuerdo a la tabla 4.8 que Larry (1979) generó para futuros estudios, donde se pueden apreciar los porcentajes de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), la misma que permitirán calcular los kg de cada Elemento Químico (EQ) mencionado anteriormente.

Tabla 4.8. Elementos en el estiércol fresco biodigerido.

Elemento Químico (EQ)	Estiércol Biodigerido (EB)	Estiércol Fresco (EF)	Unidades
Nitrógeno (N)	0,75	1,96	%
Fosforo (P)	0,04	0,16	%
Potasio (K)	0,26	0,14	%
Magnesio (Mg)	0,04	0,15	%
Calcio (Ca)	0,08	0,43	%
Hierro (Fe)	72	435	mg/kg
Cobre (Cu)	4	11	mg/kg
Zinc (Zn)	6	28	mg/kg

Fuente: Larry, 1979.

A continuación se aplicará la ecuación 4.6 para calcular la cantidad de nitrógeno, fósforo y potasio, a partir de los 500 kg de biomasa obtenidos del establo.

$$EQ = (EB) \cdot (EC) \quad (4.6)$$

$$\text{Nitrógeno (N)} = (0,75 \%) \cdot (CE) = (0,0075) \cdot (500 \text{ kg/día})$$

$$\text{Nitrógeno (N)} = 3 \text{ kg/día}$$

$$\text{Nitrógeno (N)} = 1368,75 \text{ kg/año}$$

$$\text{Fósforo (P)} = (0,04 \%) \cdot (CE) = (0,0004) \cdot (500 \text{ kg/día})$$

$$\text{Fósforo (P)} = 0,2 \text{ kg/día}$$

$$\text{Fósforo (P)} = 73 \text{ kg/año}$$

$$\text{Potasio (k)} = (0,026 \%) \cdot (CE) = (0,0026) \cdot (500 \text{ kg/día})$$

$$\text{Potasio (k)} = 1,14 \text{ kg/día}$$

$$\text{Potasio (k)} = 474,5 \text{ kg/año}$$

Se toma en consideración que por cada hectárea de terreno se debe aplicar aproximadamente 75 kg de urea (37,5 kg de Nitrógeno), como existen alrededor de 35 hectáreas de suelo destinadas a la agricultura y ganadería, esto significa que con 1 368,75 kg N, se podría reemplazar más del 100 % el uso anual de fertilizante químico.

Para el análisis de la composición química del abono orgánico obtenido, solo se referenciarán a los minerales más representativos que conforman el bioabono (nitrógeno, fósforo y potasio), y para el resto de minerales no se realiza ningún cálculo (Monar, 2008).

4.8. 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).

4.8.1. Volumen de la cámara del biodigestor

Mediante la experimentación que se realizó en el biodigestor tipo Batch con aislamiento térmico, se tomará como base para determinar el tiempo de retención, el mismo que fue de 36 días, ciclo en que se generó el biogás. Tomando en cuenta

que a partir del 18 de octubre hasta el 22 de noviembre se tiene 36 días, periodo en que la temperatura, el pH y la producción de biogás se estabilizaron, por esta razón, el mencionado tiempo será considerado para los cálculos de los parámetros de diseño del biodigestor, donde se empleará la ecuación 4.7.

$$V_b = CD \cdot TR \quad (4.7)$$

$$V_b = 1,25 \text{ m}^3 \text{ de Mezcla/día} \cdot 36 \text{ días}$$

$$V_b = 45 \text{ m}^3$$

Este resultado difiere de Lara (2011) en un 48 %, así posibilitando tener una mayor capacidad de mezcla de la materia prima.

4.8.2. Diámetro del biodigestor

Calculado el volumen del biodigestor se procede a determinar la profundidad del pozo empleando la ecuación 4.8, considerando que se trata de un cilindro vertical de diámetro (\emptyset) igual a la profundidad (H), según propone Lara (2011).

$$\emptyset = H$$

Dónde:

V_b = Volumen del biodigestor

$$V_b = \frac{\pi \cdot \emptyset^2}{4} \cdot H \quad (4.8)$$

Reemplazando H por \emptyset se tiene:

$$\emptyset = \sqrt[3]{\frac{V \cdot 4}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{45 \text{ m}^3 \cdot 4}{3,1415}} = 3,85 \text{ m}$$

El diámetro difiere en 22 % según Lara (2011) lo que permite tener mayor capacidad de almacenamiento.

4.8.3. Altura del biodigestor

La altura del biodigestor (H) para 45 m³ de volumen se determinará en función del diámetro calculado que es de 3,85 m.

Teniendo así: $H = 3,85 \text{ m}$

Por diseño se deja en la parte superior un borde libre de 20 cm de acuerdo a lo sugerido por Lara (2011), donde la altura total será:

$H_b = \text{altura del Biodigestor} + \text{borde por diseño}$

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

$$H_b = 3,85 + 0,20 \text{ m}$$

$$H_b = 4,05 \text{ m}$$

La altura del biodigestor también difiere en un 23 % de acuerdo a Lara (2011) en su proyecto diseñado para 5 m³ de biogás.

4.8.4. Cálculos de la curvatura de la cúpula

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

4.8.4.1. Cúpula superior

El cálculo de la cúpula superior (f_1) está en función del diámetro del biodigestor, según la ecuación 4.9:

$$f_1 = \frac{1}{5} \cdot \emptyset \tag{4.9}$$

$$f_1 = \frac{1}{5} \cdot 3,85 \text{ m} = 0,77 \text{ m}$$

4.8.4.2. 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 la ecuación 4.10.

V_b = volumen del biodigestor

H_b = altura del biodigestor

$$r = \sqrt{\frac{V_b}{\pi \cdot H_b}} = \sqrt{\frac{45m^3}{3,1415 \cdot 4m}} = 1,9 \text{ m} \quad (4.10)$$

4.8.4.3. 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 4.11.

$$R_1 = \frac{(r)^2 + (f_1)^2}{2f_1} \quad (4.11)$$

$$R_1 = \frac{(1,9m)^2 + (0,77m)^2}{2(0,77m)} = 2,7m$$

4.8.4.4. Volumen de la cúpula

Con los valores de: R_1 y f_1 se calculará el volumen de la cúpula (V_1) del biodigestor empleando la ecuación 4.12.

$$V_1 = \pi \cdot (f_1)^2 \cdot \left(R_1 - \frac{f_1}{3}\right) \quad (4.12)$$

$$V_1 = 3,1415 \cdot (0,77m)^2 \cdot \left(2,7m - \frac{0,77m}{3}\right) = 4,5m^3$$

4.8.4.5. Volumen del cilindro

Se determina el volumen del cilindro (V_2) en función de H_b y r , valores que permitirán calcular la capacidad del cilindro, para su construcción; donde se empleará la ecuación 4.10, despejando el volumen (V); entonces será igual a:

$$V_2 = \pi \cdot r^2 \cdot H_b = 3,1415 \cdot (1,9m)^2 \cdot 4m = 45,36m^3$$

4.8.4.6. Volumen final del biodigestor

El 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 calculará con V_1 y V_2 .

$$V_{fb} = V_1 + V_2 = 4,5m^3 + 45,36m^3 = 49,86m^3$$

El volumen final del biodigestor difiere de Lara (2011) en 48 %, permitiendo así tener una mayor capacidad de producción de biogás.

4.8.5. 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 4.13 se obtuvo el valor; de la siguiente manera:

$$S_1 = 2\pi \cdot R_1 \cdot f_1 \quad (4.13)$$

$$S_1 = 2 \cdot 3,1415 \cdot 2,7m \cdot 0,77m$$

$$S_1 = 11,87 \text{ m}^2$$

Para la superficie estructural (S_2) se calculó en base a los parámetros r y H_b , utilizando la ecuación 4.14.

$$S_2 = 2\pi \cdot r \cdot H_b \quad (4.14)$$

$$S_2 = 2 \cdot 3,1415 \cdot 1,9m \cdot 4m$$

$$S_2 = 47,75 \text{ m}^2$$

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

$$S = S_1 + S_2$$

$$S = (11,87 + 47,75) \text{ m}^2$$

$$S = 95,62 \text{ m}^2$$

La superficie total difiere de la obtenida por Lara (2011) en un 41 %, determinando que se tiene una mayor superficie para almacenamiento de biomasa residual del ganado vacuno.

4.8.6. Cálculo del volumen del tanque de mezcla

El volumen del tanque de mezcla (V_m) se calculará a partir de 1,25 m³/mezcla diaria de excretas del ganado vacuno (ecuación 4.8), disponibles en la hacienda.

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

h_m = altura del tanque de mezcla

$$1,875 \text{ m}^3 = \frac{\pi \cdot 1,8^2}{4} \cdot h_m$$

$$h_m = 0,74 \text{ m}$$

El volumen del tanque de mezcla se encuentra sobre dimensionado en un 66 % de su capacidad diaria de producción de excretas del ganado bovino, de acuerdo a lo sugerido por Lara (2011), teniendo así un volumen de 1,875 m³.

4.8.7. 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), se tienen los siguientes valores: altura del tanque de descarga (h_d) = 1 m; con un diámetro (d_d) de 1,8 m. Donde se aplica la siguiente ecuación 4.8.

$$V_d = \frac{\pi \cdot d_d^2}{4} \cdot h_d$$

$$V_d = \frac{\pi \cdot 1,8^2}{4} \cdot 1$$

$$V_d = 2,54 \text{ m}^3$$

El volumen calculado para el tanque de descarga permitirá disponer de una mayor capacidad de almacenamiento del efluente, el mismo que se encuentra sobre dimensionado al 100 % de la mezcla diaria (estiércol-agua) de la biomasa residual, por seguridad, permitiendo así evitar posibles derrames del bioabono, tal como sugiere Lara (2011).

Mediante la tabla 4.9 se tiene un resumen de los parámetros calculados del biodigestor propuesto en este proyecto.

Tabla 4.9. Parámetros físicos del biodigestor de domo fijo.

Nº	PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
1	Volumen del efluente	V_t	45	m^3
2	Diámetro	\emptyset	3,85	m
3	Altura del biodigestor	H_b	4,05	m
4	Curvatura de la cúpula	f_1	0,77	m
5	Radio	r	1,9	m
6	Radio curvatura esfera superior	R_1	2,7	m
7	Volumen de la cúpula	V_1	4,5	m^3
8	Volumen del cilindro	V_2	45,36	m^3
9	Volumen total biodigestor	V_{tb}	49,86	m^3
10	Superficie estructural	S	95,62	m^2
11	Volumen de la cámara de mezcla	V_m	1,875	m^3
12	Volumen de la cámara de efluente	V_d	2,54	m^3

4.9. Emisiones de gases de efecto invernadero

La principal causa del cambio climático que se viene dando es por el calentamiento global, producido principalmente por los gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, óxidos de nitrógeno, entre otros).

De acuerdo a Johnson (1995) y Kurihara (1999) las emisiones de metano generadas por el ganado vacuno se estiman en 58 millones de t/año (80 millones que genera los animales domésticos), en el presente proyecto se estaría dejando de emitir al medio ambiente $150 m^3$ de metano producto de las excretas del ganado

vacuno, 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 m³ puede producir 1 7164,8 kW/año, considerando que un metro cúbico de biogás representa un valor equivalente a 5,96 kW (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 tesis, 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 m³. En la tabla 4.10 se detallan específicamente estos valores.

Tabla 4.10. Disminución en la emisión de CO₂ por el uso de biogás producido por un BDF de 8 m³ como alternativa a la combustión de GLP.

Producción de Biogás	Energía Producida	Ahorro en Emisiones	Disminución en Emisión CO ₂	Disminución Total en Emisión CO ₂
[m ³ /año]	[kW/año]	[kg CO ₂ /kW]	[kg/año]	[t/año]
2 880	1 7164,8	0,25	4 291,2	4,2

4.10. Comprobación de la hipótesis

- **Si se examina la caracterización de la biomasa residual del ganado vacuno realizada en los establos de la hacienda Galpón, relacionadas con el aprovechamiento energético, se puede determinar la disponibilidad de la materia prima para la implementación de un biodigestor alternativo.**

El ganado vacuno que posee la hacienda Galpón son 205 animales, distribuidos en: 110 vacas, 28 toros, 52 terneros y 15 caballos; de acuerdo

a esta tabulación se caracterizó el valor teórico y real de la biomasa residual disponible para la generación de biogás y bioabono, donde asciende a 1 953 y 1 172 kg de excretas frescas de animales, materia prima suficiente para la aplicación de la tecnología de los biodigestores, con lo cual se sustenta la hipótesis planteada.

