

Clasificación de tecnologías de micro-generación de energía eléctrica a partir de biogás

Fabián Ruiz Hernández

Snaider Fabián Torres Duarte

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director

Rusber Octavio Rodríguez Velásquez

Dr. (C) Ingeniería Eléctrica

Codirector

Mónica Andrea Botero Londoño

Dra. Ciencias Físicas, Ingeniera Electricista

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

...a mi familia...

Fabián Ruiz Hernández

Contenido

	Pág.
Introducción	14
1 Objetivos	16
1.1 Objetivo General	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2 Fundamentación teórica	17
2.1 El Biogás	17
2.1.1 Definición y composición del biogás.....	17
2.1.2 Características generales del biogás.....	19
2.1.3 Producción de biogás.	19
2.1.4 Tratamiento del biogás.....	20
2.1.5 Aplicaciones del biogás.	21
2.2 Biodigestores.....	21
2.2.1 Tipos de biodigestores.	23
2.2.1.1 Biodigestor de domo fijo (tipo chino).....	23
2.2.1.2 Biodigestor de domo flotante (tipo hindú).....	24
2.2.1.3 Biodigestor de balón plástico o de estructura flexible.	25
2.2.1.4 Planta con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno.	26
2.3 Conversión del biogás en energía eléctrica.....	27

2.3.1 Motores a gasolina.	29
2.3.1.1 Uso del biogás en motores a gasolina.	29
2.3.2 Motores a gas.	30
2.3.2.1 Uso del biogás en motores a gas.	30
2.3.3 Motores a diésel.	31
2.3.3.1 Uso del biogás en motores diésel.	31
2.3.4 Motores a biogás.	32
2.3.5 Micro turbina.	32
2.3.5.1 Uso del biogás en micro-turbinas.	33
2.3.6 Motores de combustión externa: Motor stirling.....	34
2.3.6.1 Uso del biogás en motores stirling.....	35
2.3.7 Celdas de combustible de hidrógeno.	35
2.3.7.1 Uso del biogás en celdas de combustible.....	35
3. Metodología	36
3.1 Estado del arte.....	36
3.2 Guía selección de tecnología	37
3.3 Aplicación a un caso de estudio.....	38
4. Estado de Arte.....	39
4.1 Generación de energía eléctrica a partir de biogás.	40
4.2 Utilización de biogás para uso en motores de cuatro tiempos (diésel o gasolina).....	43
4.3 Análisis del rendimiento de un motor de combustión interna con biogás y aplicación para la generación de energía eléctrica.	46

4.4 Residuos orgánicos producidos en viviendas: una mirada desde su potencial para la producción de energía	47
4.5 Otros estudios.....	50
5. Guía selección tecnología	55
5.1 Fuente de energía	55
5.2 Carga del biodigestor y cálculo de la capacidad de la planta	56
5.3 Elección biodigestor más adecuado	57
5.4 Análisis de la demanda energética de la finca	59
5.5 Cantidad de biogás para suplir la demanda energética	60
5.6 Cantidad de animales para producir el biogás que supla la demanda energética diaria	61
5.7 Sistema de generación de energía	61
5.7.1 Dimensionamiento de equipos de generación de energía eléctrica.	62
5.8 Cantidad de biogás según las horas de funcionamiento de la finca.....	64
6. Caso de Estudio.....	65
6.1 Viabilidad económica	73
6.1.1 Generación con gasolina.	73
6.1.2 Generación con biogás.	74
6.1.3 Comparación de resultados.	75
7. Conclusiones	77
Referencias Bibliográficas	79

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Equivalencias de biogás con otras fuentes de energía	21
<i>Figura 2.</i> Partes básicas de un biodigestor.	22
<i>Figura 3.</i> Biodigestor de domo fijo (tipo chino).....	24
<i>Figura 4.</i> Biodigestor de domo flotante (tipo hindú).....	25
<i>Figura 5.</i> Biodigestor de estructura flexible.	26
<i>Figura 6.</i> Biodigestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno.....	27
<i>Figura 7.</i> Pieza para adaptar un motor de gasolina al uso de biogás.....	43
<i>Figura 8.</i> Motor a gasolina de cuatro tiempos con pieza conectada en la posición del purificador de aire.....	44
<i>Figura 9.</i> Pieza de adaptación para uso de biogás en motor diésel.	44
<i>Figura 10.</i> Diagrama de generación de energía eléctrica.	62
<i>Figura 11.</i> Demanda de energía diaria de la finca.....	68
<i>Figura 12.</i> Demanda diaria de biogás.....	70
<i>Figura 13.</i> Consumo de biogás a la entrada del motor	72

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Composición del biogás en función del sustrato utilizado</i>	18
Tabla 2. <i>Características generales del biogás</i>	19
Tabla 3. <i>Tratamiento del biogás según su uso final.</i>	20
Tabla 4. <i>Datos de consumo y sustitución de combustible en el motor diésel de cuatro tiempos.</i> 45	
Tabla 5. <i>Datos de consumo de combustible del motor de gasolina de cuatro tiempos.</i>	46
Tabla 6. <i>Promedio composición elemental residuos alimenticios.</i>	48
Tabla 7. <i>Micro turbinas disponibles en el mercado.</i>	50
Tabla 8. <i>Datos placa planta eléctrica diésel, YONMAR serie L100AE</i>	51
Tabla 9. <i>Parámetros de operación planta sólo diésel.</i>	51
Tabla 10. <i>Consumo específico de acpm [L/kW.h] y biogás [m³/kW.h] en el sistema combustible dual.</i>	52
Tabla 11 <i>Comparación consumo de acpm en los sistemas: solo acpm y combustible dual (biogás-acpm).</i>	52
Tabla 12. <i>Eficiencia térmica en los sistemas solo diésel y combustible dual.</i>	53
Tabla 13. <i>Producción de biogás por tamaño y tipo de ganado</i>	56
Tabla 14. <i>Resumen de las características de algunos biodigestores</i>	58
Tabla 15. <i>Criterios de evaluación de algunos tipos de biodigestores.</i>	59
Tabla 16. <i>Equivalencia eléctrica de 1 m³ de biogás.</i>	61

Tabla 17. <i>Comparación de tecnologías para generación de electricidad con biogás</i>	64
Tabla 18. <i>Operación promedio de la finca de estudio</i>	66
Tabla 19. <i>Equipos en la finca de estudio y horas de uso</i>	67
Tabla 20. <i>Distribución cargas coincidentes y energía demandada</i>	67
Tabla 21. <i>Cargas coincidentes y franja horaria</i>	69
Tabla 22. <i>Especificaciones técnicas del grupo electrógeno</i>	71
Tabla 23. <i>Resumen de demandas caso práctico.</i>	72
Tabla 24. <i>Estimación de resultados para los dos tipos de combustible</i>	76

Resumen

TÍTULO: CLASIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE MICRO-GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS*.

AUTORES: FABIÁN RUIZ HERNÁNDEZ, SNAIDER FABIÁN TORRES DUARTE**.

PALABRAS CLAVE: biogás, biodigestor, tecnologías de micro-generación.

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo de investigación documenta las tecnologías de micro-generación existentes y adaptables para generar energía eléctrica a partir del uso de biogás proveniente de las excretas de ganado bovino, porcino y avícola producto de actividades agropecuarias. El biogás se obtiene a través de un proceso de fermentación anaerobia en un biodigestor.

A partir de la revisión bibliográfica, se documentó que las tecnologías actuales aplicadas a proyectos de micro-generación a partir de biogás son los moto-generadores de combustión interna y las micro-turbinas, que son equipos que con un tratamiento básico en la purificación del biogás pueden funcionar debido al metano presente en su composición. Otras tecnologías como las celdas de combustible requieren que el biogás sea reformado para mejorar el contenido de hidrógeno. Esta tecnología implica costos más elevados y un manejo consiente de los riesgos asociados al uso de hidrógeno.

Se presenta una guía con aspectos básicos a seguir para aplicar en un caso de ejemplo donde se analiza la viabilidad económica del desarrollo de un proyecto a pequeña escala de micro-generación, comparando el uso de biogás con las tecnologías convencionales (diésel o gasolina) en un equipo disponible comercialmente para el uso de dos tipos diferentes de combustible.

Además, se busca incentivar el uso de fuentes renovables de energía, las cuales causan impactos positivos a nivel social ya que es un método de aplicación que promueve la autonomía energética y abastece una demanda básica de electricidad.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Dr. Rusber Octavio Rodríguez Velásquez. Codirectora: Dra. Mónica Andrea Botero Londoño.

Abstract

Title: Classification of micro-generation technologies of electrical energy from biogas *.

Authors: Fabian Ruiz Hernandez, Snaider Fabian Torres Duarte **.

Keywords: biogas, biodigester, technologies of micro-generation.

Description:

This research paper documents the existing and adaptable micro-generation technologies to generate electricity from the use of biogas from the livestock manure, pigs and poultry products of agricultural activities. Biogas is obtained through an anaerobic fermentation process in a biodigester.

From the literature review, it was documented that the current technologies applied to micro-generation projects from biogas are the internal combustion moto-generators and the micro-turbines, which are equipment that with a basic treatment in the purification of the biogas may work due to the methane present in its composition. Other technologies such as fuel cells require that biogas be reformed to improve hydrogen content. This technology implies higher costs and a conscious management of the risks associated with the use of hydrogen.

A guide is presented with basic aspects to follow to apply in an example case where the economic viability of the development of a small-scale micro-generation project is analyzed, comparing the use of biogas with conventional technologies (diesel or gasoline) in a commercially available equipment for the use of two different types of fuel.

In addition, it seeks to encourage the use of renewable energy sources, which cause positive impacts at the social level since it is an applying method that promotes energy autonomy and supplies a basic demand for electricity.

* Bachelor Thesis

** Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
Director: Dr. Rusber Octavio Rodríguez Velásquez. Codirectora: Dra. Mónica Andrea Botero Londoño.

Introducción

La generación de energía eléctrica en sitio es una de las soluciones actualmente utilizadas para el abastecimiento energético, es por eso que se estudian tecnologías que se encuentran comercialmente disponibles, que realizando una adecuación de las mismas se pueden implementar en un proceso de generación de energía eléctrica a partir de biogás como combustible primario. Estas tecnologías (adaptables o existentes) con funcionamiento a partir de biogás hacen parte de las formas actuales de realizar una generación que aproveche las energías sustentables, con sustanciales ventajas comparativas respecto de otras fuentes (combustibles fósiles), además que reducen el efecto invernadero y el calentamiento global.

El propósito de esta investigación es realizar una clasificación de tecnologías de micro-generación de energía eléctrica a partir de biogás. Esta clasificación se da en cuanto a resultados de las tecnologías maduras para generación, el costo de las mismas y su disponibilidad comercialmente, con el fin de generar electricidad de fuentes renovables no convencionales como la energía proveniente de diferentes tipos de materias primas que son aprovechables en la actualidad para otra función (biogás para cocción de alimentos), esto es ideal para proyectos de pequeña escala, motivados por la necesidad de reducir las emisiones contaminantes, aumentar el uso de las fuentes renovables de energía, reducir la dependencia de los combustibles fósiles y aprovechar energéticamente infinidad de residuos del sector agropecuario en especial, los resultantes de las excretas del ganado.

Inicialmente se presenta una fundamentación teórica donde se muestran las características del biogás, los tipos de biodigestores existentes y las tecnologías adaptables para la generación de energía eléctrica a partir de biogás. A continuación, se desarrolla una guía con aspectos básicos que darán una idea de cómo iniciar un proyecto de generación de energía con este tipo de combustible (biogás), y se presenta un caso de estudio para una finca con consumo energético especial a diferentes horas del día y se analiza la viabilidad económica a través de una comparación en costo de generar energía eléctrica de manera convencional, con combustible gasolina y generar energía eléctrica de manera alternativa con biogás, dicha comparación se realiza para un año y con una planta elegida en el caso de estudio visto en este proyecto que funciona con combustible gasolina y biogás.