- **Se cuenta con alrededor de 1 172 kg de estiércol fresco que se puede obtener de acuerdo al nivel de permanencia de los animales en los establos de la hacienda Galpón, cantidad suficiente para calcular los parámetros de diseño del biodigestor de domo fijo.**

Los 1 172 kg de excretas frescas es la materia prima real disponible, pero de acuerdo a la administración de la hacienda Galpón, el diseño se realizará para producir 8 m³ de biogás diarios. Por lo tanto, para la mencionada capacidad de biogás será necesario 500 kg estiércol fresco y 750 litros de agua, dando una mezcla de 1 250 kg de biomasa residual, con éste valor se calculó los parámetros de diseño del biodigestor de domo fijo, teniendo así: diámetro 3,85 m, altura 4 m, volumen total del biodigestor 49,86 m³, volumen de la cámara de mezcla y del efluente 1,875 y 2,5 m³, respectivamente. De esta manera se comprueba la hipótesis planteada.

- **Analizando el ensayo realizado con 10 kg de excretas frescas e introducido en el biodigestor tipo “Batch” convencional, en cuanto al proceso de bioconversión se refiere, se puede establecer la cantidad de partículas por millón del gas metano presentes en el biogás, lo que determinará el poder calórico del biogás para la nueva fuente de energía renovable.**

El experimento realizado en el biodigestor tipo “Batch” (convencional) con los 10 kg de excretas frescas, influyeron directamente en el desarrollo de este trabajo. Demostrando que el proyecto es viable por los siguientes objetivos alcanzados: la producción de biogás para los 10 kg estiércol, alcanzó los 0,075 m³ de biogás con un 61,2 % de partículas de metano,

valor que determinó el poder calórico real del biogás, siendo ésta energía de 24 535,904 kJ/m³. Contribuyendo de esta manera a reducir el impacto ambiental, al dejar de emitir directamente a la atmosfera 2,295 m³ de gas metano (61,2 % CH₄ de 3,75 m³ de biogás) por la descomposición anaeróbica de 500 kg de estiércol del ganado vacuno proveniente de los establos de la hacienda Galpón. Por lo tanto, los resultados obtenidos justifican la hipótesis asentada.

4.11. Conclusiones del capítulo

- ✓ En la hacienda Galpón se dispone de 190 cabezas de ganado vacuno y 15 equinos. Estos animales constituyen la fuente con que cuenta la hacienda para la generación de biomasa. Tales registros permitieron inferir que la cantidad teórica y real de biomasa residual disponible para la producción de biogás asciende a 1 953 y 1 172 kg de excretas animales, respectivamente. Lo anterior está determinado por el nivel de permanencia de los animales en los establos.
- ✓ Entre los portadores energéticos que utiliza la hacienda se identificó el de mayor costo, siendo el gas licuado de petróleo 2,3 veces superior al de la energía eléctrica. El gasto económico anual en que incurre la hacienda por concepto de consumo de GLP asciende a 1 678 USD.
- ✓ Se obtuvieron los datos de las variables físicas del biodigestor con y sin aislamiento térmico, donde la temperatura promedio alcanzó los valores de 23,1 y 29,8 °C, siendo el pH registrado menor y mayor que siete (ácido y básico); respectivamente. Por su parte, el volumen de biogás producido ascendió a 36,1 y 75,2 litros, por ese orden.
- ✓ Se determinó el poder calórico del biogás obtenido en el biodigestor con aislamiento térmico, donde se obtuvo la cantidad de 12 240,2 partículas de metano presentes en el biogás, que corresponden al 61,2 % de metano en relación con el volumen total de gas.

- ✓ Se demostró que el biodigestor con las características más apropiadas para el presente proyecto es el de domo fijo o chino, el cual obtuvo un 76 % de aceptación de acuerdo a la matriz de decisiones planteadas. Además, se calcularon los parámetros de diseño y se obtuvieron los siguientes resultados: diámetro exterior 3,85 m, altura 4 m, volumen total del biodigestor 49,86 m³, volumen de la cámara de mezcla y efluente 1,875 y 2,5 m³, respectivamente.

CAPÍTULO 5. LA PROPUESTA

5.1. Introducción

La implementación de propuestas basadas en análisis científico-técnicos, económicos y ambientales constituyen una etapa fundamental dentro del proceso de investigación, por cuanto se pueden mejorar los procesos que se desarrollan, mediante la introducción de nuevas y novedosas técnicas y tecnologías. El **objetivo** del presente capítulo es establecer una propuesta para la implementación de un biodigestor de domo fijo que aproveche la biomasa residual disponible en la hacienda Galpón.

5.2. Título de la propuesta

Biodigestor de domo fijo con aislamiento térmico para aprovechamiento del potencial energético de las excretas del ganado vacuno de la hacienda Galpón.

5.3. Justificación de la propuesta

Es necesaria una propuesta de un biodigestor alternativo que aproveche las excretas del ganado vacuno para generar una energía alternativa y limpia, que permita disminuir el consumo de GLP (garrafas 45 kg GLP) no subsidiados por el gobierno, y así tener un abastecimiento híbrido de energía térmica, que pueda ser utilizada por la hacienda Galpón, de esta manera se estarían impulsando nuevos proyectos de energías alternativas (biogás); y su vez se cumpliría con el objetivo principal del Protocolo de Kyoto, el mismo que consiste en disminuir paulatinamente los gases de efecto invernadero (GEI) que están contaminando el medio ambiente, y por lo tanto, conllevaría a los habitantes a tener una mejor calidad de vida.

5.4. Objetivo de la propuesta

Aprovechar los desechos biológicos del ganado vacuno para generar una energía renovable para reemplazar la utilización de GLP en la hacienda Galpón de acuerdo a una normativa vigente.

5.5. 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 vacuno de la hacienda Galpón, para generar biogás y bioabono. Se encuentra dividido en: las partes constitutivas del biodigestor, la operación y el mantenimiento preventivo, análisis económico, social y medio ambiental.

5.5.1. Partes constitutivas del biodigestor

Las partes constitutivas con las cuales estará conformado el mencionado proyecto, se las puede resumir básicamente 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 5.1 se describen cada una de estas partes.

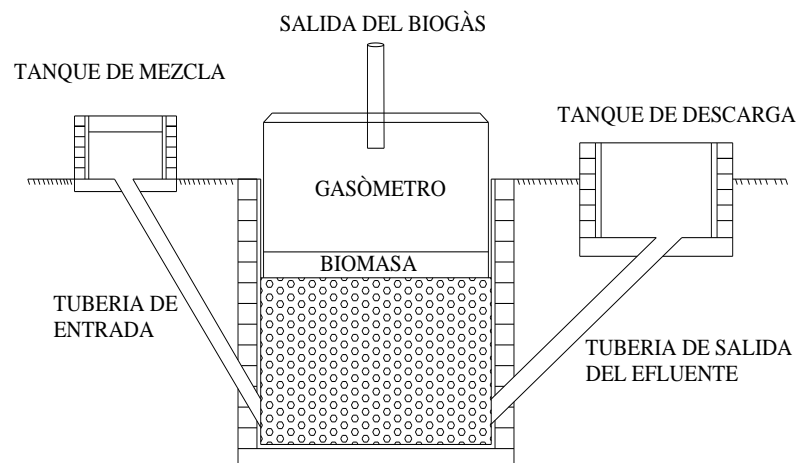


Figura 5.1. Partes del biodigestor de domo fijo.

a. Materia prima disponible

Los residuos sólidos que generan el ganado vacuno en la hacienda Galpón ascienden a 1 953 kg de estiércol fresco por día, de acuerdo a la tabulación realizada en el literal 4.3, pero al no permanecer los bovinos las 24 horas del día en los establos se considerará el 60 % del total de las excretas frescas del ganado, de acuerdo al porcentaje considerado se tendría 1 172 kg de EF/día, además por cuestiones económicas y factibilidad del proyecto sólo se realizará el diseño para 8 m³ de producción de biogás por día. En la tabla 5.1 se detalla la producción de biogás y la demanda que tiene la hacienda.

Tabla 5.1. 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
1250	8	240	250

La propuesta que se plantea con 240 m³ de biogás que se generan en el biodigestor de domo fijo que cubriría el 96 % del consumo de GLP de la hacienda.

b. Cámara de mezcla a la entrada del biodigestor

La cámara de mezcla tiene las siguientes dimensiones: 0,74 m de altura y 1,8 m de diámetro, con una capacidad de 1 500 litros de mezcla, se ha sobre dimensionado en 20 % por seguridad, ante cualquier eventualidad, como 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 45 000 litros, de acuerdo a las siguientes especificaciones: altura de 4 m y un radio de 1,9 m. Donde, la estructura de concreto del tanque reactor 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 0,77 m; teniendo una capacidad de almacenamiento de 4 500 litros de biogás a una presión media de entre 0,5 a 1,5 bar.

e. Cámara de descarga del efluente

Tiene una capacidad de 2 500 litros, con las siguientes dimensiones: radio 1,8 m y altura de 1,0 m, la misma se encuentra sobre dimensionada en aproximadamente el 100 % de la capacidad de mezcla diaria que ingresa al biodigestor, para detalles más específicos revisar el Anexo 18.

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 especificaciones técnicas de la norma NTE INEN 2 260:2008.

5.5.2. Operación y mantenimiento básico preventivo del biodigestor

La operación y el mantenimiento del biodigestor de domo fijo se debe realizar bajo la supervisión de un experto en la rama, porque en los inicios de la operación hay que tomar en cuenta aspectos técnicos para su funcionamiento, por lo tanto se tiene que plasmar un manual básico para los operarios.

1. Construido el biodigestor de domo fijo, se realiza la primera carga con los primeros 1 250 litros de mezcla de biomasa, 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 1:1,5 de acuerdo a lo sugerido por Hilbert (2008); pero sí la limpieza del establo es con manguera se debe

tomar en cuenta la relación antes mencionada o tener una composición pastosa de aproximadamente 50 000 centipoise (ATPP, 2008).

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 vacuno no debe tener partículas superiores a 5 mm o restos de pasto del ganado vacuno.
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 hidrógeno 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.

5.5.3. Análisis económico

De acuerdo a la investigación realizada se determinaron los costos de la implementación del biodigestor de domo fijo, los mismos se detallan a continuación:

5.5.3.1. Costos de materiales para la construcción del biodigestor

El costo de materiales para la implementación del biodigestor de domo fijo propuesto en este proyecto, se detallan en la tabla 5.2. El mismo que fue calculado para una capacidad de producción de 8 m³ de biogás/día, para remplazar el 96 % de consumo de GLP utilizado por la hacienda Galpón.

Tabla 5.2. Costos de materiales para la construcción del biodigestor domo fijo.

PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN DEL BIODIGESTOR DE DOMO FIJO					
PROYECTO: REACTOR PARA LA HACIENDA GALPÓN DE 49,86 METROS CÚBICOS					
EMPRESA: INDUACERO&CONSTRUCCIONES					
FECHA: NOVIEMBRE 2013					
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 electrosoldada	15	kg	1,2	18
8	Hormigón simple f'c=210kg/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

5.5.3.2. Costos de soporte técnico y mano de obra

Además del costo de los materiales para la construcción del reactor se deben tomar en cuenta otros rubros complementarios como: el soporte técnico y la mano de obra que se requiere para la ejecución del sistema híbrido que abastecería de energía térmica a la hacienda. En la tabla 5.3 se presentan los costos referenciales de estos rubros.

Tabla 5.3. 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

5.5.3.3. Costo total del biodigestor domo fijo para la hacienda Galpón

El costo para implementar el biodigestor que reemplazaría el 96 % del consumo de GLP, que utiliza la hacienda Galpón en sus actividades de ordeño y producción de quesos, es aproximadamente 6 055,86 USD.