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Clasificar tecnologías comerciales o adaptables en la actualidad para la generación de energía eléctrica a partir de biogás de acuerdo a la potencia de operación y consumo de biogás.

1.2 Objetivos Específicos

- Establecer un estado del arte de las tecnologías comerciales existentes y adaptables de micro-generación de energía eléctrica a partir de biogás.
- Desarrollar una guía que permita seleccionar una tecnología de generación adecuada para el diseño de proyectos de micro-generación de energía eléctrica a partir de biogás.
- Analizar la viabilidad económica de un proyecto de micro-generación de energía eléctrica a partir de biogás empleando la guía propuesta para la selección de la tecnología.

2 Fundamentación teórica

En este capítulo se introducirá a temas que se abordarán como lo son: biogás, biodigestores para su producción y captura, uso final en micro-generación y tecnologías de conversión, con la finalidad de entregar una visión general del tema de la investigación y familiarizar al lector con conceptos importantes para el entendimiento del desarrollo de este proyecto.

2.1 El Biogás

Al transformar los recursos energéticos que se encuentran en la naturaleza se busca su conversión en algún tipo de energía útil, por ejemplo energía eléctrica con el fin de abastecer las necesidades de una sociedad y con esto contribuir a evitar el uso desenfrenado que se le está dando a los derivados del petróleo y al agotamiento del mismo.

A continuación, se documenta información sobre el biogás como lo es la definición, composición, características generales y su equivalencia en comparación con otras fuentes de energía, cómo se produce y dependiendo del sustrato utilizado determinar el porcentaje de metano en su composición, el tratamiento que se le debe realizar para finalmente su uso final en las distintas aplicaciones de este gas, en este caso la generación de energía eléctrica.

2.1.1 Definición y composición del biogás. El término biogás se designa a la mezcla de gases resultantes de la descomposición de la materia orgánica realizada por acción bacteriana en

condiciones anaerobias (ausencia de oxígeno) reduciéndola a metano y dióxido de carbono (Castillo Villabona & Valderrama Solano, 2004). Está compuesto principalmente por un 50%-70% de metano CH_4 y un 30%-50% de dióxido de carbono CO_2 principalmente, contiene pequeñas cantidades de nitrógeno N_2 , sulfuro de hidrogeno H_2S , vapor de agua, amoníaco NH_3 , hidrogeno H_2 (Barrientos Verjel & Banco Peñarete, 2010) .

La digestión anaerobia es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual los materiales orgánicos de un sustrato (residuos de animales y vegetales) son convertidos en biogás. La siguiente tabla describe la composición del biogás según el sustrato utilizado en la digestión anaerobia para su obtención.

Tabla 1.

Composición del biogás en función del sustrato utilizado

Componente	Residuos ganaderos	Residuos agrícolas	Fangos de depuradora	Residuos municipales	Gas de vertedero
Metano	50-80%	50-80%	50-80%	50-70%	45-60%
Dióxido de Carbono	30-50%	30-50%	20-50%	30-50%	45-60%
Agua	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
Hidrógeno	0-2%	0-2%	0-5%	0-2%	0-0,2%
Sulfuro de Hidrógeno	0-1%	100-700 ppm	0-1%	0-8%	0-1%
Amoníaco	Trazas	Trazas	Tranzas	Tranzas	0,1-1%
Monóxido de carbono	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-0,2%
Nitrógeno	0-1%	0-1%		0-1%	2-5%
Oxígeno	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0,1-1%

Componente	Residuos ganaderos	Residuos agrícolas	Fangos de depuradora	Residuos municipales	Gas de vertedero
Compuestos orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas	0,01%-0,6%

Tomado de (Corredor Cruz, 2017)

2.1.2 Características generales del biogás. A continuación, se muestra información de las características generales del biogás.

Tabla 2.

Características generales del biogás

Contenido energético	6 – 6,5 [$kW * h/m^{-3}$]
Equivalencia combustible	0,6 – 0,65 [L petróleo/ m^3 biogás]
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750 [°C] (con cantidad de CH ₄ mencionado)
Presión crítica	74 – 88 [atm]
Temperatura crítica	-82,5 [°C]
Densidad normal	1,2 [kg/m^3]
Olor	Huevo podrido (el olor de biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16,043 [kg/mol]

Tomado de (Navarro Ortiz, 2017)

2.1.3 Producción de biogás. El biogás se produce en un recipiente cerrado o tanque denominado biodigestor, este puede tener forma cilíndrica o esférica; posee un ducto de entrada a través del cual se suministra la materia orgánica procedente de las granjas agropecuarias (sobre todo excretas de animales) en forma conjunta con agua, y un ducto de salida en el cual el material

ya digerido por acción bacteriana abandona el biodigestor. El proceso de fermentación anaerobia que ocurre en el interior del biodigestor convierte la materia orgánica en un gas combustible (biogás) y en un residuo que se utiliza como fertilizante

2.1.4 Tratamiento del biogás. El biogás producido contiene algunos componentes que pueden interferir con el uso final proyectado. Tal es el caso del sulfuro de hidrógeno H_2S que, en contacto con el vapor de agua, también presente en el biogás, genera ácido sulfhídrico, que tiene efectos corrosivos en los metales. Además, la presencia de vapor de agua en el biogás disminuye su poder calorífico y puede interferir con la operación de los sistemas de combustión.

La siguiente tabla muestra los tratamientos necesarios según el destino del biogás, donde: 0= no tratamiento, 1= tratamiento parcial y 2= tratamiento elevado.

Tabla 3.

Tratamiento del biogás según su uso final.

Uso final	Eliminación de agua	Eliminación de CO_2	Eliminación de H_2S desulfuración
Producción térmica en calderas	1	0	0-1-2
Producción de electricidad en motores estacionarios	1 o 2	0-1-2	1 o 2
Combustible para vehículos o para turbinas	2	2	2
Sustituto del gas natural	2	2	2
Celdas de combustible	2	2	2

Tomado de (Desconocido, 2012)

2.1.5 Aplicaciones del biogás. Debido a que el biogás está compuesto por gran cantidad de metano se considera combustible, el cual se puede utilizar como fuente de energía en distintas aplicaciones. Puede ser utilizado en la cocción de alimentos como alternativa de cambio del uso tradicional en estufas de leña por combustión vegetal directa, vehículos, motores, iluminación por medio de lámparas, entre otros.

Su aplicación para el proceso de generación de energía eléctrica se da ya que se tiene la posibilidad de utilizarse en micro turbinas y motores de combustión interna que se encuentran acoplados a un generador.

La siguiente ilustración presenta la equivalencia del biogás con respecto a otras fuentes de energía:

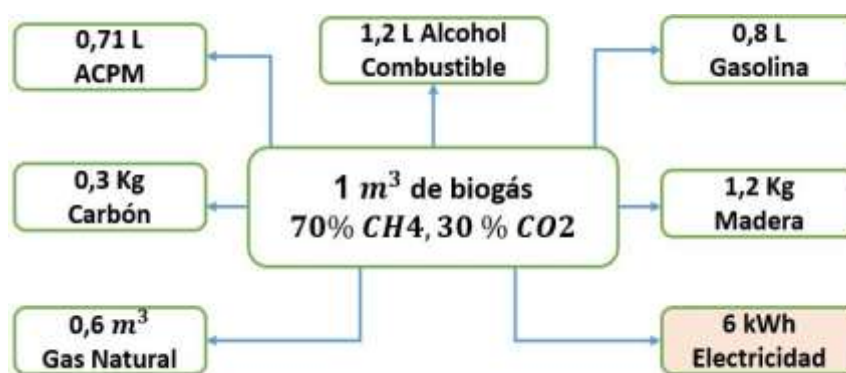


Figura 1. Equivalencias de biogás con otras fuentes de energía

Adaptado de (Hincapié Buitrago, 2017)

2.2 Biodigestores

Los biodigestores también conocidos como plantas (productoras o de producción) de biogás son recintos o tanques cerrados donde la materia orgánica y el agua residual permanecen en un periodo

de tiempo para lograr su descomposición produciendo biogás y bioabono. Sus características principales, las cuales garantizan una buena operación para la producción de biogás son:

- Hermético, para evitar las fugas de gas.
- Térmicamente aislado, para evitar cambios bruscos de temperatura.
- Acceso para mantenimiento.

Un biodigestor básico cuenta con:

- Un punto o cámara de entrada de la materia orgánica, el cual puede ser un tambor para almacenar residuos.
- Otra cámara o receptáculo donde se realice la digestión anaeróbica, éste es cerrado en toda su dimensión, excepto por las conexiones de entrada (ingreso de materia prima) y salida del biogás y digestato.
- Luego de la salida del digestato, se incorpora un receptáculo para su recepción.

Partes de un biodigestor de construcción típica y básica.

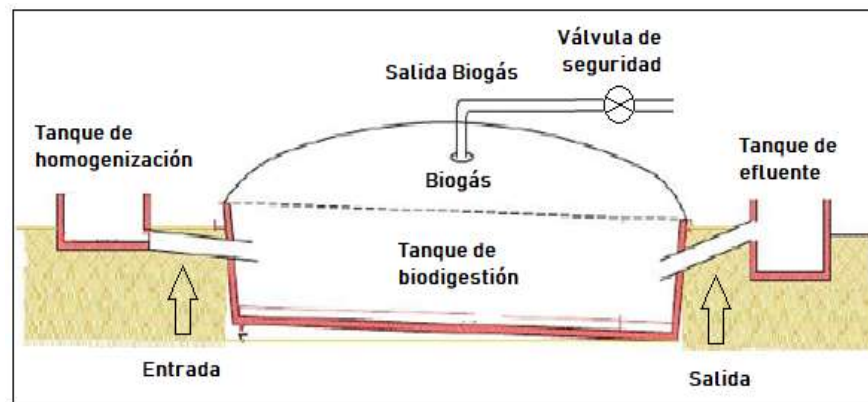


Figura 2. Partes básicas de un biodigestor.

Adaptado de (Barrientos Verjel & Banco Peñarete, 2010)

2.2.1 Tipos de biodigestores. Su aceptación está dada por limitaciones externas como inversión, eficiencia del tratamiento, rendimiento de la energía neta y el rendimiento de las operaciones. El rango de tecnologías de biodigestores varía desde sistemas rústicos a sofisticados. De acuerdo al tipo de carga utilizado se distinguen tres tipos genéricos de biodigestores (Desconocido, 2009):

- Biodigestores de flujo discontinuo. Se realiza el proceso de carga una vez y quedan cerrados por un tiempo fijo de retención hasta que finalice el proceso de fermentación y no haya producción de gas. Este sistema es cargado con el sustrato, sellado y la fermentación se realiza entre 30 y 180 días.
- Biodigestores de flujo continuo. Este tipo de biodigestores son cargados y descargados de forma periódica, comúnmente día por día.
- Biodigestores de flujo semi-continuo. Se cargan en lapsos cortos como de 12 horas, 1 vez al día o cada 2 días, se utiliza cuando la disponibilidad de materia orgánica es constante. Los principales son el chino, el hindú y el taiwanés.

2.2.1.1 Biodigestor de domo fijo (tipo chino). El modelo más extendido, debido a su durabilidad, fácil manejo, funcionabilidad y seguridad. Este diseño se originó en China. Se trata de una cámara cerrada con sus respectivas cámaras de carga y descarga. La estructura puede ser construida de concreto armado, ladrillos, piedra u hormigón y las paredes internas permeabilizadas para evitar fugas de líquido. El techo y el fondo son hemisféricos (o al menos el techo) y las paredes rectas. El gas producido durante el proceso es almacenado bajo el domo y desplaza algunos contenidos del digestor a la cámara efluente.