5.5.3.4. 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 anual es de 240 m³ de biogás (36 días de retención) equivale a 1 296 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 1 607,04 USD.

Referente al valor económico del efluente, el precio por nutriente es calculado en base al valor comercial por kilogramo de cada nutriente que tiene los fertilizantes químicos. El valor económico anual del efluente se obtiene mediante el análisis del contenido nutricional de los minerales, multiplicado por el precio comercial por kilogramo de nutrientes, así teniendo: nitrógeno (N), potasio (P) y fósforo (K). Este valor se estima alrededor de 889 USD por la producción de 1 368 kg de N, reemplazando en su totalidad los 1 000 kg de urea a un costo anual de 650 USD; 379 USD por la producción de 73 kg de P y 910 USD por el contenido de 474 kg de K, para un total de 2178 USD. Los precios por kilogramo de nutrientes se obtuvieron de la agroquímica El Huerto (1kg N = 0,65 USD, 1kg P = 5,20 USD,

1kg K = 1,20 USD). En la tabla 5.5 se describe los beneficios que se obtendrían para la hacienda al utilizar de este producto derivado de la biodegradación de la materia orgánica.

Tabla 5.4. Ahorro de GLP y abono químico con el biodigestor domo fijo.

PORTADORES ENERGÉTICOS	SISTEMA ACTUAL		BDF		AHORRO
	CANTIDAD	USD	CANTIDAD	USD	USD
GLP (Garrafas)	30	1678	1.2	66.96	1 611.04
Abono (Kg)	1 000 Urea	650	1 368 (N)	889.2	889.2
Abono (kg)			73 (P)	379	379
Abono (kg)			474 (K)	910	910
				TOTAL (USD)	3 789.24

Los beneficios directos derivados de la implementación del BDF puede incrementarse si el efluente se seca y se vende como fertilizante sólido a otras fincas o agricultores propios de la zona, a un precio mayor que el abono comercial por tener mejores características que los abonos químicos (Botero, 2006).

5.5.4. Evaluación financiera

La evaluación financiera para el proyecto del biodigestor de domo fijo se realizará bajo el criterio del valor actual neto (VAN) y la tasa de retorno interno (TIR), los mismos permitirán determinar si el proyecto es viable.

5.5.4.1. 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 5.5). La ecuación 5.1 presenta los parámetros para calcular el VAN (Mahmood, 2005).

$$VAN = -A + \frac{Q_1}{(1+k_1)} + \frac{Q_1}{(1+k_1).(1+k_2)} + \dots + \frac{Q_n}{(1+k_1) \dots (1+k_n)} \quad (5.1)$$

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 5.5. Análisis del VAN para el biodigestor con aislamiento térmico.

INVERSIÓN	6 055,8	
TASA BCE	0,12	
VIDA ÚTIL	20 años	
Año	Flujo Caja	VAN 12 %
1	3 486,4	3 112,86
2	3 486,4	2 779,34
⋮	⋮	⋮
19	3 486,4	404,79
20	3 486,4	361,42
	VAN =	26 041,47

El Valor actual neto de la inversión es de **26 041,47 USD** lo que significa que el biodigestor de domo fijo con aislamiento térmico generará beneficios económicos a la administración de la hacienda, determinando que el proyecto es viable. En el Anexo 19 se encuentran los detalles del cálculo.

5.5.4.2. Tasa interna de retorno

El TIR es un indicador de rentabilidad de un proyecto, el mismo que se relaciona con la tasa de referencia (fijada por el Banco Central del Ecuador BCE), y al ser mayor se puede decir que el proyecto es aceptable caso contrario se rechaza, para obtener este valor se calcula con la ecuación 5.2 (Mahmood, 2005). En la tabla 5.6 se tiene un resumen del cálculo del TIR.

$$TIR = \frac{-I_0 + \sum_{t=1}^n F_t}{\sum_{t=1}^n F_t} \quad (5.2)$$

Dónde:

Ft.- Flujos de caja en el período t

n.- Número de años

Io.- Inversión inicial

Tabla 5.6. 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	-6 055,8
1	3 112,86
2	2 779,34
⋮	⋮
19	404,79
20	361,42
TIR =	41 %

De acuerdo a la tabla 5.6, la Tasa Interna de Retorno de la inversión es del 41 %, lo cual significa que el biodigestor domo fijo con aislamiento térmico es superior a la tasa referencial del Banco Central del Ecuador, determinando así que el proyecto es aceptable. Para observar datos detallados por cada año, revisar los cálculos realizados en el Anexo 20.

5.6. Análisis socio-económico

Al ejecutar la implementación del biodigestor de domo fijo, la administración de la hacienda Galpón se verá aludida con relevantes beneficios económicos a mediano y largo plazo.

a. Análisis de ahorro socio-económico al implementar el biodigestor de domo fijo que permitirá reducir el consumo de GLP y abonos sintéticos

El sistema de abastecimiento de energía térmica actual (GLP) en la hacienda Galpón es de 1 350 kg de GLP (30 cilindros 45 kg no subsidiado) lo que representa un costo de 1 678 USD, en la Tabla 5.4 se detallan estos valores. Con

la implementación del biodigestor de domo fijo, el consumo anual de gas licuado se reducirá a 54 kg de GLP (1,2 cilindros de 45 kg) a un precio de 66,96 USD obteniendo un ahorro neto de 1 296 kg de GLP (28,8 cilindros de 45 kg) a un monto de 1 611,04 USD.

El consumo actual de abonos químicos para las 35 hectáreas que dispone la hacienda Galpón es de 1 000 kg de urea (20 quintales de 50 kg/c.u.) representando una inversión de 650 USD, los mismos que se detallan en la tabla 5.4; al implementar el BDF se eliminaría todo el consumo de abonos sintéticos (1 000 kg de urea), obteniendo un ahorro del 100 % por la compra de estos insumos agrícolas e inclusive se tendría 36,5 % N en exceso a un costo de 239,2 USD, así teniendo un beneficio total de 889,2 USD.

5.7. Valoración ambiental

La valoración ambiental que tendrá el presente proyecto en cuanto a tener una energía limpia y renovable, que disminuya las emanaciones de los gases de efecto invernadero, son muy importantes porque parten de una política medio ambiental que está impulsando el gobierno ecuatoriano.

a. Aplicación de los Certificados de Reducción de Emisiones de CO₂ (CER's) con el objetivo de tener un ingreso de capital al Estado

Las reducciones de emisiones de GEI se miden en toneladas de CO₂ equivalente, y que se traducen en Certificados de Emisiones Reducidas o Certified Emission Reductions (CER). Un CER equivale a una tonelada de CO₂ que se deja de emitir a la atmósfera con la aplicación de proyectos resultantes del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), y pueden ser vendidos en el mercado de carbonos a países industrializados.

El sistema ofrece incentivos económicos para que las empresas privadas contribuyan a la mejora de la calidad ambiental y se consiga regular la emisión generada por sus procesos productivos, considerando el derecho a emitir CO₂ como un bien canjeable y con un precio establecido en el mercado de acuerdo a la oferta y demanda.

Según el régimen de comercio de derechos de emisiones de California en la segunda subasta en febrero del 2013, el precio por cada tonelada equivalente de CO₂ alcanzó un valor aproximado de 13,62 dólares americanos, superando todas las expectativas de los analistas económicos y vendiendo a un monto de 2,91 USD por encima del precio de reserva (ECOACSA, 2013).

Como se puede constatar en la tabla 4.10 con la implementación del BDF se podría dejar de emitir 4,2 t de CO₂ por año, obteniendo el Estado un beneficio económico de 57,2 USD anual, lo cual económicamente es un valor muy bajo, pero se está cumpliendo con el Protocolo de Kyoto, el mismo que consiste en reducir las emisiones que causan el calentamiento global del planeta.

5.8. Conclusiones del capítulo

- ✓ La implementación del biodigestor de domo fijo en la hacienda Galpón, basado en el flujo de caja proyectado en un periodo de 20 años, se considera económicamente rentable. Lo anterior se evidenció en los resultados obtenidos para el valor actual neto y la tasa interna de retorno, los cuales ascendieron a 26 041,47 USD y el 41 %, respectivamente.

- ✓ Se determinó que la implementación del biodigestor de domo fijo en la hacienda Galpón permite sustituir el gas licuado del petróleo por el gas metano producido en la instalación. El ahorro anual asociado al cambio de combustible se estima en 1 611,04 USD, para un precio 55,93 USD por cilindros de 45 kg de GLP. También, se dejarían de emitir 4,2 toneladas de CO₂/año, con los consiguientes beneficios ambientales que esto implica.

CONCLUSIONES

1. La cantidad total de biomasa residual procedente del ganado vacuno y los equinos, disponible en los establos de la hacienda Galpón, asciende a 1 953 kg/día. Su potencial energético tabulado de acuerdo al tipo de animal representa el 56,3; 21,5; 10,7 y 11,5 % para las vacas, los toros, los terneros y los equinos, respectivamente.
2. Se evidenció, mediante cálculos, que para las condiciones de explotación de la hacienda Galpón se obtienen 500 kg de excretas frescas sólidas, las que mezcladas con 750 l de agua permite conseguir 1 250 l de biomasa residual. Esta cantidad, usada en un biodigestor de domo fijo, posibilitará obtener alrededor 2 880 m³/año de biogás y 1 000 kg/año de bioabono.
3. Se determinó, mediante el método experimental calorimétrico, el poder calórico del biogás producido por el prototipo de biodigestor 2 tipo “Batch”. Su valor ascendió a 24 535,904 kJ/m³ (5 861 kcal/m³), para un gas que contenía 61,2 % de partículas de metano.
4. Se seleccionó el biodigestor más apropiado para la implementación del proyecto, recayendo en el de domo fijo el cual obtuvo un grado de aceptación del 76 % de acuerdo con la matriz de decisiones empleada. Los parámetros de diseño del tanque reactor son: diámetro 3,85 m, altura 4 m, volumen total del biodigestor 49,86 m³, volumen de la cámara de mezcla y del efluente 1,875 y 2,5 m³, respectivamente.
5. Se corroboró, a través de la evaluación financiera, que el VAN obtuvo un valor positivo de 26 041,47 USD para una TIR de 46 %, que es superior a la tasa establecida por el banco Central del Ecuador. Lo anterior evidenció la viabilidad económica del proyecto de investigación.

6. La implementación del biodigestor propuesto permitirá ahorrar alrededor de 1 611,04 USD a la administración de la hacienda Galpón, al dejar de combustionar 1 296 kg de GLP. Lo anterior también favorecerá al ambiente por cuanto se estaría dejando de emitir a la atmósfera 4,2 t de CO₂ por año.

RECOMENDACIONES

1. Considerar los parámetros calculados en la presente investigación en la ingeniería de detalle para el diseño, la fabricación e implementación del biodigestor de domo fijo propuesto para la hacienda Galpón.
2. Realizar ensayos experimentales con otros tipos de biomásas residuales con el propósito de encontrar la materia prima más satisfactoria en cuanto a cantidad y calidad del biogás producido.
3. Investigar la posibilidad de implementación, en la hacienda Galpón, de otros tipos de biodigestores y tecnologías para la producción de biogás.