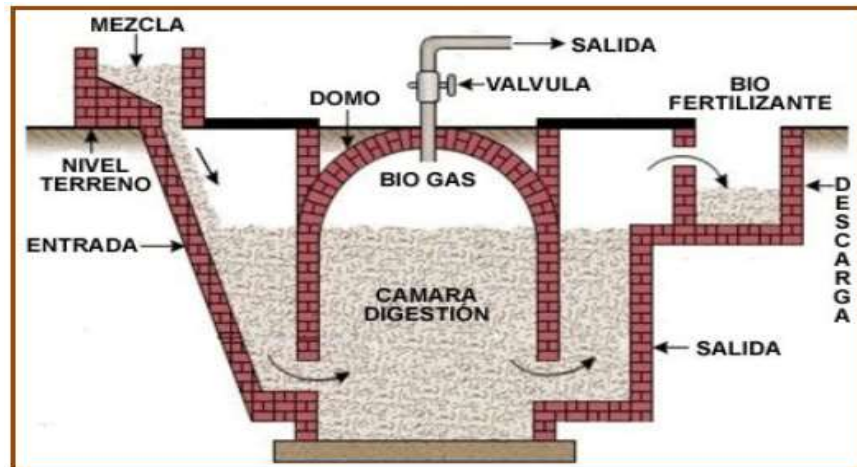


Figura 3. Biodigestor de domo fijo (tipo chino).

Tomado de (Desconocido, 2009)

Ventajas:

- No incluye partes móviles ni partes oxidables
- Bajo costo de inversión y larga vida útil
- El diseño es básico y no requiere de mucho espacio

Desventajas:

- Fuga de gas frecuentemente
- Presión variable del biogás complica su utilización
- La cúpula requiere de impermeabilizante especial

2.2.1.2 Biodigestor de domo flotante (tipo hindú). Este biodigestor consiste en un tambor, originalmente hecho de acero, pero después reemplazado por fibra de vidrio reforzado en plástico (FRP) para superar el problema de corrosión. Normalmente se construye la pared del reactor y fondo de ladrillo, aunque a veces se usa refuerzo en hormigón.

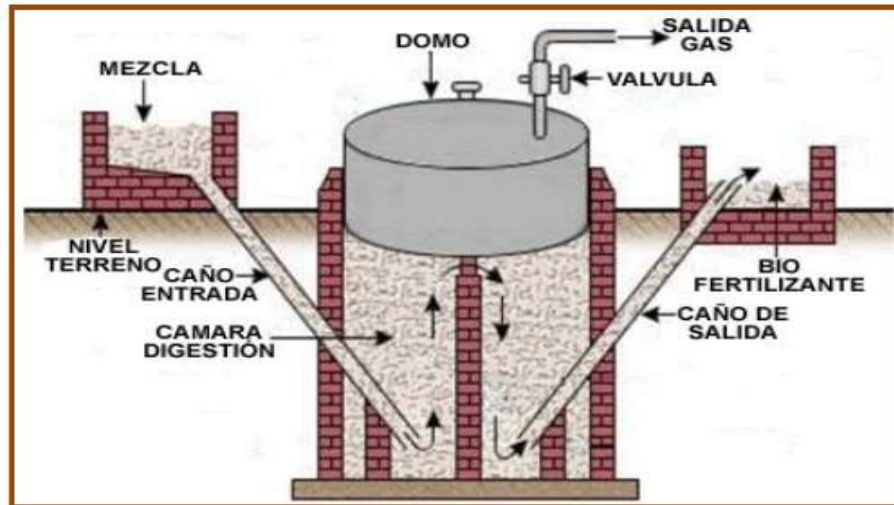


Figura 4. Biodigestor de domo flotante (tipo hindú).

Tomado de (Desconocido, 2009)

Ventajas:

- El volumen del gas es visible directamente
- La presión del gas es constante

Desventajas:

- Alto costo en los materiales debido al tambor de acero
- Esta planta es muy susceptible a la corrosión

2.2.1.3 Biodigestor de balón plástico o de estructura flexible. Compuesto por una bolsa de plástico, caucho, polietileno o geomenbrana de PVC, completamente sellada. La parte inferior de la bolsa (75% de volumen) se rellena con el sustrato mientras su restante (25% de volumen) es ocupado para almacenamiento del gas (Barrientos Verjel & Banco Peñarete, 2010).

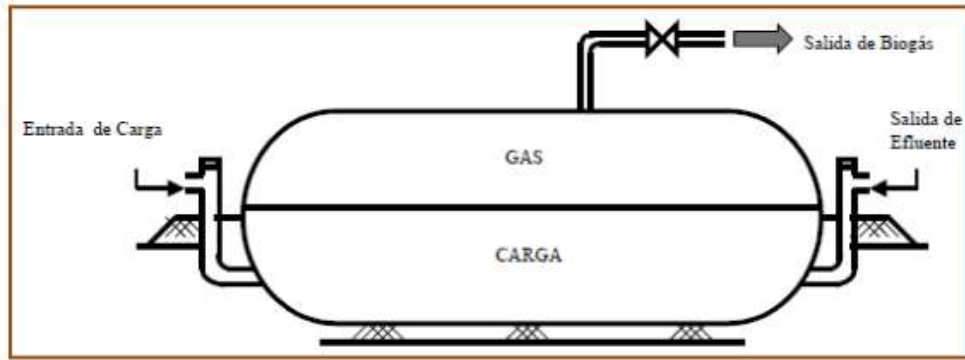


Figura 5. Biodigestor de estructura flexible.

Tomado de (Barrientos Verjel & Banco Peñarete, 2010)

Ventajas:

- Fabricación estandarizada
- Bajo costo de fabricación
- Fácil de limpiar y realizar mantenimiento

Desventajas:

- Baja presión del gas por lo que se requiere bombas de gas
- No se puede eliminar los residuos sólidos en la superficie del sustrato
- Vida útil corta

2.2.1.4 Planta con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno. Este tipo de planta de producción de biogás ha logrado disminuir los costos hasta 30% con respecto a los prototipos tradicionales, esta planta se caracteriza por tener una estructura semiesférica de polietileno de película delgada en sustitución de la campana móvil y la cúpula fija, y un tanque de almacenamiento de piedra y ladrillo como los empleados en los prototipos tradicionales.

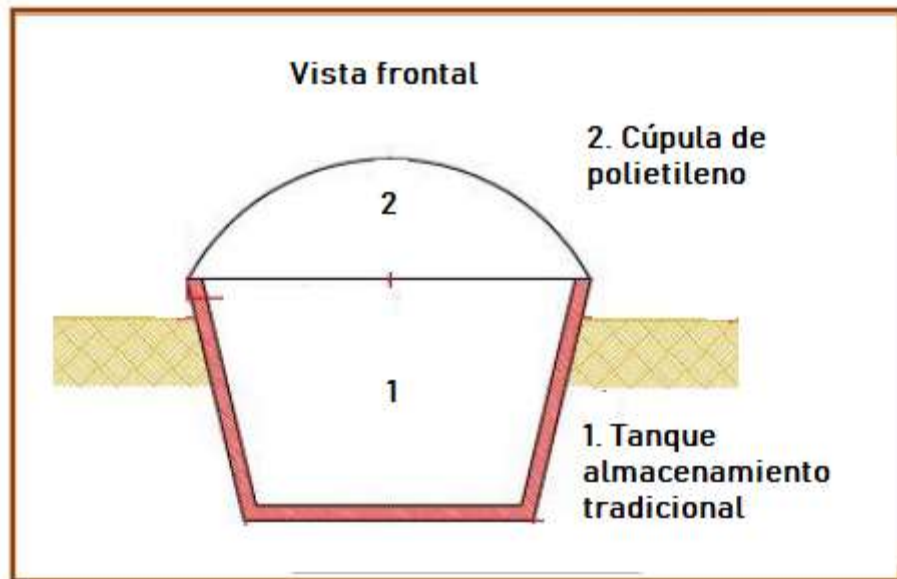


Figura 6. Biodigestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno.
Adaptado de (Barrientos Verjel & Banco Peñarete, 2010)

Ventajas:

- Bajo costo de construcción e instalación
- Fácil de reparar

Desventajas:

- Vida útil corta
- Requiere de un suelo impermeable

2.3 Conversión del biogás en energía eléctrica

Para generar electricidad con biogás se alimenta un motor de combustión interna o una micro-turbina, el sistema de transformación micro-turbina o motor se elegirá en función de la potencia que se va a generar y el consumo de biogás.

Los motores de combustión interna o motores de explosión (también conocidos como motores reciprocantes o a pistón) son un tipo de máquina del cual se obtiene energía mecánica utilizando para esta, energía térmica, hidráulica, solar y eólica. Una de las más utilizadas es la energía térmica que se obtiene de la quema de combustibles de naturaleza orgánica como son los hidrocarburos (Valladares, 2017). Su funcionamiento se basa en el quemado de una mezcla comprimida de aire y combustible.

Los motores de combustión interna dependiendo de su ignición se agrupan en dos categorías (Valladares, 2017):

- Motores de ignición por chispa: también conocidos como motor de explosión ciclo Otto típicamente emplean la gasolina o el gas natural como combustible.
- Motores de ignición por compresión: estos motores trabajan típicamente con combustible diésel. Presentan esencialmente los mismos componentes: una cámara de combustión cilíndrica que es recorrida por un pistón el cual se encuentra conectado con el eje del cigüeñal a través de una biela, de tal manera que se transforma el movimiento lineal del pistón en uno de rotación. La principal diferencia entre ambos es el método de encendido.

Dentro de las diferentes aplicaciones de estos motores se encuentra su utilización en proyectos de generación de energía eléctrica, principalmente en grupos de una cámara cerrada o cilindro, con el fin de incrementar la presión y generar con suficiente potencia el movimiento lineal alternativo del pistón. Estos combustibles son generalmente gasolina, gas natural, gases licuados del petróleo (GLP), gases manufacturados y diésel (Razbani, Mirzamohammad, & Assadi, 2011).

Motores de ignición electrógenos donde esta máquina mueve un generador eléctrico, con el fin de desempeñar la función de proveer energía de reserva, suplementaria o de emergencia. Actualmente el combustible utilizado es el diésel, que es un combustible no renovable. Estos

grupos electrógenos son comúnmente utilizados cuando hay un déficit en la generación de energía en algún lugar o donde los cortes son frecuentes. También son de gran utilidad en lugares donde no hay suministro eléctrico, generalmente zonas apartadas o para trabajos de paso. En lugares como fábricas la falta de energía de la red puede abastecerse con este sistema de generación.

2.3.1 Motores a gasolina. El motor de explosión, o motor a gasolina, obtiene energía mecánica directamente de la energía del combustible. La explosión del combustible mediante una chispa, produce la expansión del gas y el movimiento del pistón (Goodyear, 2018). Pueden ser de dos o cuatro tiempos. Fue en 1876 cuando el alemán Nikolaus August Otto construyó el primer motor de gasolina de la historia, de cuatro tiempos, que fue la base para todos los motores posteriores de combustión interna.

2.3.1.1 Uso del biogás en motores a gasolina. Los motores de combustión a gasolina pueden funcionar con biogás realizándoles una simple adaptación, que consiste en colocar entre el filtro del aire y el carburador una “T” por donde se suministra el biogás al sistema. Al ser alimentado con biogás directamente al colector de admisión, el motor no permite una regulación automática de la mezcla y la carga, por lo que el ajuste del motor se debe realizar de forma manual desde la válvula de control del biogás, colocada en la línea de admisión (Angamarca Castillo & Arequipa Iza, 2014). Es por ello que se recomienda que las cargas aplicadas sean constantes, para evitar los problemas de regulación del motor y por tanto una ineficiente calidad de la energía suministrada por el generador.

Cuando el motor a gasolina sea adecuado para funcionamiento con biogás se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Cuando el motor esté funcionando con biogás evitar el paso de gasolina, mediante el uso de una válvula de control de paso de gasolina al carburador.
- Mantener la presión del gas constante.
- Mantener el filtro de aire siempre limpio, esto ayudará que el motor opere en estado estable.
- Verificar que la válvula de control esté operando correctamente.

2.3.2 Motores a gas. El primer dispositivo que quemaba gas dentro de un cilindro fue creado por Jean Joseph Etienne Lenoir en 1860. Pero fue Nikolaus Otto quien desarrolló un motor de combustión interna a partir del invento de Lenoir

En los motores de combustión a gas el combustible utilizado es generalmente gas natural. El gas natural es un hidrocarburo compuesto principalmente por metano y su poder calorífico es muy parecido al de los combustibles derivados del petróleo. Para que un motor pueda funcionar con gas natural debe de ser de explosión con encendido por chispa (Ciclo Otto). El proceso de combustión es muy similar al de un motor de gasolina y tan solo se diferencia del mismo en la tecnología de admisión del combustible. El aire aspirado por el motor se mezcla en el colector de admisión con el gas natural por efecto Venturi o por inyección. La mezcla es introducida en el cilindro por la válvula de admisión para posteriormente ser comprimida y explosionada tras saltar la chispa en la bujía (Lambiano Iradiel, 2014).

2.3.2.1 Uso del biogás en motores a gas. La modificación que se deben realizar al motor para utilizarlo en la generación de electricidad empleando biogás como combustible consiste en modificar levemente la presión de inyección del gas. El porcentaje de sustitución de biogás por

gas es del 100%, pudiéndose realizar una conexión de la tubería de biogás al sistema de modo que el equipo pueda operar con ambos combustibles si se cree conveniente (Energypedia, 2016).

Este tipo de tecnología ofrece bajos costes de inversión, rápida puesta en marcha, buena fiabilidad con un adecuado mantenimiento y unas excelentes características de carga. Presentan un buen potencial de recuperación de calor, consiguiendo fácilmente unos rendimientos globales del 70 al 80% (González-Longatt, 2004). Además, su alta eficiencia eléctrica hace que sus costes de operación sean menores. Como desventaja, el costo por mantenimiento de bujías y filtros es más frecuente por los componentes corrosivos del biogás.

2.3.3 Motores a diésel. Los motores de combustión a diésel han sido históricamente los más populares para las aplicaciones de generación tanto de pequeña como de gran potencia. Debido a su mayor relación de compresión presentan una mayor eficiencia que los motores de encendido provocado. Sin embargo en la actualidad se encuentran en claro retroceso debido a su alto índice de emisiones contaminantes y viéndose superados por los motores de encendido provocado con gas natural (Arango Gómez, Sierra Vargas, & Silva Leal, 2014).

2.3.3.1 Uso del biogás en motores diésel. Los motores a diésel pueden operar con una sustitución del diésel por biogás de hasta un 70% con un consumo restante de diésel del 30%. Al consumir los dos tipos de combustible al mismo tiempo el motor no sufre ninguna alteración. En estos motores la mezcla de diésel y biogás se realiza directamente en la cámara de combustión del motor. Cuando el motor recibe el biogás por la entrada de aire, este se acelera, por lo que el gobernador de la bomba de inyección reduce la cantidad de diésel suministrado a la cámara de combustión, logrando una estabilidad en la aceleración y potencia del motor. Estos motores

soportan las variaciones de carga sin tener que operar la válvula de regulación del biogás, permitiendo operar en un rango más amplio de carga. Para los arranques del motor se debe alimentar únicamente con diésel, una vez arrancado el mismo se realiza la transferencia de biogás gradualmente hasta alcanzar el 70%. No es recomendable la sustitución mayor a un 70% de biogás por diésel porque puede dañar el motor (Dimpl, 2010).

2.3.4 Motores a biogás. Un grupo electrógeno a biogás es una máquina que, a través de un motor de combustión interna cuyo combustible es biogás, mueve un generador eléctrico. El motor que se encarga de transformar la energía química contenida en el biogás en energía mecánica que hará girar el alternador. Al ser el combustible biogás, los motores que se emplean son de ciclo Otto (Lambiano Iradiel, 2014) y son estructuralmente similares a los motores a gas natural. Por su parte, el generador eléctrico se encarga de producir la energía eléctrica de salida a partir de la energía mecánica del motor, acoplados de manera precisa. Desafortunadamente, la exclusividad de esta tecnología la lleva a ser más cara (Lambiano Iradiel, 2014).

2.3.5 Micro turbina. Las micro-turbinas de gas, constituyen un tipo de turbinas de gas que han pasado de la etapa de prototipos experimentales a convertirse en una alternativa factible para la generación de energía eléctrica a pequeña escala.

Las micro-turbinas, pueden clasificarse por su configuración en:

- Eje simple o eje doble. La configuración en un sólo eje, permite reducir los costos de producción y tiene un mantenimiento más fácil. Además, el funcionamiento con un solo eje, permite montar el generador eléctrico en el lado opuesto a la salida de gases, con lo que éstos pueden salir en línea con el eje de la turbina, produciendo una menor pérdida de

carga a la salida de gases, dando mayor potencia, y un menor consumo de combustible.

- Ciclo simple o con regeneración. En las de ciclo simple, se mezcla el aire comprimido con combustible y se realiza la combustión bajo condiciones de presión constante.

El uso de micro-turbinas, ofrece un gran número de ventajas, en comparación con otras tecnologías de producción de energía a pequeña escala, como pueden ser los motores de gas natural, principalmente:

- Menor número de partes móviles
- Tamaño compacto
- Menor peso
- Menor nivel de emisiones
- Vida operativa más larga.

2.3.5.1 Uso del biogás en micro-turbinas. Las micro turbinas son equipos muy similares a las turbinas convencionales. Su funcionamiento consiste en aspirar el aire y tras pasar por un filtro de partículas, comprimirlo. A continuación, se hace circular por un intercambiador de calor donde absorbe parte de la energía de los gases de escape (Lambiano Iradiel, 2014). Una vez en la cámara de combustión, se realiza la inyección del biogás y se produce la combustión de la mezcla. A diferencia de los motores alternativos, las turbinas precisan de una presión del biogás de entre 3 y 7 [bar], suficiente para ser inyectado a la cámara de combustión. Desde un punto de vista mecánico, al tener una única parte móvil, las micro turbinas presentan menos requerimientos de mantenimiento que los motores alternativos. Además, al tener rodamientos por aire, disminuyen los costos de operación.

Con estas características las micro turbinas se presentan como una alternativa especialmente adecuada en depósitos pequeños de biogás donde no es viable la instalación de una planta de generación mayor a los 10 [kW], como por ejemplo sería en pequeños vertederos, depósitos controlados que se encuentran en su etapa de inicio o al final de su vida útil, o como también se pueden encontrar en explotaciones en las que tengan gran producción de biogás que ya está siendo aprovechado pero el restante está siendo quemado en antorchas.

2.3.6 Motores de combustión externa: Motor stirling. El motor stirling invención del escocés Robert Stirling en el año 1816, es un motor de ciclo cerrado. El principio de funcionamiento en términos simples, es el trabajo mecánico realizado por la expansión y contracción de un gas, utilizando diferencias de temperaturas (Lozano Piñeros, 2009). Este motor presenta muchas ventajas tales como sencillez y versatilidad, diversidad de fuentes de calor para su funcionamiento, bajo costo, muy eficiente entre otras que se mencionan en el desarrollo del trabajo de El Dr. Robert Stirling Reverendo.

La diferencia entre los motores de combustión interna y externa, como lo sugieren sus nombres, es que los primeros queman su combustible dentro del cilindro de potencia, pero los últimos usan su combustible para calentar un gas o vapor a través de las paredes de una cámara externa, y los calentadores. Luego se transfiere gas o vapor al cilindro de potencia. Por lo tanto, los motores de combustión externa requieren un intercambiador de calor o una caldera para absorber el calor, y como sus combustibles se queman externamente en condiciones estables, en principio pueden usar cualquier combustible que pueda quemarse, incluidos los residuos agrícolas o los materiales de desecho (Lozano Piñeros, 2009).

2.3.6.1 Uso del biogás en motores stirling. El biogás se quema externamente, lo que a su vez calienta el motor stirling a través de un intercambiador de calor. El gas en el motor stirling por lo tanto se expande y por lo tanto mueve el mecanismo del motor. El trabajo resultante se utiliza para generar electricidad. Los motores Stirling tienen la ventaja de ser tolerantes con la composición y la calidad del combustible. Sin embargo, son relativamente caros.

2.3.7 Celdas de combustible de hidrógeno. Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico cuyo concepto es similar al de una batería. Consiste en la producción de electricidad mediante el uso de químicos, que usualmente son hidrógeno y oxígeno, donde el hidrógeno actúa como elemento combustible, y el oxígeno es obtenido directamente del aire (Kipping & Ortíz Laurel, 2013). También pueden ser usados otros tipos de combustibles que contengan hidrógeno en su molécula, tales como el gas metano, metanol, etanol, gasolina o diésel entre otros

Algunas diferencias entre las baterías convencionales y las celdas de combustible, las baterías convencionales almacenan energía, poseen un combustible interno que les permite la producción de energía mientras este combustible se agota. Sin embargo, en las celdas de combustibles los reactivos se suministran como un flujo continuo desde el exterior, lo que les permite generar energía de forma interrumpida (Plata Alvarez & Siachoque Alarcón, 2011).

2.3.7.1 Uso del biogás en celdas de combustible. La utilización de biogás en pilas de combustible satisface el propósito de combinar una tecnología de generación prometedora de elevada eficiencia y bajo impacto medioambiental con el uso de un combustible de buena calidad y atractivamente económico.

Las celdas requieren para su funcionamiento de gases muy limpios y entre mayor sea el contenido de hidrogeno se incrementa su eficiencia, esto conlleva a un estudio detallado del biogás, debido a que este contiene diferentes compuestos además de impurezas que son dañinos para los componentes de las celdas debido es indispensable establecer procedimientos de limpieza para el biogás.

3. Metodología

Este capítulo muestra la forma como se planifico el desarrollo de cada objetivo y las actividades que se siguieron para documentar este informe.

3.1 Estado del arte

El estado del arte se desarrolló a partir de la revisión bibliográfica de temas sobre la micro-generación de energía eléctrica a partir de biogás con el fin de recopilar información apropiada que relacionaran las tecnologías de transformación de la energía química mediante la combustión del metano presente en este gas.

Algunas de las referencias estaban enfocadas a proyectos de generación a gran escala en países como Alemania, china, Budapest, entre otros. Esto dificultó un poco el avance, ya que son países con un desarrollo avanzado en cuanto a tecnologías para aprovechamiento y purificación de biogás y se buscaban fuentes con temática referente a la generación a pequeña escala. Se optó por recurrir

a proyectos prácticos y que hubiesen sido realizados en el continente Americano (centro y sur), pues se busca que para efectos prácticos de esta investigación al tratar de tecnologías de generación, estén al alcance y disponibles comercialmente.

3.2 Guía selección de tecnología

La guía se realizó con el fin de documentar información para proyectos de micro-generación de energía eléctrica a partir del aprovechamiento energético del biogás proveniente de excretas (bovino, porcino y avícola), para abastecer la demanda de energía en labores agropecuarias ya que esta fuente es práctica y asequible para zonas rurales.