BIBLIOGRAFÍA REFERENCIADA

1. Alonso, M. (1986). *Física Mecánica y Termodinámica*. Argentina: Addison-Wesley Iberoamericana. Págs.,101-105.
2. Álvarez, F. (2010). Preparación y uso del biol. *ITDG*, Págs.,20-29.
3. Arce, J. (2011). *Diseño de un biodigestor para generar biogás y abono a partir de desechos orgánicos de animales aplicable en las zonas agrarias del Litoral*. Guayaquil: U.P.S.
4. Armendáris, G. (1989). *Química General Moderna*. Quito: Publicaciones Modernas. Págs.,50-30.
5. Arristía, M. (2009). El biogás no es un símbolo de pobreza. Págs. 1-2.
6. ATPP. (2008). Densidad de fluidos líquidos pastosos. *Aplicaciones técnicas procesos productivos*. Págs., 10-15.
7. Avendaño, D. (2010). *Diseño y construcción de un digestor anaerobio de flujo pistón que trate los residuos generados en una explotación ganadera de la localidad de Loja, Ecuador, empleando tecnologías apropiadas*.
8. Barroto, F. G. (1999). Su valor como fertilizante en cultivos anuales. *Los de plantas depuradoras de aguas servidas*. Págs.,10-13.
9. Bernal, H. (1992). Residuos Orgánicos. *Aprovechamiento agrícola como abono y sustrato*. Págs., 120-125.
10. Botero Botero, R. (2011). El biodigestor de bajo costo, su aporte a la mitigación del cambio climático y su potencial para reducir la pobreza rural en América Latina y el Caribe. *Biodigestor de bajo costo*. Págs., 2-4.
11. Botero, P. (2006). Los beneficios económicos totales de la producción de biogás utilizando un digestor de polietileno de bajo costo. *ISSN*, Págs.,5-9.
12. Bouille, D. (2008). Naturaleza de la energía y otros aspectos básicos. *Introducción a la Economía de la Energía*. Págs., 10-12.
13. Bravo, J. (2007). Manual Técnico para la Construcción y Operación de Biodigestores. *PROCANOR*. Págs.,5-9.
14. Camacho, A. (1987). Utilización del biogás . *Proyecto tecnológico del uso de biodigestor como planta para la explotación de una granja porcina*. Págs., 50-62.

15. Carrasco, N. (2011). Guía Práctica para el Cálculo de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). *Cambio Climático*. Págs., 3-5.
16. Carrillo, L. (2003). Rumen y biogás. *Microbiología Agrícola*. Págs., 1-5.
17. Carrillo, L. (2004). Energía de la biomasa residual. *Energías Renovables*, Págs., 28-45.
18. CEA, O. E. (2010). Biogás y bioabono. *Uso de biodigestores en fincas agroecológicas*. Quito. Págs., 45-68.
19. Cerda, E. (2009). Energía obtenida a partir de la biomasa. Págs., 138-139.
20. Chiriboga, O. (2010). *Desarrollo del proceso de producción de biogás y fertilizante de la mezcla de frutas*. Quito: USFQ. Págs., 10-18.
21. Chungandro, K. (2010). *Diseño y construcción de un biodigestor para pequeñas y medianas granjas*. Quito: EPN. Págs., 62-85.
22. Clesceri, L. G. (1992). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. *American Public Health Association*. Págs., 6-15.
23. Congas, C. (2013). *Compañía Nacional de Gas*. Quito. Págs., 2-4.
24. Duque, C. (2012). La basura genera energía eléctrica en Ambato. *Desechos sólidos de la zonas urbanas de Tungurahua*. Págs., 2-6.
25. Earth, G. (06 de Enero de 2001). Imagen Digital Globe. Salcedo, Cotopaxi, Ecuador. Págs., 1.
26. ECOACSA, 2. (2013). La tonelada de CO₂ en California alcanza un precio récord. *La actualidad*, Págs., 1-2.
27. EPA. (2008). Digestión Anaeróbica. *Folleto técnico N° 1*, Págs., 10-20.
28. Eroski, C. (2005). Biogás. *Produce energía ecológica y elimina residuos orgánicos*. Págs., 12-13.
29. Fernández, J. (2008). *Manual para el promotor de la tecnología de la organización latinoamericana de energía*. México: M.I.L. Págs., 20-28.
30. Funes, L. D. (2004). El uso de biodigestores en sistemas caprinos de la provincia de Córdoba. *Universidad Nacional de Río Cuarto*. Págs., 8-14.
31. García, A. K. (2010). Biogás. *Biotecnología*, Págs., 5-18.
32. Germán, P. (2002). *Tratamiento de las Aguas Servidas: Situación en Chile*. Chile: La nación S.A. Págs., 1-4.

33. Hans-Josef. (2002). *Concepciones de una política energética sustentable*. Chile: LOM. Págs., 1-6.
34. Hernández, J. (2005). *Aplicación de lodos residuales, estiércol bovino y fertilizante químico en el cultivo de sorgo forrajero*. México: RICA S.A.
35. Hilbert, I. A. (2008). *Manual para la Producción de Biogás*. Argentina-Castelar. Págs., 4-35.
36. ICAITI. (1983). Primer seminario de biogás, ROCAP. *Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial*. Págs., 18-28.
37. IDAE. (2007). Digestores Anaeróbicos. *BESEL, S.A. (Departamento de Energía)*. Págs., 6-7.
38. Joana, I. G. (2010). Biodegradación anaerobia de las aguas generadas en el despulpado del café. Veracruzana, Veracruz, México. Págs., 8-20.
39. Johnson, M. (1995). *Evaluación del efecto de la aplicación del efluente de un fermentador anaeróbico para estiércol vacuno sobre el comportamiento de un trigo de invernadero*. México: U.A.C. Págs., 12-24.
40. Kurihara M, M. T. (1999). Methane production and energy partition of cattle in the tropics. *British Journal of Nutrition*. Págs., 80-81.
41. Lara E, E. G. (2011). Diseño de un Biorreactor y Conducción del Biogás Generado por las Excretas de Ganado Vacuno, Estación Tunshi-Espoch. *Ingeniería en Biotecnología Ambiental*. Págs., 63-65; 85-92; 99-112.
42. Larry, J. D. (1979). *Third Annual Biomass Energy Systems Conference*. Colorado. Págs., 4-6; 12-18.
43. Liliana, A. (2010). Construcciones y mejoras para el ganado vacuno. *Construccionespecuarias*. Págs., 8-9.
44. López, J. A. (2008). Potencial energético de la biomasa residual agrícola y ganadera en Andalucía. *Dirección General de Planificación y Análisis de Mercados*. Págs., 16-28.
45. Lorena, T. (2012). La importancia y el futuro del biogás en la Argentina. *3er. Congreso Latinoamericano y del Caribe de Refinación*, (págs. 1-2). Argentina. Págs., 1-8.
46. Lugones, J. L. (2000). *Desarrollo y perspectivas de la tecnología del biogás en los países subdesarrollados*. Madrid: ISBN. Págs., 8-15.

47. Ly, P. D. (2001). Digestores como componentes de sistemas agropecuarios integrados. *Instituto de Investigaciones Porcinas*. Págs., 35-38.
48. Mahmood, N. (2005). *Matemática Financiera*. Bogotá: ISBN. Págs., 8-15.
49. 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*. Págs.,23-27.
50. Martina, P. E. (2006). Análisis Comparativo de una Propiedad Termodinámica. *Grupo de Investigaciones de Energías Renovables (GIDER)* Págs., 1-5.
51. Matamorros, R. (2013). Introducción a la Biodigestión, Grupo IFES-Roberto . *Matamorros&Asociados*.Págs., 20-28.
52. Meteored. (2013). Clima latinoamericano: *Meteored.com.ec*. 1-4.
53. Monar, U. (2008). *Diseño de un biodigestor para una Finca del Recinto San Luis de las Mercedes del cantón las Naves de la provincia de Bolívar*. Guayaquil: ESPOL.
54. OMM. (2013). Nuevo récord de gases de efecto invernadero. *AFF, Organización Mundial de Meteorología*. Págs., 1-3.
55. Pérez, W. (2008). El biodigestor una técnica para obtener gas y abono orgánico. *Noticias*. Págs. 1-2.
56. rcTIME. (2007). Sensor de Gas MQ-2. *Sensores de Gases*. Págs., 1-2.
57. Rico, J. (2007). Energía de la biomasa. *Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía*. Págs., 9-15.
58. Rodríguez, J. C. (2008). *Energías Renovables y Eficiencia Energética*. Canarias: ISBN. Págs., 4-15.
59. Royo, J. (2002). *Biomasa: Energía*. Cuba. Págs., 2-8.
60. Sac, B. (2002). *Las Fuentes Renovables de Energía*. Chile. Págs., 2-6.
61. Saldarreaga, D. (2012). El metano es 23 veces más fuerte que el dioxido de carbono. *A.F.F.* Págs., 1-3.
62. Samayoa, S. (2012). Implementación de Sistemas de Biodigestión en Ecoempresas. *SNV*. Págs., 14-19.
63. Sampieri, R. H. (1991). *Metodología de la Investigación*. Mexico: Mc.
64. Sebastián, J. (2002). *Alternativas energéticas Nacionales*. Cuba. Págs., 5

65. Sogari, N. (2006). Diseño de un biodigestor para obtener metano utilizando excremento de vacas y cerdos en la Escuela Agrotécnica de la UNNE. *Escuela Agrotécnica UNNE*. Págs., 3-6.
66. Soubes, M. (1994). Biotecnología de la digestión anaerobia. *III Taller y Seminario Latinoamericano*. Págs., 136-148.
67. Stuckey, D. (1983). Technology Assesment Study of Biogas in Developing Countries. *International Reference Center for Waste Disposal*. Págs., 16-22.
68. Vergara, M. (2008). Las cifras de gas en Ecuador. *Desifrando las cifras*. Págs., 15-16.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

1. Aparcana, S. 2008. *Estudio sobre el valor fertilizante de los productos del proceso "fermentación anaeróbica" para producción de biogás*. Lima. Perú.
2. Azcón, J y Talón, M. 2000. *Fundamentos de fisiología vegetal*. Ediciones Universidad de Barcelona. España.
3. Baldeón, P. 2009. *Efecto de la aplicación de biol activado y silicio en la calidad de cultivo de alcachofa (PiCynara scolymus) en Latacunga, Ecuador*. Tesis de grado. Escuela Agrícola Panamericana El Zamorano.
4. Dobermann, A. 2000. *Arroz: desórdenes nutricionales y manejo de nutrientes*. International Rice Research Institute e Inpofos.
5. Fregoso, M; Ferrera, R. 2001. *Producción de biofertilizante mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo*. Instituto Tecnológico Agropecuario No. 2. Yucatán. México.
6. Frioni, L. 1999. *Procesos Microbianos*. Editorial de la Fundación Universidad Nacional de Río Cuarto. Argentina.
7. Gomero, L. 2005. Los biodigestores campesinos: una innovación para el aprovechamiento de los recursos orgánicos. *Red de Acción en Alternativa al uso de Agroquímicos RAAA*. Lima. Perú.
8. Ito, S. 2006. *Caracterización y evaluación de los factores que determinan la calidad nutricional e inocuidad en la producción de fertilizantes orgánicos fermentados*. CATIE. Turrialba. Costa Rica.

9. Marchaim, U. 1992. Biogas processes for sustainable development. Migal Galilee Technological Centre Kiryat Shmona y FAO. Roma. Italia.
10. Pacheco, F. 2006. Producción, utilización y algunos aspectos técnicos de los biofermentos. Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica.
11. Pinheiro, S. 2000. *Manual práctico de Agricultura Orgánica*. Capítulo Biofertilizantes. Fundación Junqueira Candiru. Brasil.
12. Restrepo, J. 1998. *Laidea y el arte de fabricar los abonos orgánicos fermentados*. Managua. Nicaragua. SIMAS.
13. Romero, J y Simanca, J. 2005. *Diseño de un biodigestor de canecas en serie para obtener gas metano y fertilizantes a partir de la fermentación de excrementos de cerdo*. Universidad de Pamplona. Pamplona. España.
14. Sener, R. 2005. *Obtención de biogás mediante la fermentación anaerobia de residuos alimentarios*. Madrid, España.
15. Solari, G. 2004. *Diseño de construcción de un sistema de digestión Batch de 10 metros cúbicos para la producción de biogás en el Fundo Agropecuario de la Universidad Alas Peruanas*. Lima, Perú.
16. Soria, M; Pereyda, G. 2001. *Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo*. Montecillo, México.
17. Wong, M y Jiménez, E. 2005. *Comparación del efecto de dos biofertilizantes líquidos a base de estiércol caprino y vacuno sobre parámetros de crecimiento de algarrobo en fase de vivero*. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador.

ANEXOS

ANEXO 1. Tabla de equipos y materiales utilizados en el ensayo.

Cant.	Materiales Equipos /	Característica	Precio (USD)
1	PC de Escritorio	Windows Xp, Procesador AMD 1.2GHz, RAM 1GB, SO 32 bits	900
1	PCI 6120 Multifunction DAQ	Puerto PCI; 4 Entradas Analógicas; 2 Salidas analógicas a 16 bits; 8 líneas de E/S digitales; 2 contadores de 24 bits; disparo analógico y digital.	1200
1	Software de NI	LabView 7.1	20
2	Tanque	Acero Inoxidable; 1/16" de espesor; 40 litros de capacidad;	120
1	Lana de vidrio	Espesor 25 mm; 1,2 mts ancho x 2,5 mts largo; color amarillo;	15
2	Manómetros	Presión Máxima 0-50psi; Conexión inferior 3/8 plg, con Glicerina; caratula 2 plg; Bourdon de Bronce.	12
6	llaves de globo	Inoxidable; 1/2plg	12
1	Tubo carga	Acero Galvanizado; diámetro 2 1/2 plg; cédula 1/8 plg; longitud 1,8 mts; roscado con 1 tapa en el extremo.	4
1	Tubo instrumentación	Acero galvanizado; diámetro 1/2 plg; cédula 1/8 plg; longitud 1,5mts.	3
2	Termocupla	Tipo "J"(cromel alumel); temperatura máxima 1 317 °C.	30
1	Equipo HANNA	pH 0-14 (+/-0,1); Temperatura 0-60°C (+/-0,1); 0-1999 ppm (TDS); EC 0.00-4.00 mS/cm. Sonda HI1285-6 1mts cable.	210
100	Tiras pH	pH 0-14; modelo CVQ2051	15
1	Termómetro	Con Carátula 1/2 plg; rango -10 a +50 °C; tipo bolígrafo.	10
1	Balanza	Capacidad 15 kg; 33 lbs; Tipo mecánica; plato hondo.	15
2	Goma de Vehículo	Tipo dona; capacidad 40lts; presión máxima 8 psi.	30
1	Quemador	Tipo busen de laboratorio	30
2	Recipientes de mica	1) Capacidad 25 lts graduados; 2) Capacidad 8 lts.	15
1	Manguera	Tipo industrial; 4 mts.	3
TOTAL			2644 USD

ANEXO 2. Proceso de recopilación, medición y mezcla de las excretas del ganado vacuno.



Recoger los excrementos del ganado.



Medir los kilogramos de excretas.



Mezcla del excremento del ganado.



Llenado de los tanques biodigestores.



Medición de temperatura y pH.

ANEXO 3. Tabla para recopilación de datos manualmente del biodigestor 1.

HOJA DE ENSAYOS BIOMASA RESIDUAL ANIMAL

NOMBRE: Santos W.
 FECHA: 21/10/13
 TIPO: Vacuno
 VOLUMEN BIOMASA
 (kg): 500 kg

FECHA	HORA	T. Amb. (°C)	T. Biomasa (°C)	pH	ppm METANO	PRESIÓN ATM. (hPa)	PRESIÓN (psi)
21/10/13	08H00	13,3	17,4	6,5	5510,04	1,03446	0,00328
	14H00	22	18,1	6,4	5512,12	1,03501	0,00334
	21H00	16,5	17,9	6,6	5501,30	1,03507	0,00330
24/10/13	08H00	13,1	16,8	6,7	7895,9	1,03556	0,00812
	14H00	22,1	17,3	6,5	8123,2	1,03965	0,00712
	21H00	16,3	17,2	6,6	7825,6	1,03432	0,00785
27/10/13	08H00	12	19,6	6,8	8995,8	1,03509	0,02867
	14H00	16,8	19,8	6,7	9245,6	1,03503	0,02564
	21H00	14,6	19,7	6,6	9112,7	1,03556	0,02732
30/10/13	08H00	11,3	21,1	7	9513,4	1,03612	0,04213
	14H00	19,8	22,2	6,9	9612,6	1,03598	0,04123
	21H00	15,8	20,8	6,9	9511,2	1,03601	0,04011
02/11/13	08H00	11,4	26,8	7,1	10653,5	1,03389	0,05024
	14H00	20,2	27,5	6,8	10580,4	1,03405	0,05324
	21H00	16,2	27,2	6,9	10487,9	1,03492	0,05012
05/11/13	08H00	12,6	27,8	7	9834,7	1,03504	0,05659
	14H00	17,6	28,9	7,2	9812,5	1,03509	0,05610
	21H00	15,5	27,7	7	9723,6	1,03501	0,05612
08/11/13	08H00	10,6	32,8	7	12354,6	1,03701	0,05730
	14H00	21,3	33,5	7,1	12576,4	1,03507	0,05820
	21H00	15,8	32,7	7,1	11987,3	1,03501	0,05534
11/11/13	08H00	10,6	28,7	7	11674,6	1,03578	0,05397
	14H00	22,9	32,5	7,2	10623,5	1,03511	0,05645
	21H00	16,4	30,8	7	10453,2	1,03598	0,05360

ANEXO 4. Tabla de datos del biodigestor sin aislamiento térmico.

(1) Días	(2) Temperatura ambiental del aire [°C]			(3) Temp. promedio Biodigestor [°C]	(4) Presión del Gasómetro [kg/cm ²]	(5) Presión del ambiente [kg/cm ²]	(6) Presión Total [kg/cm ²]	(7) Volumen Biogás [ml]	(8) Acidez Biomasa [pH]	(9) Masa Generada (M) [kg]	(10) Masa Total [kg]
	T [Normal]	TM [Máx]	Tm [mín]								
18	16,5	22	13,3	18,1	0,00331	1,03501	1,03832	86,5	6,5	0,0001	0,0001
19	16,3	22,1	13,1	17,6	0,00731	1,03501	1,04232	119,0	6,6	0,0001	0,0002
20	16,1	20	11,6	18,2	0,00823	1,03603	1,04426	153,6	6,5	0,0002	0,0004
21	15,8	20,5	12	17,8	0,01051	1,03501	1,04552	246,2	6,6	0,0003	0,0007
22	15,6	18,6	10,6	16,7	0,01279	1,03501	1,04781	266,5	6,6	0,0003	0,0010
23	16,5	21,1	12,2	16	0,01508	1,03603	1,05111	329,5	6,5	0,0004	0,0014
24	16,9	21,8	10,6	18,5	0,01736	1,03399	1,05136	400,1	6,7	0,0005	0,0018
25	15,8	21,7	12	19,7	0,02056	1,03399	1,05455	449,5	6,6	0,0005	0,0023
26	14,9	19,2	10,6	21,8	0,02513	1,03399	1,05912	482,4	6,7	0,0006	0,0029
27	14,6	16,8	12	19,8	0,02787	1,03501	1,06289	455,5	6,7	0,0005	0,0034
28	17,2	22,5	7,4	21,8	0,02717	1,03603	1,06320	463,3	6,8	0,0005	0,0039
29	17,9	23,4	12	22,9	0,03427	1,03501	1,06928	630,4	6,8	0,0007	0,0046
30	15,8	19,8	11,3	21,5	0,04067	1,03603	1,07670	685,2	6,9	0,0008	0,0054
31	15,8	21,9	7,1	23,1	0,03926	1,03603	1,07529	657,8	6,8	0,0008	0,0062
32	15,4	19,3	11,2	27,1	0,04341	1,03603	1,07944	747,1	6,8	0,0009	0,0071
33	16,2	20,2	11,4	26,9	0,05026	1,03399	1,08426	945,5	6,9	0,0011	0,0082
34	16,8	22,4	11,4	28,8	0,05392	1,03399	1,08791	1121,3	7,1	0,0013	0,0095
35	14,8	20,8	12,5	29,3	0,05529	1,03399	1,08928	1209,8	7,1	0,0014	0,0109
36	15,5	17,6	12,6	28,6	0,05620	1,03501	1,09122	1298,2	7,1	0,0015	0,0125
37	16,5	24,4	11,8	29,3	0,05620	1,03501	1,09122	1364,9	7,1	0,0016	0,0140
38	14,7	17,4	6,8	31,7	0,05380	1,03501	1,08881	1491,8	7,1	0,0018	0,0158
39	15,8	21,3	10,6	32,7	0,05620	1,03603	1,09224	1505,2	7,1	0,0018	0,0176
40	15,2	19,3	11,3	32,5	0,05575	1,03501	1,09076	1494,1	7,1	0,0018	0,0193
41	14,9	19,6	10,8	31,7	0,05575	1,03603	1,09178	1381,9	7,1	0,0016	0,0210
42	16,4	22,9	10,6	29,7	0,05483	1,03603	1,09087	1326,1	7,1	0,0015	0,0225
43	18,7	23,5	12,1	28,3	0,05529	1,03501	1,09030	1293,2	6,8	0,0015	0,0240
44	15,4	18,7	8,2	27,3	0,04766	1,03399	1,08166	1229,5	6,8	0,0014	0,0255
45	15,2	19,7	10,7	27,6	0,04524	1,03297	1,07821	1309,2	6,8	0,0015	0,0270

Continuación de la tabla del ANEXO 4.

(1) Nº	(2) Temperatura ambiental del aire [°C]			(3) Temp. promedio Biodigestor [°C]	(4) Presión Promedio Gasómetro [kg/cm ²]	(5) Presión Ambiente [kg/cm ²]	(6) Presión Total [kg/cm ²]	(7) Volumen Biogás [ml]	(8) Acidez Biomasa [pH]	(9) Masa Generada (M) [kg]	(10) Masa Total [kg]
	T [Norm]	TM [Máx]	Tm [mín]								
46	16,2	19	10,8	28,3	0,04478	1,03399	1,07877	1227,0	6,8	0,0014	0,0284
47	15,8	20	7,9	27,3	0,04218	1,03399	1,07617	1089,9	6,8	0,0013	0,0297
48	16,2	20,8	10	27,8	0,04432	1,03501	1,07934	1125,4	6,8	0,0013	0,0310
49	15,2	18,8	8,3	26,6	0,04192	1,03603	1,07795	1007,7	6,8	0,0012	0,0322
50	16,2	19	10,8	27,3	0,03930	1,03399	1,07329	1002,2	6,8	0,0012	0,0334
51	14,9	19,6	8,4	27,4	0,03624	1,03501	1,07125	895,5	6,7	0,0010	0,0344
52	15,8	21,3	11,6	27,8	0,03930	1,03603	1,07533	903,7	6,7	0,0010	0,0354
53	15,4	19,3	11,2	27,2	0,03884	1,03603	1,07487	805,2	6,7	0,0009	0,0364

ANEXO 5. Proceso de toma de datos del biodigestor sin aislamiento térmico.



Medición de temperatura.



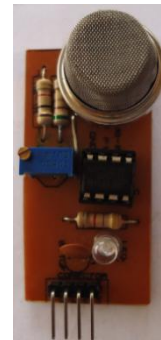
Medición de pH.



Termómetro tipo bolígrafo.

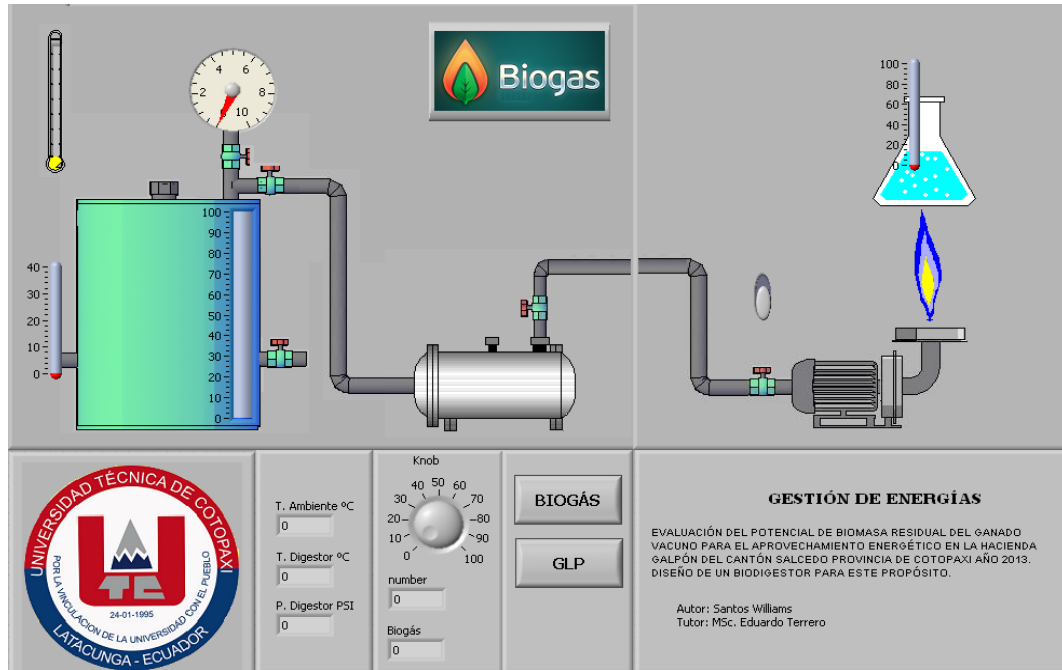


Biodigestor tipo "Batch".