Con el fin de desarrollar una ruta a seguir para proyectos prácticos futuros, los parámetros básicos a tener en cuenta son:

Disposición de energía, es decir, la cantidad y el tipo de ganado que se dispone en la finca para estimar la cantidad de metros cúbicos de biogás que se pueden obtener. También es importante ya que es un factor que indicará el volumen del biodigestor para la producción de biogás

A continuación, tomar nota de los equipos de consumo energético existentes en una finca como pica pasto, bombas de riego, sistemas de ordeño, entre otros. A partir de estos equipos y horas de funcionamiento se determina la tecnología de generación adecuada y acorde a abastecimiento de potencia requerida.

En forma de resumen, algunas bases para dimensionar un proyecto de micro-generación de energía y seleccionar la tecnología más acorde al sistema que se va alimentar, se deben tener en cuenta los siguientes pasos.

- Materia prima para cargar el biodigestor (cantidad y tipo de ganado).

- Elección del biodigestor más adecuado
- Análisis de la demanda energética de la finca (identificar los equipos a conectar, realizar el levantamiento de cargas).
- Hallar la cantidad de biogás necesario para suplir la demanda diaria.
- Identificar la cantidad de animales necesarios para producir el biogás (validar la información), acá se convalida si con la cantidad de ganado indicado al inicio satisface la producción de biogás, en caso contrario se debería limitar la cantidad de equipos a conectar al sistema de generación.
- Dimensionamiento del grupo electrógeno encargado de proporcionar la potencia necesario de la finca.

Cada uno de estos pasos se desarrolla con más detalle en el capítulo 5.

3.3 Aplicación a un caso de estudio

Se presenta un caso de estudio (aplicación a la guía) con un ejemplo donde se supone el hecho que un usuario tiene la capacidad de demanda energética, esto es, la materia prima (excretas) para la producción de biogás (que no es un tema en el cual se profundizó en esta investigación). A través de fuentes de información se dará un aproximado al precio de un biodigestor y el equipo de generación. Esto con el fin de dar un paso a paso de los aspectos básicos a seguir de la guía y verificar la viabilidad económica al menos con este ejemplo.

El caso de estudio finaliza con un análisis básico sobre la viabilidad de utilizar el biogás en motores o micro-turbinas, comparando una de estas tecnologías con otra que opere con los

combustibles fósiles tradicionales, por ejemplo, diésel o gasolina y se documentan las conclusiones de la realización de este proyecto.

4. Estado de Arte

El uso del biogás en máquinas para generación de electricidad es una de las formas de aprovechar los recursos energéticos que a través de tratamientos anaeróbicos dan como resultado este combustible. Los residuos orgánicos provenientes de las distintas actividades agropecuarias son una fuente de energía que puede ser aprovechada para el uso en herramientas de producción.

El uso del biogás se justifica principalmente por la reducción de emisiones de gases efecto invernadero al medio ambiente, mediante la degradación confinada de residuos orgánicos y captación controlada de productos como el metano, con efecto invernadero 21 veces mayor al CO₂, o mediante el uso de biomásas agrícolas, para la producción de biogás, sustitutos de los combustibles fósiles, que durante la combustión restituyen al ambiente el CO₂ absorbido por las biomásas generando un impacto neto leve o nulo sobre la concentración de este contaminante efecto invernadero en el ambiente (Varela Antón, 2013).

El siguiente estado del arte expone la aplicación del biogás en motores de combustión interna y micro turbinas en estudios prácticos. Se identifican parámetros de operación de estos equipos, potencia entregada y consumo de combustible.

4.1 Generación de energía eléctrica a partir de biogás.

Este proyecto (Quesada, Salas, Arguedas, & Botero, 2007) se realizó en la Universidad EARTH, ubicada en la Región Atlántica del Trópico Húmedo de Costa Rica, geográficamente se encuentra a una altura aproximada de 64 [msnm]. La temperatura media anual varía en un rango de 24,6°C y 26,3°C, la humedad relativa oscila entre el 86% y 87%. La Universidad cuenta con una Finca Pecuaria Integrada (FPI) donde se realizó la generación de energía a partir de biogás, proveniente de las excretas de la producción porcina y bovina de la finca, cuyo objetivo es suplir las necesidades energéticas de la misma en la operación de equipos para ordeño.

Esta finca pecuaria integrada realizó la captación de los residuos del lavado de establos y porquerizas (aguas servidas) mediante sistemas de biodigestores tubulares plásticos tipo Taiwán con capacidad de almacenamiento de 350 [m³] de biogás, y así, aprovechar este combustible para su aplicación en un sistema de motor-generator de combustión interna para sustituir el uso de fuentes energéticas tradicionales no renovables en algunas aplicaciones diarias de la finca.

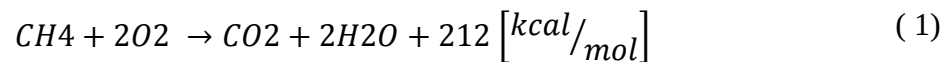
El sistema generador de combustión interna de biogás natural continuo cuenta con una capacidad de 40 [kW], una conexión de 120/240 [V], 60 [Hz], trifásico en conexión delta serie de 4 hilos. Los amperios máximos por fase son de 120 [A] y máxima capacidad monofásica de 23 [kW]. El consumo de biogás a máxima carga es de 29 [m³/h] y requiere de un porcentaje de metano mínimo de 61% y una concentración máxima aceptable de 24 [ppm] de ácido sulfhídrico en el biogás dentro del generador. Presión de entrada del biogás al generador entre 7 [kPa] y 21 [kPa]. Posee una atenuación de ruido de nivel dos.

Diariamente la finca disponía de 53 [m³] de biogás. La cantidad generada fue menor a la cantidad demandada para el funcionamiento del generador en dos turnos diarios, con una duración

de dos horas cada uno, lo que corresponde a $32 [m^3]$ en cada turno $\left(16 \left[m^3/h\right]\right)$; una demanda total de $64 [m^3]$. Este inconveniente se solucionó incrementando la capacidad de almacenamiento de biogás a $391 [m^3]$ y funcionamiento del sistema cinco días por semana.

La cantidad de energía generada promedio es de $19 kW.h$, lográndose así una eficiencia en la generación de apenas el 7 %. La eficiencia alcanzada en el motor de combustión interna no sobrepasó el 40 %. Esto se debió a la poca potencia con que se encendió el generador, resultando en un alto consumo de biogás en cada turno. La demanda máxima energética del área de la lechería y la porqueriza fue de $21 kW$ para las horas de ordeño principalmente, pero según un muestreo la demanda promedio máxima no sobrepasó los $14 kW$, dando como resultado una sobredimensión del generador utilizado. En general, el sistema instalado satisfizo la demanda de la Finca Pecuaria Integrada.

La eficiencia del generador se calculó tomando en cuenta tres parámetros: consumo de biogás (m^3), energía eléctrica generada ($kW.h$) y metano presente en el biogás (% CH_4). De acuerdo con la combustión del metano se calculó la cantidad de $kcal/m^3$ (a partir de la ecuación 1) presente en el biogás producido en la finca:



Teniendo en cuenta que $1 [mol] = 22,4 [L]$ y $1 [m^3] = 1000 [L]$ entonces $1 [m^3] = 44,64 [mol]$. A partir del porcentaje de metano presente en el biogás, el cual fue de valor promedio de 77,9 % se encontró el poder calorífico:

$$\begin{aligned}
 212 \left[\frac{kcal}{mol} \right] * 44,64 \left[\frac{mol}{m^3} \right] &= 9464 \left[\frac{kcal}{m^3} \right] * 77,9\% \\
 &= 7372 \left[\frac{kcal}{m^3} \right]
 \end{aligned} \quad (2)$$

Se calculó la eficiencia energética de la planta, tomando en cuenta el promedio de consumo de biogás (31,9 m^3) y se multiplicó por el poder calorífico, partiendo de que 1 $[kcal] = 0,001163 [kWh]$, se obtuvo:

$$E1 = 7372 \left[\frac{kcal}{m^3} \right] * 31,9[m^3] = 2,35e^5[kcal] * 0,001163[kWh/cal] \quad (3)$$

Entonces, la eficiencia energética de la planta obtenida fue de $E1 = 274 kW.h$. Tomando en cuenta que el promedio de generación de energía eléctrica fue de 19,2 $[kWh]$ se calculó la eficiencia de la generación:

$$Ng = (19,2 [kWh] \div 274 [kWh]) * 100 = 7,0\% \quad (4)$$

El consumo de biogás promedio encontrado fue de 32 $[m^3]$ por turno (16 m^3/h), lo que arrojó una relación de 2 $[m^3]$ de biogás por cada $kW/hora$ generado. El consumo de biogás fue bastante alto si se compara con el indicado por el fabricante, el 55%. Esta diferencia se debió a la baja potencia en la que operó el generador en cada turno evaluado, la cual corresponde a la necesidad de la lechería en las horas de máxima demanda. El fabricante indicó un consumo de 29 $[kW/m^3]$ a máxima potencia, 40 $[kW]$. De manera contraria, el promedio obtenido fue de 14 $[kW]$, que indican apenas un 35 % de la potencia total del generador. La desventaja de encender el generador a menor potencia es el mayor consumo de biogás y por lo tanto una mayor relación de m^3 por $kW.h$ generado.

4.2 Utilización de biogás para uso en motores de cuatro tiempos (diésel o gasolina)

La Universidad EARTH en Costa Rica, realizó un estudio a la adecuación de un motor de combustión interna de 4 tiempos (diésel y gasolina) (Orozco, Carmona, Botero, & Hernández, 2004) para funcionamiento a partir de biogás, con el fin de ofrecer una opción energética para zonas rurales donde se pueda generar energía eléctrica a base de biogás obtenido de la fermentación de desechos orgánicos como lo son las excretas de animales y desechos vegetales por medio de un biodigestor.



Figura 7. Pieza para adaptar un motor de gasolina al uso de biogás.

Tomado de (Orozco et al., 2004)



Figura 8. Motor a gasolina de cuatro tiempos con pieza conectada en la posición del purificador de aire.

Tomado de (Orozco et al., 2004)



Figura 9. Pieza de adaptación para uso de biogás en motor diésel.

Tomado de (Orozco et al., 2004)

➤ **Motor diésel cuatro tiempos:**

Tabla 4.

Datos de consumo y sustitución de combustible en el motor diésel de cuatro tiempos.

Combustible	Vel. rpm	Cant. Inicial	Retorno	Cant. Final	Consumo	Tiempo	Sustitución
Diésel	Mínimo	3.000 mL	360 mL	2.100 mL	540 mL	1 H	0,0 %
	1500	3.000 mL	160 mL	1.470 mL	1.370 mL	1 H	0,0 %
Diésel+	Mínimo	3.000 mL	440 mL	2.430 mL	140 mL	1 H	74,07 %
	1500	3.000 mL	420 mL	2.100 mL	480 mL	1 H	64,96 %
Biogás	Mínimo	3.000 mL	390 mL	2.450 mL	310 mL	1 H	70,37 %
	1500	3.000 mL	370 mL	2.140 mL	490 mL	1 H	64,23 %

Tomado de (Orozco et al., 2004)

Las mayores sustituciones de combustible diésel se lograron para cuando el motor se mantenía a la velocidad mínima (74,07% y 70,37%).

➤ **Motor a gasolina cuatro tiempos:**

Para funcionamiento con gasolina se realizó el llenado de combustible correspondiente a 1000 [ml] que es la cantidad inicial para la prueba.

Con la utilización de biogás, se logró sustituir el 100% del combustible de gasolina, permitiendo un ahorro en una hora de 2.213,59 mL. El consumo de biogás fue de $0,55 \text{ m}^3/\text{hora}$ según los datos registrados en la tabla 4:

Tabla 5.

Datos de consumo de combustible del motor de gasolina de cuatro tiempos.

Tipo de combustible	Cant. Inicial de prueba	Cant. Final prueba	Consumo total	Tiempo, minutos	Consumo mL/Hora
Gasolina	1.000 mL	50 mL	950 mL	25,75	2.213,59

Tomado de (Orozco et al., 2004)

4.3 Análisis del rendimiento de un motor de combustión interna con biogás y aplicación para la generación de energía eléctrica.

La generación de energía eléctrica a partir del uso de biogás en motores de combustión interna es una alternativa viable para la generación de electricidad (Angamarca Castillo & Arequipa Iza, 2014) en lugares carentes de este servicio. Esta alternativa consiste en la adaptación de pequeños grupos electrógenos, de encendido por chipa (a gasolina) y diésel, para trabajar con biogás, por lo cual se le realizan algunas modificaciones, principalmente, en el sistema de alimentación de combustible.

Realizaron la adecuación de un motor-generator marca LUTOOL. Conformado por un motor de combustión interna y un generador de corriente alterna, se modificó el sistema de alimentación del motor para que funcione con biogás mediante la construcción y adaptación de algunos componentes como por ejemplo, el mezclador de Aire/Biogás, ya que éste es el elemento encargado de dosificar y regular la mezcla en proporciones adecuadas para el correcto funcionamiento del motor de combustión interna.

La hacienda cuenta en sus instalaciones con un biodigestor para la producción de biogás de tal forma que se pueden aprovechar los desechos orgánicos producidos en sus actividades

ganaderas y agrícolas (excretas de ganado y residuos de pasto). El resultado de la fermentación en este biodigestor es la producción de aproximadamente 50 [m^3] por hora.

La implementación del sistema de alimentación de biogás no requiere de ninguna modificación en el sistema de alimentación de gasolina ni en el regulador de velocidad del motor utilizado. La potencia máxima desarrollada por el motor con biogás es 4,25 [kW], la cual es aproximadamente 29% menor que la potencia nominal del motor (5,97 [kW]) trabajando con gasolina). Los resultados de las pruebas con biogás arrojaron un consumo específico de aproximadamente 0,65–0,70 [m^3 /kW.h] a plena carga.

4.4 Residuos orgánicos producidos en viviendas: una mirada desde su potencial para la producción de energía

Este proyecto se realizó con el fin de obtener un beneficio en el ahorro energético del complejo residencial y contribuir al manejo de residuos sólidos urbanos, que son fuente de contaminación por encima del parque automotor. De este (Hincapié Buitrago, 2017) realizó un estudio en un sector residencial donde se analizó la problemática de los residuos sólidos urbanos y su posible utilización como sustrato para la generación de energía a partir de biogás.

Residuos en el complejo habitacional la herradura: se realizó una encuesta a los 180 apartamentos con el fin de monitorear la producción de residuos orgánicos (RSO) para evaluar su posible aprovechamiento. El 48 % separa la basura en 2 bolsas, una con residuos orgánicos y la otra con los demás residuos. Se escogieron 5 bolsas al azar (de 36), con pesos entre 0,88 [kg] y los 3,55 [kg], encontrando en estas: cítricos, plátano, mango, maracuyá, aguacate, tomate de árbol,

tomate, cebolla, papa, vinas de arveja, apio, arroz cocido, pasta cocida, cascara de huevo y restos de carne, que son de consumo masivo en la mayoría de la población.

La producción de residuos por habitante es de aproximadamente $0,45 \left[\frac{kg}{(Habitante * día)} \right]$ del cual el 60% corresponden a residuos orgánicos (0,27 Kg).

En general 4 personas por apartamento y 180 apartamentos para un total de 5.832 [kg] de residuos sólidos orgánicos en 30 días en el complejo residencial en estudio.

Potencial energético de los residuos orgánicos: se han realizado estudios los cuales muestran que, en los alimentos, restos de frutas y verduras en forma de carbohidratos, lípidos y proteínas, los cuales a partir de la digestión a anaerobia y su descomposición son transformados hasta a producción de biogás. Los promedios de composición elemental de muestras en residuos de alimentos poseen los siguientes porcentajes:

Tabla 6.

Promedio composición elemental residuos alimenticios.

Elemento	Símbolo	Composición
Carbono	C	46,6%
Hidrogeno	H	6,6%
Nitrógeno	N	2,9%
Azufre	S	0,3%
Oxigeno	O	35%
Cenizas y otros	---	8,6%

Tomado de (Hincapié Buitrago, 2017)

Según los resultados obtenidos se estima que con los 5.832 [kg] de residuos orgánicos es posible producir 1.198,17 [m^3] de biogás a partir de 0,2054 [m^3/kg] de los residuos que se

obtienen del complejo residencial. Según las equivalencias del biogás a otros tipos de combustibles estos metros cúbicos de biogás representarían 7.188 [kW.h] en energía eléctrica. El contenido de metano CH₄ del biogás se estima en 70 % con un poder calorífico de 6 [kW.h/m³] y un rendimiento de la turbina de 26% para el mejor de los escenarios. Estos resultados se utilizaron en la siguiente ecuación para determinar la potencia disponible de energía eléctrica:

$$\text{Energía disponible (kW.h)} = nt * PCI_{\text{biogás}} * Q_{\text{biogás}} \quad (5)$$

Donde:

nt Rendimiento térmico de la generación eléctrica, 26%.

PCI_{biogás} Poder calorífico del biogás, se asume 6 [kW.h/m³].

Q_{biogás} Caudal del biogás producido.

$$\text{Energía disponible (kW.h)} = 26\% * 6 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right] * 1.198 \text{ [m}^3\text{]} \quad (6)$$

$$\text{Energía disponible (kW.h)} = 1.868,88 \text{ [kW.h]} \quad (7)$$

Según esto, se podrían generar en La Herradura, 1.868,88 [kW.h] al mes, a partir de 5.832 [kg] de RSO, o 0,32 [kW.h] por kg de RSO, utilizando una micro-turbina CR30 con una eficiencia del 26%.

Los 1.868,88 [kW.h] producidos al mes, corresponden a un ahorro de 6,8 % del consumo para los 180 apartamentos en La Herradura, tomando un consumo promedio de 152 [kW/h] mes por apartamento, es decir, 38 [kW.h] mes por persona.

Según la disponibilidad de micro turbinas a gas (potencias entre 5 y 200 [kW]) en el mercado, las limitantes económicas y volúmenes de producción de biogás la tecnología adecuada es una micro-turbina CR30. Contiene menor cantidad de piezas, requiere menor frecuencia de mantenimiento. Además tiene incorporado el generador lo que permite una mayor eficiencia y costes de inversión.

Tabla 7.

Micro turbinas disponibles en el mercado.

	Referencia	
	Micro-turbina CAPSTONE	Micro-turbina CAPSTONE
	CR30	CR60
Potencia Neta	30 kW	60 kW
Rendimiento Eléctrico	26 %	29%
Combustible	Biogás, gas natural, diésel	Biogás, gas natural, diésel
Nivel de ruido	65 dBA	70 dBA
Dimensiones en metros	0,76*1,52*1,9	0,76*2,0*1,9
Precio US	54.200	86.700
Precio Col	162.864.496	260.533.500
Mantenimiento	Cada 5 años	Cada 5 años

Tomado de (Hincapié Buitrago, 2017)

4.5 Otros estudios

- Castillo y Valderrama en (Castillo Villabona & Valderrama Solano, 2004), realizaron la adecuación de un motor de combustión interna diésel para funcionamiento a partir de diésel-biogás en una finca porcícola de la región como requisito de trabajo de grado en la universidad industrial de Santander.

El sistema de combustión se adecuó para funcionamiento con combustible dual (diésel-gas), a través de un dispositivo de inyección que proporciona cierta cantidad del combustible diésel (de

10% a 20% de la cantidad necesaria para su funcionamiento con solo diésel) y se rocía en la cámara de combustión con la mezcla aire-biogás.

La planta eléctrica utilizada fue un diésel de cuatro tiempos marca YONMAR serie L100AE con datos de placa registrados en la tabla 8:

Tabla 8.

Datos placa planta eléctrica diésel, YONMAR serie L100AE.

YONMAR L100AE	
Potencia [kW]	5,8
Tensión salida [V]	120/240
Velocidad [rpm]	3600
Fases	Monofásica

Tomado de (Castillo Villabona & Valderrama Solano, 2004)

Resultados:

➤ ***Prueba solo con diésel:***

Tabla 9.

Parámetros de operación planta sólo diésel.

Voltaje [V]	Corriente [A]	Carga [kW]	Velocidad [rpm]	Consumo [l/h]	Consumo [l/kW.h]
224	6,2	1,513	3595	1,447	0,956
238	12,7	3,023	3544	2,025	0,670
237	19,2	4,550	3487	2,411	0,568

Tomado de (Castillo Villabona & Valderrama Solano, 2004)

➤ *Combustible dual*

Tabla 10.

Consumo específico de acpm [L/kW.h] y biogás [m³/kW.h] en el sistema combustible dual.

Voltaje [V]	Corriente [A]	Carga [kW]	Velocidad [rpm]	Consumo		Consu.Biogás [m³/kW.h]
241	6,1	1,470	3560	0,627	0,426	1,241
243	12,3	2,866	3513	0,675	0,236	0,901
228	18,6	4,241	3410	0,675	0,159	0,839

Tomado de (Castillo Villabona & Valderrama Solano, 2004)

A partir de estos resultados se obtiene que la potencia de salida del sistema biogás-acpm comparada con el sistema solo diésel, disminuye en 1,6% por kW.h.

Tabla 11

Comparación consumo de acpm en los sistemas: solo acpm y combustible dual (biogás-acpm).

Consumo específico de acpm [I/kW.h]			
Carga	Operación de la planta	Operación de la planta	Reemplazo de acpm
kW	utilizando solo acpm	mezcla biogás-Diésel	%
1,470	0,956	0,426	52,67
2,866	0,670	0,236	63
4,241	0,568	0,159	72

Tomado de (Castillo Villabona & Valderrama Solano, 2004)

La eficiencia térmica se evaluó a partir de la relación entre la potencia de salida y la energía del combustible usado para producir esa salida. Según los resultados reportados en la tabla 12, la

eficiencia térmica de la planta diésel operada con el combustible dual disminuyó en un 33% en comparación con el funcionamiento normal de la planta. El biogás utilizado en el proceso registró un porcentaje de 33% de CO₂ dentro del volumen del cilindro reduciendo el poder calorífico del biogás.

A partir de la producción de biogás es posible determinar el potencial de generación teniendo en cuenta el valor del consumo específico de biogás por kW.h. Para el caso de la granja Porkys, granja donde se desarrollaron las pruebas piloto, se midió un flujo de biogás promedio de 15,10 m^3/h el cual puede generar 12,7 [kW.h].

Tabla 12.

Eficiencia térmica en los sistemas solo diésel y combustible dual.

Potencia [kW]	Consumo de combustible	Eficiencia %
Sistema solo diésel		
1,513	10,24	16
3,023	14,34	22
4,550	18,44	24
Sistema combustible dual		
1,47	15,36	10
2,97	21,51	14
4,24	25,00	17

Tomado de (Castillo Villabona & Valderrama Solano, 2004)

- Chile, propone una guía (Desconocido, 2012) e la cual se da mención a dos tecnologías más usadas para la generación de energía eléctrica las cuales solo se diferencian en el tipo de motor empleado: motores a gas de combustión en ciclo Otto y motores con encendido

diésel. En el caso de los primeros, la combustión se origina en la chispa producida por bujías eléctricas. En el caso de los motores con encendido diésel, se agrega en la cámara de combustión una pequeña parte de diésel (generalmente un 10%) que al comprimirse origina la combustión de la mezcla.