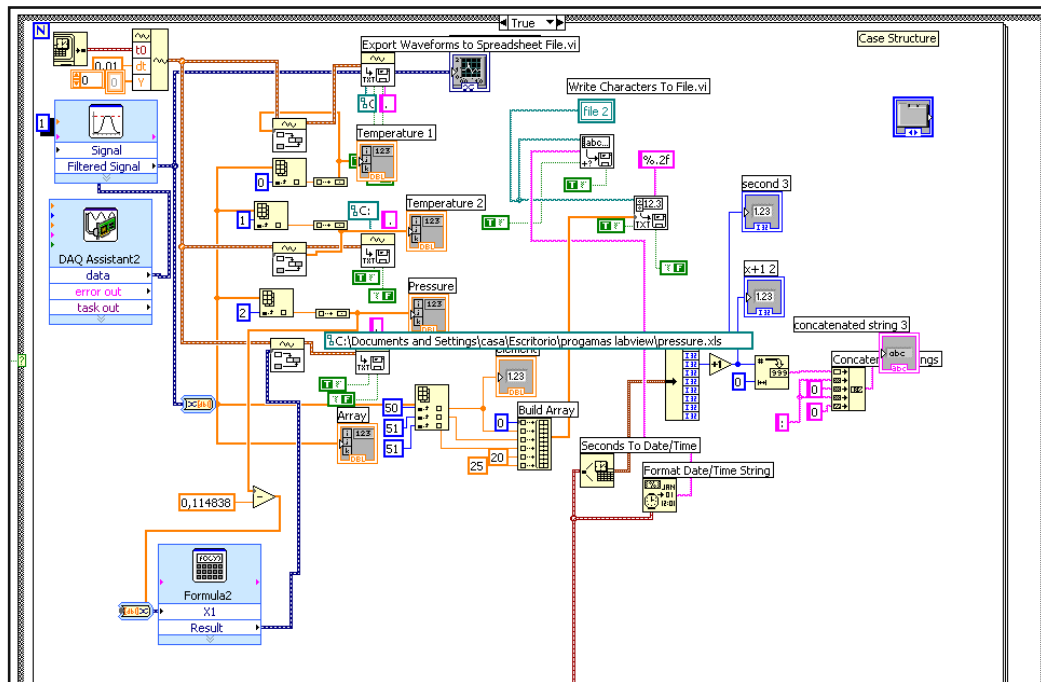


Sensor SAW-MQ2.

ANEXO 6. Pantalla de monitoreo de datos del biodigestor con aislamiento térmico.

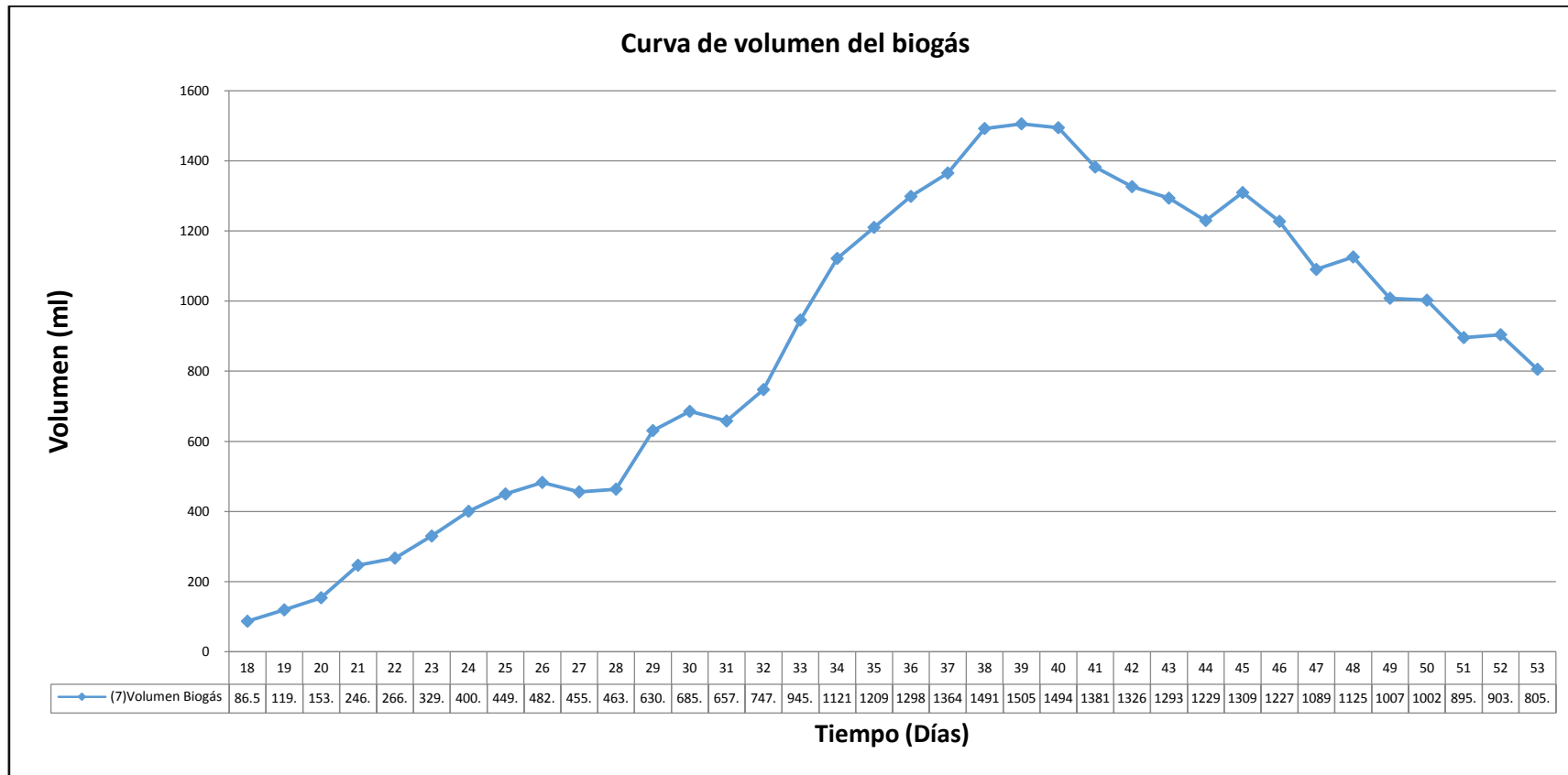


Pantalla gráfica del monitoreo y registro de datos del biodigestor con aislamiento.

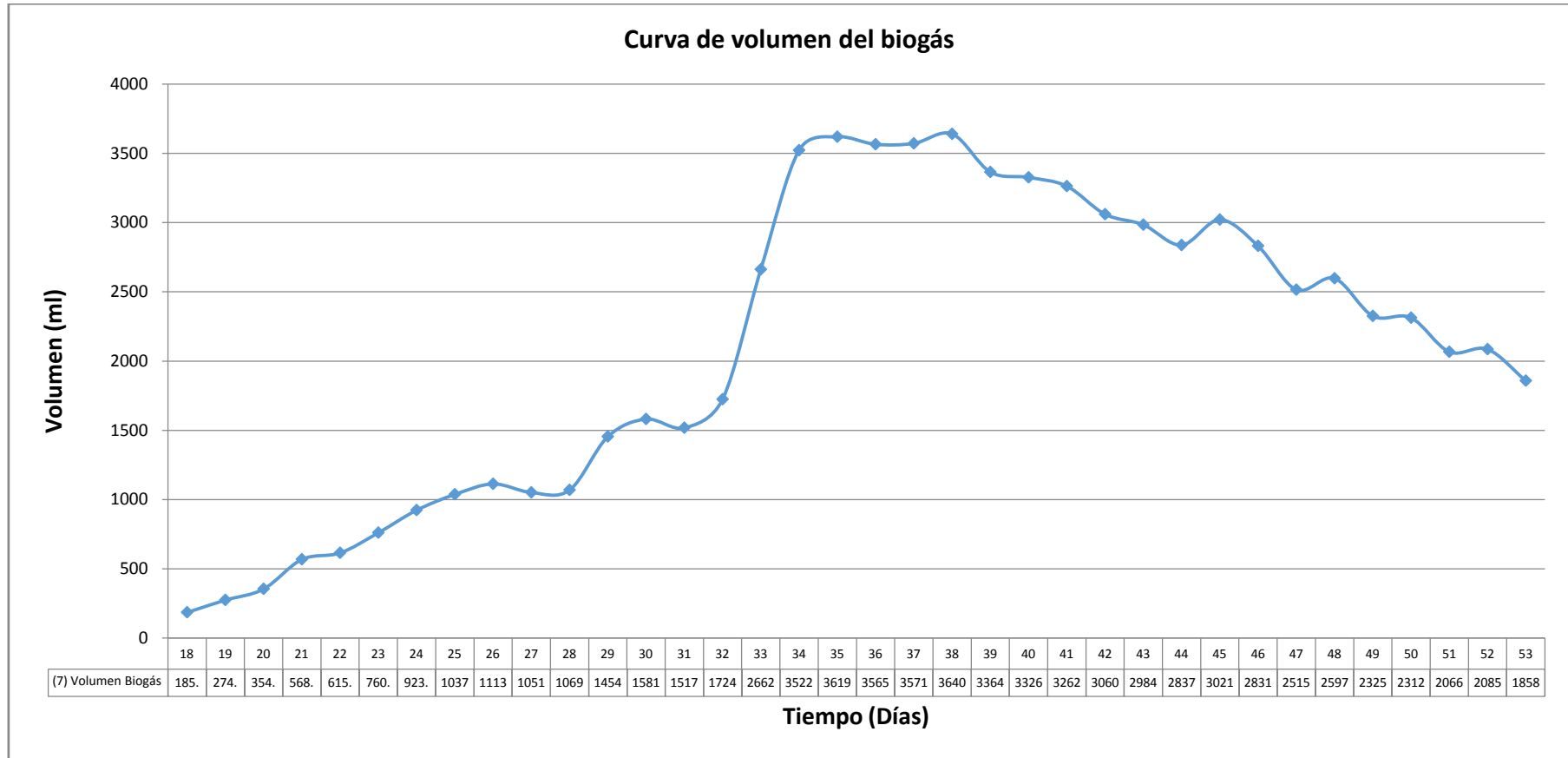


Programación de la pantalla gráfica del monitoreo y registro de datos.

ANEXO 7. Comportamiento del volumen del biodigestor sin aislamiento térmico.



ANEXO 8. Comportamiento del volumen del biodigestor con aislamiento térmico.



ANEXO 9. Tablas de la cantidad de metano obtenido en los biodigestores.