En ambos casos el motor acciona un generador eléctrico y entrega energía mecánica.

- En el año 2014 (Arango Gómez et al., 2014) realizaron un análisis exploratorio de investigaciones sobre los motores de combustión interna que trabajan con biogás, destacando el uso de motores de combustión interna en Asia, África y Latinoamérica y sus aplicaciones cotidianas en la agricultura, destacando parámetros de operación de estos equipos que trabajan por combustión mediante la ignición por chispa y encendido por compresión.
- En 2017, para el banco interamericano de Desarrollo BID (Blanco, Santalla, Córdoba, & Levy, 2017), en su estudio sobre generación de electricidad a partir de biogás proveniente de los residuos sólidos urbanos, destacando el uso de motores de combustión interna y micro turbinas en la mayoría de proyectos debido a sus eficiencias: por ejemplo, los motores de combustión interna presentan una mayor eficiencia en comparación con las micro turbinas (varía entre el 25 y 35%).

Las tecnologías de micro generación con motores de combustión interna y micro-turbinas han tomado ventaja en su utilización en gran parte a su disponibilidad comercial y también a la adaptabilidad de estos equipos para funcionamiento a partir de este gas, que con un tratamiento básico puede ser sustituto de los combustibles tradicionales.

5. Guía selección tecnología

En este capítulo se detallan los pasos mencionados en la metodología de la guía selección de tecnología del capítulo 3 sección 3.2, se muestra la descripción más detallada del paso a paso para la selección de la tecnología de generación acorde a la capacidad de demanda energética.

5.1 Fuente de energía

En este apartado se recolecta la información de la cantidad de ganado por tipo y tamaño que se tienen y de los cuales se busca aprovechar sus excretas para la producción de biogás. Se debe tener en cuenta en esta parte la tabla 13, reúne aspectos como potencial energético por edad del animal, producción promedio de excreta por día y producción de biogás por tamaño y tipo de ganado.

Es importante tener en cuenta que los datos son tomados partiendo de un aprovechamiento del 100% de la excreta generada por cada animal. En el caso de los bovinos hay que prever que el aprovechamiento no supera el 40% si la alimentación es tipo pastoreo (Barrientos Verjel & Banco Peñarete, 2010).

Tabla 13.

Producción de biogás por tamaño y tipo de ganado

Especie	Clasificación por edad	Tamaño	Cantidad excretas Kg/día	Producción de biogás m³/día
Bovino	Menor de 1 año	Ternero	4,0	0,16
	Entre 1 y 2 años	Pequeño	8,0	0,32
	Entre 2 y 3 años	Mediano	10,0	0,40
	Mayor a 3 años	Grande	15,0	0,60
Porcino	Menor a 2 meses	Pequeño	1,0	0,07
	Entre 2 y 6 meses	Mediano	1,5	0,1
	Mayor a 6 mese	Grande	2,0	0,14
Avícola	Entre 3 y 10 meses	Mediano	0,10	0,006
	Entre 25 y 50 días	Grande	0,15	0,009

Adaptado de (Vera-Romero, Martínez-Reyes, Estrada-Jaramillo, & Ortíz-Soriano, 2013), (Ramírez Balaguera & Barrera Ojeda, 2017) y (Vera-Romero et al., 2017) (Escalante, Orduz, Zapata, Cardona Ruiz, & Duarte Ortega, 2010)

5.2 Carga del biodigestor y cálculo de la capacidad de la planta

Una de las formas de dimensionar la capacidad de un biodigestor es a partir del volumen de la mezcla diaria entrante al biodigestor, es decir, la cantidad de litros resultantes entre agua y estiércol (carga diaria) multiplicando este resultado por los días de retención que varía entre 30 y 60 días dependiendo de la zona geográfica donde se vaya a desarrollar el proyecto, esto es:

$$V_{digestor} = V_{diario} * tiempo\ de\ retención$$

Explicación práctica tomada de (Varnero Moreno, 2011):

Explotación agropecuaria que dispone de 10 bovinos, la capacidad de la planta de gas teniendo en cuenta que $V_{digestor} = 0,8 * V_{liquido} + 0,2 * V_{gaseoso}$

$$volumen\ diario = 100\ kg\ de\ estiercol + 100\ litros\ de\ agua = 200\ Litros\ mez./día$$

$$V_{digestor} = 200[l/día] * 40[días] = 8000\ [litros]$$

$$V_{digestor} = 8\ [m^3]$$

5.3 Elección biodigestor más adecuado

El modelo del biodigestor debe ser eficiente, viable, económico, tecnológico y que su implementación sea adecuada para la zona en donde se desea trabajar. Algunos de los criterios para el diseño de un biodigestor se muestran a continuación:

- Espacio: para determinar si el tipo de diseño y el fermentador se ubica o no bajo tierra.
- Estructuras existentes: es útil para estudiar su posible uso.
- Minimizar costos: es un parámetro importante en el diseño. Actualmente hay biodigestores que se encuentran disponibles comercialmente.
- Sustrato disponible: determina el tamaño y la forma del tanque.
- Condiciones físicas: importantes para el funcionamiento de la planta (clima, condiciones del suelo, sustrato para la digestión, etc.).
- Habilidades: si se elige construir una tecnología muy sofisticada, el personal encargado de realizar dicha construcción y montaje debe tener la preparación necesaria.

Algunas de las características más relevantes de los biodigestores se presentan a modo de resumen en la tabla 14 y 15 como:

Tabla 14.

Resumen de las características de algunos biodigestores

Características	De estructura sólida fija	De estructura sólida móvil	De balón de plástico
Cámara de digestión	Esférica / bajo tierra	Esférica/ semiesférica	Semiesférica
Nivel de tecnología	Madura	Madura	Madura
Presión del gas	No constante	Constante	Muy baja presión de gas, es necesario aumentar la presión con sobrepeso.
Localización óptima	Todos los climas	Todos los climas	Todos los climas
Vida útil	20 años	20 años	5 años
Ventajas	Bajos costos de construcción, No posee partes móviles, No posee partes metálicas que puedan oxidarse.	manejo fácil, el gas almacenado es visible a través del nivel de la campana	Bajos costos de construcción, fácil transporte e instalación
Desventajas	La presión puede ser muy alta, por eso la cúpula tiene que ser cuidadosamente sellada.	Alto costo de construcción de la campana, la campana es metálica sujeta a corrosión	El material plástico está sujeto a daños y tiene que ser protegido

Tomado de (UPME, 2003)

Tabla 15.

Criterios de evaluación de algunos tipos de biodigestores.

	TIPO DE BIODIGESTORES				
	Chino	Hindú	Estructura flexible	Flotante	Tradicional con cúpula de PE
Requerimiento de espacio	Bajo	Bajo	Alto	Alto, y requiere cuerpo de agua	Bajo
Costo de inversión	Bajo-Medio	Mayor que digestor tipo Chino (por cúpula flotante)	Bajo	Bajo	30% menor que el Chino
Vida útil (años)	≥ 20	≥ 15 (5 en zonas costeras tropicales)	2 a 5	2 a 5	Digestor ≥ 20 cúpula =5
Mantenimiento	Bajo	Alta (cúpula móvil)	Bajo	Bajo	Bajo

Adecuado de (Arce Cabrera, 2011)

5.4 Análisis de la demanda energética de la finca

Para elegir el sistema de generación de energía eléctrica más adecuado, se requiere conocer los equipos a conectar o la demanda energética de la finca en estudio.

En este apartado se identifican los equipos a conectar y las horas de uso por parte del usuario, los datos de placas de los motores y las demás cargas que se van a alimentar.

Tomando las horas de uso de los equipos en funcionamiento se observa una tendencia en el consumo dependiendo la hora del día, para poder realizar el dimensionamiento del sistema de energía eléctrica de la finca se considera el consumo más elevado durante el día, por tanto, se toma como potencia máxima la que se da en esa hora puntual. En este caso se deberá tener especial cuidado a la hora de dimensionar el sistema, habrá que optar por un dato lo más acertado posible para no sobredimensionar el equipo generador o infra-dimensionarlo.

Para concretar datos de consumo energético en un día de operación de una finca basta con realizar el levantamiento de las cargas de la instalación, dicho levantamiento permite obtener el consumo energético durante un día y se lleva a cabo teniendo en cuenta la potencia demandada por cada una de las máquinas de la instalación y la franja horaria en la que operan. La potencia pico durante una hora puntual es la que se encarga de referenciar la potencia que debe entregar el grupo electrógeno.

5.5 Cantidad de biogás para suplir la demanda energética

A partir del poder calorífico (6 kW.h/m^3) se puede determinar la cantidad de biogás necesario para suplir la demanda energética de los equipos de la finca. Cabe resaltar que la demanda de energía total por día resulta del levantamiento de cargas y las horas de funcionamiento. Tener en cuenta:

Tabla 16.

Equivalencia eléctrica de 1 m³ de biogás.

Unidad	Equivalencia	Energía
1 [m³]	5 a 7,5 [kW.h]	1,5 a 3,0 [kW.h]

Adaptado de (Desconocido, 2012)

Se debe tener cuidado para elaborar la curva de demanda diaria de biogás, ya que esta curva parte de la curva de demanda de energía eléctrica de la finca. Se realiza la curva por hora de funcionamiento de los equipos y sumando la cantidad de biogás por cada hora se calcula el necesario para suplir la demanda energética diaria.

5.6 Cantidad de animales para producir el biogás que supla la demanda energética diaria

En este apartado se comprobará que el número animales es suficiente o no para la implementación, habrá que referirse a la tabla 13 donde se encuentra el porcentaje de biogás producido por tipo de animal. De allí se podrá extraer la especie de animal que se tiene en la finca a estudiar, relacionando su tamaño y su peso, estas tablas, identificarán la cantidad de biogás producido por dicho animal y la cantidad de animales necesarios para suplir la demanda diaria de biogás.

5.7 Sistema de generación de energía

La siguiente figura representa el proceso que se sigue para dimensionar el grupo electrógeno para la finca de estudio.

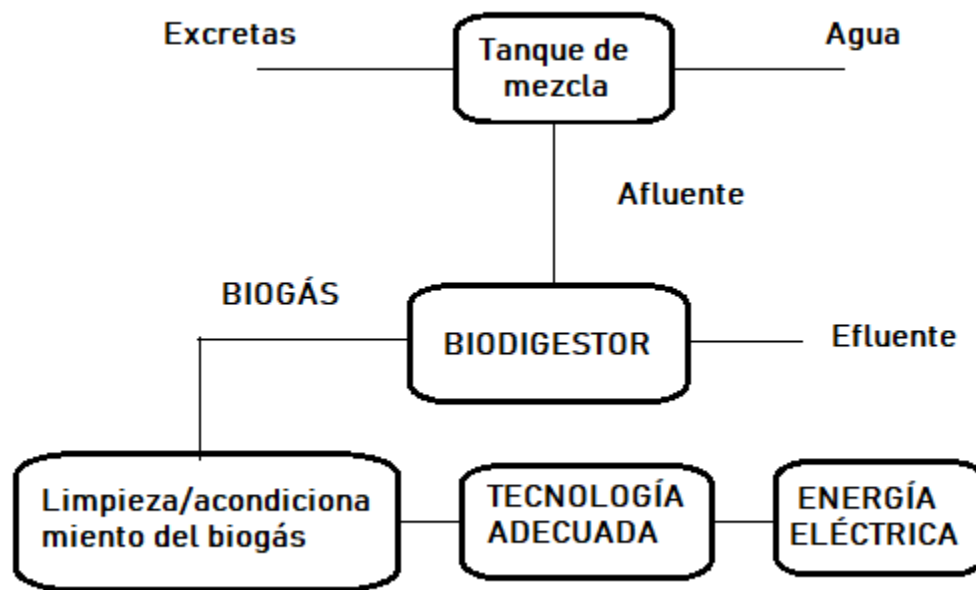


Figura 10. Diagrama de generación de energía eléctrica.