BIODIGESTOR 1			BIODIGESTOR 2		
Fecha	ppm del Metano	% ppm	Fecha	ppm del Metano	% ppm
21/10/2013	5507,03	27,5	21/10/2013	9703,49	48,52
23/10/2013	7899,90	39,5	23/10/2013	10882,5	54,41
25/10/2013	9351,78	46,8	25/10/2013	12029,8	60,15
27/10/2013	9149,40	45,7	27/10/2013	12586,1	62,93
29/10/2013	9624,39	48,1	29/10/2013	12360,1	61,80
31/10/2013	9229,44	46,1	31/10/2013	12419,1	62,10
02/11/2013	10566,63	52,8	02/11/2013	12511,8	62,56
04/11/2013	9795,58	49,0	04/11/2013	13209	66,05
06/11/2013	12601,29	63,0	06/11/2013	12795,3	63,98
08/11/2013	11955,08	59,8	08/11/2013	12961,8	64,81
10/11/2013	12812,13	64,1	10/11/2013	13304,3	66,52
12/11/2013	10089,49	50,4	12/11/2013	12424,7	62,12
14/11/2013	9742,04	48,7	14/11/2013	12588,5	62,94
16/11/2013	9218,93	46,1	16/11/2013	12108	60,54
18/11/2013	9504,93	47,5	18/11/2013	12086,7	60,43
20/11/2013	9081,52	45,4	20/11/2013	12069,4	60,35
22/11/2013	10588,25	52,9	22/11/2013	12043,6	60,22
	9806,93	49,0		12240,2	61,20

ANEXO 10. Tabla de datos promedios alcanzados en los ensayos.

En la tabla 1 se muestran los datos promedios que se obtuvieron durante todo el experimento realizado en una cubierta exterior translúcida o transparente. El ambiente generado por el plástico de invernadero, permite tener un micro clima que ayuda a conservar la temperatura de los biodigestores en la fase mesoflica (20 a 40 °C), comprobando que la temperatura promedio de la cubierta y la del medio ambiente fue de 25 y 21 °C, respectivamente. Entonces, para B1 la temperatura interna registrada es de 27,5 °C y B2 con 32,3 °C, a una presión interna del B1 de 0,03926 kg/cm² y B2 registró 0,07356 kg/cm², con un volumen para B1 de 653 ml y B2 con 2 515 ml. En este experimento se puede notar claramente el micro clima que se genera al interior del invernadero.

Tabla 1. Datos promedios del experimento bajo cubierta.

	Temperatura ambiente promedio (°C)	Temperatura al interior invernadero (°C)	Temperatura del reactor (°C)	Presión (kg/cm ²)	Volumen biogás (ml)
B 1	21	25	27,5	0,03926	653
B 2	21	25	32,3	0,07356	2515

ANEXO 11. Tabla de datos del biodigestor con aislamiento térmico.

(1) Nº	(2) Temperatura ambiental del aire [°C]			(3) Temp. promedio Biodigestor [°C]	(4) Presión Promedio Gasómetro [kg/cm ²]	(5) Presión Ambiente [kg/cm ²]	(6) Presión Total [kg/cm ²]	(7) Volumen Biogás [ml]	(8) Acidez Biomasa [pH]	(9) Masa Generada (M) [kg]	(10) Masa Total [kg]
	Días	T [Norm]	TM [Máx]								
18	16,5	22	13,3	18,1	0,01025	1,03501	1,04526	185,3	6,5	0,0002	0,0002
19	16,3	22,1	13,1	20,2	0,01125	1,03501	1,04626	274,6	6,6	0,0003	0,0005
20	16,1	20	11,6	17,6	0,01265	1,03603	1,04869	354,4	6,6	0,0004	0,0009
21	15,8	20,5	12	21,7	0,01617	1,03501	1,05118	568,1	6,7	0,0006	0,0016
22	15,6	18,6	10,6	19,3	0,01968	1,03501	1,05470	615,0	6,5	0,0007	0,0023
23	16,5	21,1	12,2	18,3	0,02320	1,03603	1,05923	760,4	6,6	0,0009	0,0031
24	16,9	21,8	10,6	21,8	0,02671	1,03399	1,06071	923,4	6,8	0,0011	0,0042
25	15,8	21,7	12	21,2	0,03164	1,03399	1,06563	1037,3	6,7	0,0012	0,0054
26	14,9	19,2	10,6	21,4	0,03867	1,03399	1,07266	1113,1	6,7	0,0013	0,0067
27	14,6	16,8	12	22,3	0,04288	1,03501	1,07789	1051,2	6,8	0,0012	0,0079
28	17,2	22,5	7,4	23,5	0,04180	1,03603	1,07784	1069,0	6,9	0,0012	0,0091
29	17,9	23,4	12	25,3	0,05273	1,03501	1,08774	1454,7	7	0,0017	0,0108
30	15,8	19,8	11,3	27,6	0,06257	1,03603	1,09860	1581,2	7	0,0019	0,0127
31	15,8	21,9	7,1	29,1	0,06040	1,03603	1,09643	1517,9	7,1	0,0018	0,0145
32	15,4	19,3	11,2	32,3	0,06679	1,03603	1,10282	1724,0	7,1	0,0021	0,0166
33	16,2	20,2	11,4	33,6	0,07733	1,03399	1,11132	2662,0	7,2	0,0032	0,0197
34	16,8	22,4	11,4	34,6	0,08295	1,03399	1,11695	3522,1	7,2	0,0042	0,0240
35	14,8	20,8	12,5	35,2	0,08506	1,03399	1,11906	3619,6	7,3	0,0044	0,0283
36	15,52	17,6	12,6	34,6	0,08647	1,03501	1,12148	3565,1	7,3	0,0044	0,0327
37	16,5	24,4	11,8	35,4	0,08647	1,03501	1,12148	3571,4	7,3	0,0043	0,0370
38	14,7	17,4	6,8	35,2	0,08277	1,03501	1,11778	3640,1	7,2	0,0044	0,0414
39	15,8	21,3	10,6	34,8	0,08647	1,03603	1,12250	3364,8	7,2	0,0041	0,0455
40	15,2	19,3	11,3	34,3	0,08577	1,03501	1,12078	3326,1	7,2	0,0040	0,0495
41	14,9	19,6	10,8	33,8	0,08577	1,03603	1,12180	3262,9	7,1	0,0040	0,0534
42	16,4	22,9	10,6	33,7	0,08436	1,03603	1,12039	3060,1	7,1	0,0037	0,0571
43	18,7	23,5	12,1	33,3	0,08506	1,03501	1,12007	2984,2	7	0,0036	0,0607
44	15,4	18,7	8,2	32,5	0,07333	1,03399	1,10732	2837,3	7	0,0034	0,0641
45	15,2	19,7	10,7	32,6	0,06960	1,03297	1,10257	3021,2	7	0,0036	0,0677

Continuación de la tabla del ANEXO 11.

(1) Nº	(2) Temperatura ambiental del aire [°C]			(3) Temp. promedio Biodigestor [°C]	(4) Presión Promedio Gasómetro [kg/cm ²]	(5) Presión Ambiente [kg/cm ²]	(6) Presión Total [kg/cm ²]	(7) Volumen Biogás [ml]	(8) Acidez Biomasa [pH]	(9) Masa Generada (M) [kg]	(10) Masa Total [kg]
	T [Norm]	TM [Máx]	Tm [mín]								
46	16,2	19	10,8	33,5	0,06889	1,03399	1,10289	2831,4	7	0,0034	0,0711
47	15,8	20	7,9	32,3	0,06489	1,03399	1,09889	2515,2	7	0,0030	0,0741
48	16,2	20,8	10	32,8	0,06819	1,03501	1,10320	2597,1	7	0,0031	0,0772
49	15,2	18,8	8,3	31,6	0,06449	1,03603	1,10052	2325,5	7	0,0028	0,0799
50	16,2	19	10,8	32,3	0,06046	1,03399	1,09445	2312,8	7	0,0027	0,0827
51	14,9	19,6	8,4	32,4	0,05576	1,03501	1,09077	2066,5	6,9	0,0024	0,0851
52	15,8	21,3	11,6	32,8	0,06046	1,03603	1,09649	2085,5	7	0,0025	0,0876
53	15,4	19,3	11,2	32,2	0,05976	1,03603	1,09579	1858,1	7	0,0022	0,0898

ANEXO 12. Tabla de registro de datos de los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre año 2013.

FORMATO DE REGISTRO HACIENDA GALPÓN

NOMBRE: Willams Santos

FECHA: 01/10/13

TIPO: Registro mes

MESES		Octubre	Noviembre	Diciembre
Energía Eléctrica	kWh	638	662	746
	Costo (USD)	52	54	60
GLP	kg-GLP	90	90	135
	Costo (USD)	144	144	216
Leña	kg	5	10	15
	Costo (USD)	8	16	24
Abono Químico	kg Urea		250	
	Costo (USD)		240	

ANEXO 13. Sensor de estado sólido MQ-2.

Para determinar la cantidad de ppm de metano se utiliza un sensor de estado sólido MQ-2, que detecta el gas por medio de la conducción eléctrica de un tubo cerámico y varía está de acuerdo a la concentración del gas bajo análisis. Para lograr esto, hace falta que el sensor tome cierta temperatura interna, provista por un calentador resistivo propio, de la precisión de dicha temperatura depende la precisión de la medición, por esta razón es importante la exactitud de la tensión de alimentación del calefactor sea de +5 Vcc (rcTIME, 2007). En la figura 1 se presenta el circuito para la conexión del sensor.

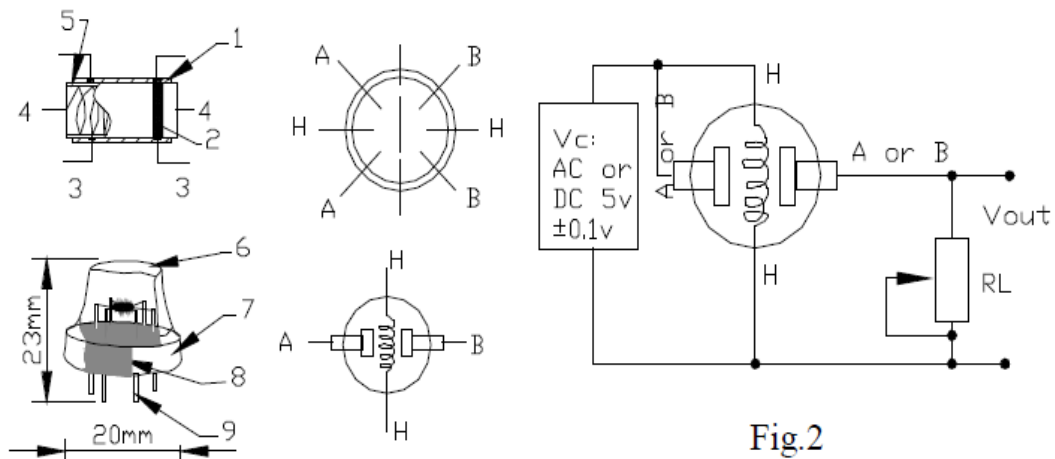


Figura 1. Circuito del sensor MQ2

Desde los inicios de la presente investigación, respecto a la obtención de gas metano a partir de las excretas del ganado vacuno de la hacienda Galpón ha surgido la inquietud de conocer la energía entregada por el biogás. Dado que esta propiedad es importante para establecer el rendimiento térmico y económico de un combustible, por tal razón surgió la necesidad construir un sensor que determine las partículas por millón que existe en el biogás del presente ensayo.

En la figura 2 se presenta el diseño de la circuitería del sensor SAW-MQ2 para medir la cantidad de partículas del gas metano.

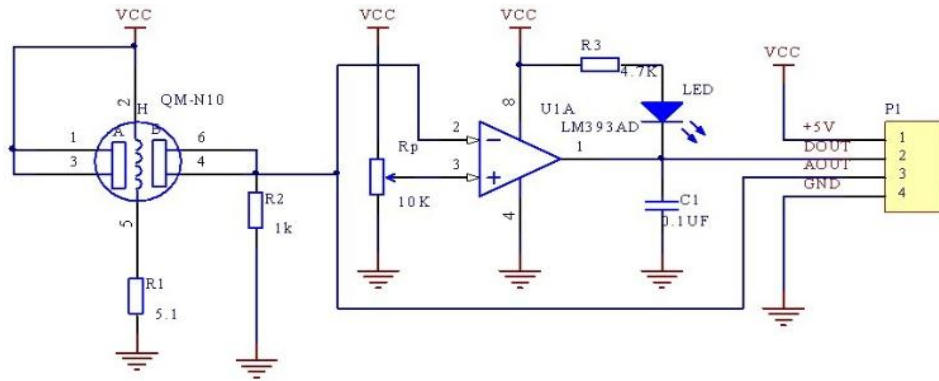


Figura 2. Circuito sensor MQ-2

ANEXO 14. Tablas de los consumos energéticos de la hacienda galpón.

Tabla 1. Consumo anual de energía eléctrica (año 2013).

MESES	CONSUMO (kWh)	V/Unit kWh (USD)	V/Total (USD)
Enero	580	0,0816	47,328
Febrero	606	0,0816	49,4496
Marzo	700	0,0816	57,12
Abril	666	0,0816	54,3456
Mayo	676	0,0816	55,1616
Junio	630	0,0816	51,408
Julio	625	0,0816	51
Agosto	610	0,0816	49,776
Septiembre	628	0,0816	51,2448
Octubre	638	0,0816	52,0608
Noviembre	662	0,0816	54,0192
Diciembre	746	0,0816	60,8736
Total	7767		633,79

Tabla 2. Consumo mensual de GLP (año 2013).

MESES	CONSUMO GLP (kg)	V/Unit (kg) (USD)	V/Total (USD)
Enero	90	1,243	111,87
Febrero	90	1,243	111,87
Marzo	135	1,243	167,805
Abril	135	1,243	167,805
Mayo	90	1,243	111,87
Junio	90	1,243	111,87
Julio	135	1,243	167,805
Agosto	135	1,243	167,805
Septiembre	90	1,243	111,87
Octubre	90	1,243	111,87
Noviembre	135	1,243	167,805
Diciembre	135	1,243	167,805
Total	1350		1678,05
Promedio	112,5	1,24	139,84

Continuación del Anexo 14.

Tabla 3. Consumo mensual de leña (año 2013).

MESES	CONSUMO LEÑA (kg)	V/Unit (kg) (USD)	V/Total (USD)
Enero	25	1,6	40
Febrero	30	1,6	48
Marzo	15	1,6	24
Abril	20	1,6	32
Mayo	10	1,6	16
Junio	15	1,6	24
Julio	10	1,6	16
Agosto	10	1,6	16
Septiembre	15	1,6	24
Octubre	5	1,6	8
Noviembre	10	1,6	16
Diciembre	15	1,6	24
Total	180		288
Promedio	15,00	1,60	24,00

Tabla 4. Consumo mensual de urea (año 2013).

MESES	UREA	CONSUMO UREA (kg)	V/Unit kWh (USD)	V/Total (USD)
	46-0-0			
Febrero	8	400	0,65	260
Julio	7	350	0,65	227,5
Noviembre	5	250	0,65	162,5
Total	20 qq	1000		650
Promedio		333,33	0,65	216,67

Continuación del Anexo 14.

Tabla 5. Consumo de portadores energéticos en la hacienda Galpón (año 2013).

	Energía Eléctrica (kW-h)	GLP (45 kg)	Leña (kg)	Abono Químico (kg)
Consumo	7767	1350	180	1000
Promedio	647,25	112,5	15	333,3

Tabla 6. Costos de portadores energéticos generados por la hacienda Galpón.

	USD. Energía Eléctrica (kWh)	USD. GLP (45 kg)	USD. Leña (kg)	USD. Abono Químico (kg)
Valores	633,7	1678	288	650
	TOTAL GASTO			3249,7

ANEXO 15. Tabulación del ganado vacuno y otros animales pertenecientes a la hacienda galpón.

Tabla 1. 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	TOTAL m3 biogás/animal-día
Vaca	280	110	10	1100	44
Toro	410	28	15	420	16.8
Ternero	115	52	4	208	8.32
Caballo	430	15	15	225	9
TOTAL	1235 kg	205		1953	78.12

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

	Excretas de Ganado vacuno [kg]	Agua [kg]	Biomasa [kg]	Relación
Biodigestor 1	10	15	25	1:1.5
Biodigestor 2	10	15	25	1:1.5
	20	30	50	

Tabla 3. Porcentajes de volumen del reactor.

Reactor	Espacio [Litros]	% Volumen
Biomasa	28	70 %
Gasómetro	12	30 %
	40	100 %

ANEXO 16. Curvas del sensor de estado sólido SAW-MQ2.

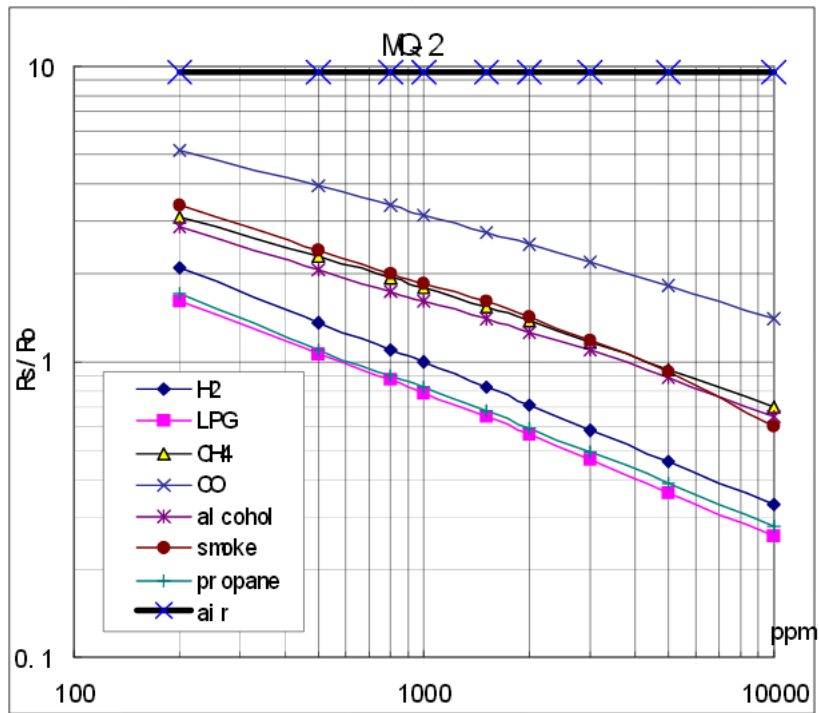


Fig.3 is shows the typical sensitivity characteristics of the MQ-2 for several gases.

in their: Temp: 20 °C,
Humidity: 65%,
O₂ concentration 21%
RL=5k Ω

R₀: sensor resistance at 1000ppm of H₂ in the clean air.

R_s:sensor resistance at various concentrations of gases.

ANEXO 17. Tablas de valores al combustionar GLP y biogás.

Tabla 1. Valores iniciales del medio ambiente antes del ensayo.

Temperatura ambiente (°C)	Presión atmosférica (mm Hg)	Presión manométrica (cm HO ₂)	Vol. Inicial (l)	Vol. Final (l)	Temperatura inicial del agua (°C)
21,8	554	17	6	1	16,8

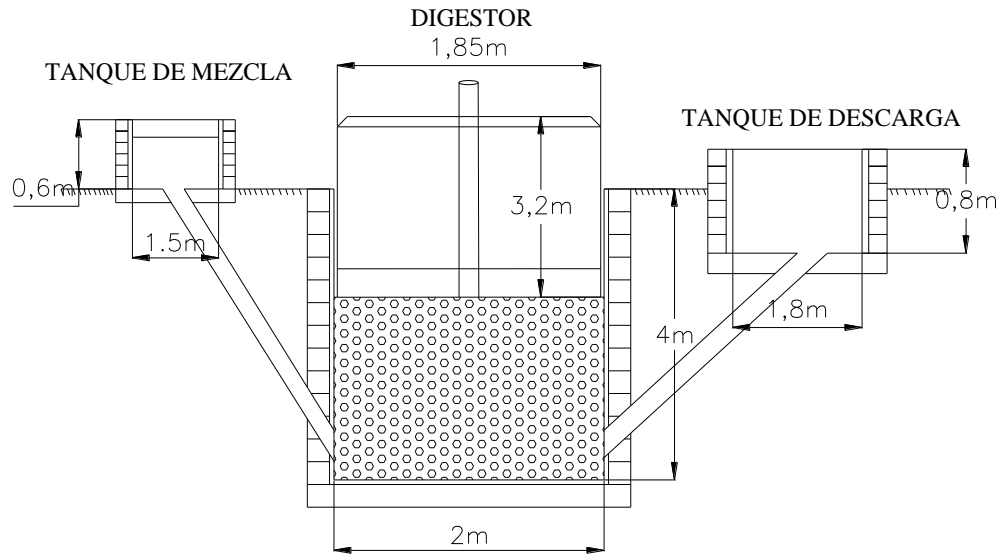
Tabla 2. Datos de temperatura del agua vs. volumen de GLP.

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 3. 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		

ANEXO 18. Plano del biodigestor de domo fijo para 8 m³ de la hacienda Galpón.



ANEXO 19. Datos detallados criterio del Valor Actual Neto (VAN).

Este criterio permite determinar el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros producidos por una inversión. El cual viene dado por la siguiente ecuación (Mahmood, 2005).

$$VAN = -A + \frac{Q_1}{(1 + k_1)} + \frac{Q_1}{(1 + k_1) \cdot (1 + k_2)} + \dots + \frac{Q_n}{(1 + k_1) \dots (1 + k_n)} \quad (9)$$

INVERSIÓN	6055,8
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 26041,47

El Valor actual neto de la inversión es de **26 041,47** USD lo que significa que el biodigestor de domo fijo con aislamiento térmico producirá beneficios, determinando que el proyecto es aceptable.

ANEXO 20. Datos detallados criterio de la Tasa Interna de Retorno (TIR).

El TIR es un indicador de rentabilidad de un proyecto, el mismo que se lo relaciona con la tasa de referencia, y al ser mayor se puede decir que el proyecto es aceptable caso contrario se rechaza el proyecto.

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

INVERSIÓN 6055.8

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 %

La Tasa Interna de Retorno de la inversión es del 41 %, lo cual significa que el Biodigestor Domo Fijo con Aislamiento térmico es superior a la tasa referencial del Banco Central del Ecuador (BCE) siendo el proyecto aceptable.

ANEXO 21. Materiales y equipos para el análisis físico del biogás.



Figura 1. Equipo utilizado en el experimento.



Figura 2. Llenado del jeringuilla con biogás.

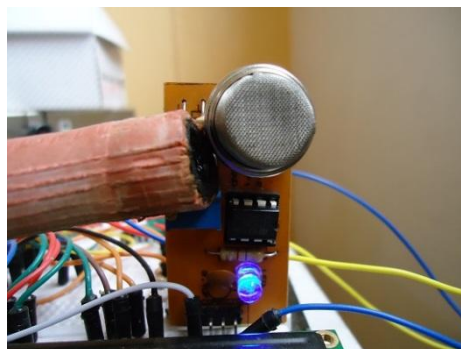


Figura 3. Determinación de las partículas de metano del biogás.

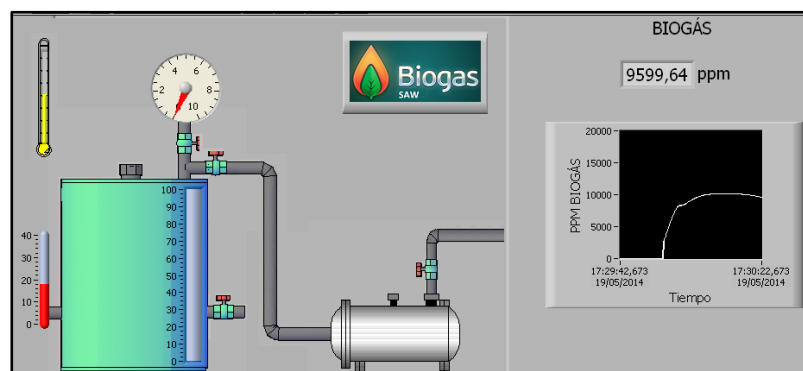


Figura 4. Pantalla de visualización del sensor SAW-BIOGÁS

ANEXO 22. Experimento con el biogás para determinar el poder calórico.



Prueba inicial del biogás.



Llenado del prototipo de pruebas para biogás.



Llama producida en el quemador.



Medición de temperatura del agua.



Incineración del biogás en el que mechero de Bunsen.



Finalización del ensayo.

ANEXO 23. Planimetría de la hacienda Galpón.



Figura 1. Predio de la hacienda Galpón