La generación de energía eléctrica se llevará a cabo a través de una turbina a gas o un motor de combustión interna, ya que se tienen diversas tecnologías para la generación de energía eléctrica a partir de biogás (celdas de combustible, motor de combustión externa), pero no son comercialmente factibles o aún se encuentran en etapa de estudio y su costo es muy elevado. El motor o la micro-turbina a gas serán los encargados de suplir la demanda diaria de la finca y para ellos se debe garantizar la suficiente cantidad de combustible (biogás) que satisfaga dicha demanda.

5.7.1 Dimensionamiento de equipos de generación de energía eléctrica. El dimensionamiento de los equipos de generación eléctrica será función de la producción horaria de biogás que puede generar la planta. Conocida la cantidad de sustrato que se alimentará diariamente

y sus características puede determinarse la cantidad de metano que se generará cada hora y que será consumida por el grupo generador.

Utilizando una aproximación para la eficiencia eléctrica de 26%, se determina el rango de potencia eléctrica que se considerará. A partir de la ecuación 17 se podrá hacer la estimación de potencia instalada:

$$Pe [kW] = Pnom * \eta_e \quad (8)$$

Donde

Pe = Potencia eléctrica.

η_e = Eficiencia eléctrica (%)

Se considera la disponibilidad de los equipos para la generación de energía en un 90% a 93%, teniendo en cuenta el mantenimiento de los mismos. Para tecnologías adaptadas a funcionamiento con biogás se debe considerar el tiempo que el equipo ha sido utilizado anteriormente ya que con esto se puede hacer una aproximación en cuanto a mantenimiento de dicho equipo se refiere y el factor de disponibilidad sería menor. En resumen, para tecnologías adecuadas que ya han sido utilizadas con anterioridad se debe evaluar sus características mecánicas y físicas.

De esta forma la cantidad de energía anual factible viene dada por:

$$Ee [kWh] = Pe * 8.760 * 0,9 \quad (9)$$

Donde

Ee = Energía eléctrica anual generada

Siendo 8760 el número total de horas por año y 0,9 el factor de la planta que en este caso se ha asumido similar a la disponibilidad de los equipos (tener en cuenta el mantenimiento), pues se ha supuesto una producción constante y homogénea de biogás (Blanco et al., 2017).

A continuación, se calcula la potencia del grupo electrógeno a utilizarse. Se podrá elegir con el valor pico de demanda diaria, la cual indicará la potencia del equipo de generación.

La siguiente tabla muestra la comparación entre las tecnologías de micro-generación mencionadas.

Tabla 17.

Comparación de tecnologías para generación de electricidad con biogás

	MACI ciclo. Diésel	MACI ciclo. Otto	Micro-turbina
η eléctrica	30-50%	25-45%	20-30%
Rango P [MW]	0,01-30	0,15-5	0,025-0,25
Espacio requerido (m^2/kW)	0,02	0,02-0,03	0,014-0,14
Costo instalación [\$/kW.h]	2.774.460-5.264.360	2.774.460-5.264.360	1.707.360-4.410.680
Disponibilidad	90-95%	92-97%	90-98%
t arranque	10s	10s	60s
Combustible	Gasoil, aceites residuales	GN, biogás, propano	GN, biogás, propano, aceites residuales
Ruido	Moderado a alto (requiere edificio cerrado)	Moderado a alto (requiere edificio cerrado)	Moderado alto (requiere edificio cerrado)

Adecuada de (Lambiano Iradiel, 2014)

5.8 Cantidad de biogás según las horas de funcionamiento de la finca

El biogás para el grupo electrógeno depende del dato de placa del grupo elegido. Este consumo por hora varía dependiendo el equipo a implementar, es decir, si dicho equipo escogido funciona

un periodo de tiempo de 9 horas a potencia nominal, el consumo de biogás será 9 horas multiplicado por la cantidad de biogás que consume el equipo cada hora (dato de placa).

6. Caso de Estudio

Este apartado pretende describir el funcionamiento de una finca agropecuaria (a modo de ejemplo) con consumo de energía eléctrica especial, conocer a fondo el tipo de cargas instaladas en la finca para aplicar y evaluar la solución energética planteada.

Paso 1: cantidad y tipo de animales como fuente de energía.

En la finca existe un total de cuarenta animales designados para producción lechera, estos están en un rango de edad entre 2 y 3 años y cuentan con un establo lo que hace posible una recolección adecuada de sus excretas para producción de biogás. En la finca también existen caprinos y equinos.

Paso 2: carga y volumen del biodigestor.

Cuarenta animales con el promedio de edad mencionado se tendrá una producción diaria de 10 [kg/día] de excreta, pero debido al que parte de su alimentación es pastoreo solo se puede aprovechar el 40% de este, es decir 4 [kg/día] de excreta.

Una estimación para la mezcla es por cada kg de excreta se debe adicionar un litro de agua para cargar el biodigestor, entonces:

$40 * 4[kg] + 160 [litros] = 320 L/día$ Que corresponde al volumen de la mezcla diaria que ingresará al digestor. Para un tiempo de retención de 35 días el volumen del digestor (V_d) será:

$$Vd = 320[L/día] * 35[días] = 11200 \text{ Litros} = 11,2 m^3$$

Paso 3: la elección del biodigestor más adecuado será un biodigestor de domo, este biodigestor forma parte de la tecnología conocida como biodigestor familiar de bajo costo, llamado así por la sencillez en la construcción y por la economía en sus materiales. Este tipo de biodigestor está introduciéndose rápidamente en comunidades rurales ya que permiten solventar la problemática energética-ambiental, así como realizar un adecuado manejo a las excretas de los animales pertenecientes a las fincas donde se implementan.

Paso 4: las actividades básicas que realiza una finca agropecuaria. Cuenta con un consumo energético especial, debido a que en horas de la mañana se desean conectar diferentes tipos de motores, para facilitar las labores diarias. Dichos motores son los siguientes

1. Motor correspondiente al proceso de Pica pasto y alimento
2. Motor correspondiente al proceso de ordeño
3. Motor correspondiente al Sistema de riego

Cabe resaltar que la finca posee un consumo energético de luminaria para el establo.

Se establece un horario de funcionamiento de la finca operando de lunes a domingo. A las 4:00 am comienza la etapa productiva de la finca, para estimaciones posteriores se considera que la finca trabaja 5 horas al día durante un promedio de 29 días al mes.

Tabla 18.

Operación promedio de la finca de estudio

Horas de funcionamiento diario	5 [h/día]
Días de operación (promedio)	29 [días/mes]

La finca a estudiar consta de maquinaria necesaria para la realización del proceso productivo, como para gestionar y tratar la parte de la limpieza de los establos o cocheras. A continuación, se muestra información correspondiente a estos equipos en la tabla 19 se evidencian los recursos para realizar su etapa productiva.

Tabla 19.

Equipos en la finca de estudio y horas de uso

Equipo	Potencia [W]	Horas de uso	Franja horaria
Motor ordeño	1100	2	4am-6am
Motor pica pasto y alimento	1200	2	5am-7am
Motor del sistema de riego	1000	3	6am-9am
Luminaria cochera y corrales	500	3	4am-7am

Para la estimación de estos valores de potencia fueron consultados catálogos de empresas reconocidas como por ejemplo Penagos, ya que este caso de estudio corresponde a un ejemplo supuesto.

Tabla 20.

Distribución cargas coincidentes y energía demandada

Franja horario	Cargas coincidentes	Energía en [kW.h]
4am-5am	Iluminación + motor ordeño	1,6
5am-6am	Iluminación+motor ordeño+Motor alimento	2,8
6am-7am	Iluminación+motor alimento+motor riego	2,7
7am-8am	Motor riego	1,0
8am-9am	Motor riego	1,0
Total		9,1

De la tabla 20 se obtiene:

- La potencia pico que llega a consumir la finca es 2,8 kW.
- El consumo energético de la finca es 9,1 [kW/día] para un funcionamiento de 5 horas de los equipos agropecuarios.

Con base en la tabla 20 se realiza la curva de demanda diaria de esta finca.

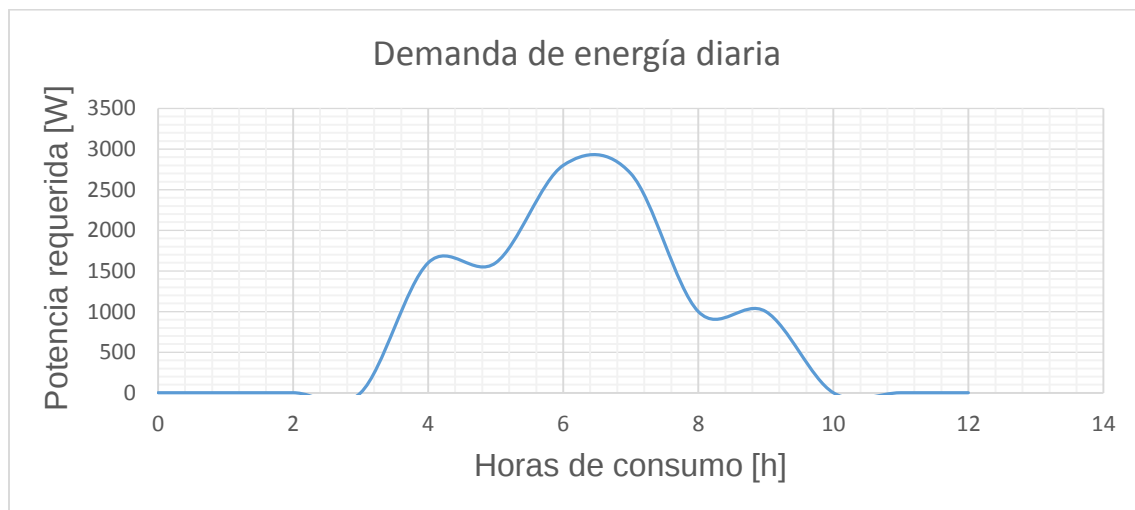


Figura 11. Demanda de energía diaria de la finca

Paso 5: Cantidad de biogás para suplir la demanda energética según la figura 11

La siguiente tabla describe como están distribuidas las cargas en la franja horaria de 4am a 9am.

Tabla 21.

Cargas coincidentes y franja horaria

Franja horario	Cargas coincidentes	Energía en [kW.h]	Biogás en m^3
4am-5am	Iluminación + motor ordeño	1,6	1
5am-6am	Iluminación+motor ordeño+Motor alimento	2,8	1,68
6am-7am	Iluminación+motor alimento+motor riego	2,7	1,62
7am-8am	Motor riego	1,0	0,6
8am-9am	Motor riego	1,0	0,6
Total		9,1	5,5

De la figura 11 se obtiene que el consumo d biogás por hora y el consumo total de biogás para suplir la demanda energética de la finca, dicho consumo diario de biogás es:

$$Q_{biogás} = 5,5 \text{ [} m^3 / \text{ día]} \quad (10)$$

Paso 6: El consumo de biogás mínimo para cada día es de $5,5 \text{ [} m^3 \text{]}$. Partiendo de los cuarenta animales para el aprovechamiento de las excretas por día será: una cabeza de ganado con las características mencionadas produce al día 4 [kg] de estiércol lo que corresponde a $0,16 \text{ [} m^3 \text{]}$, entonces el número de animales para satisfacer esta demanda de biogás diario será de 35.

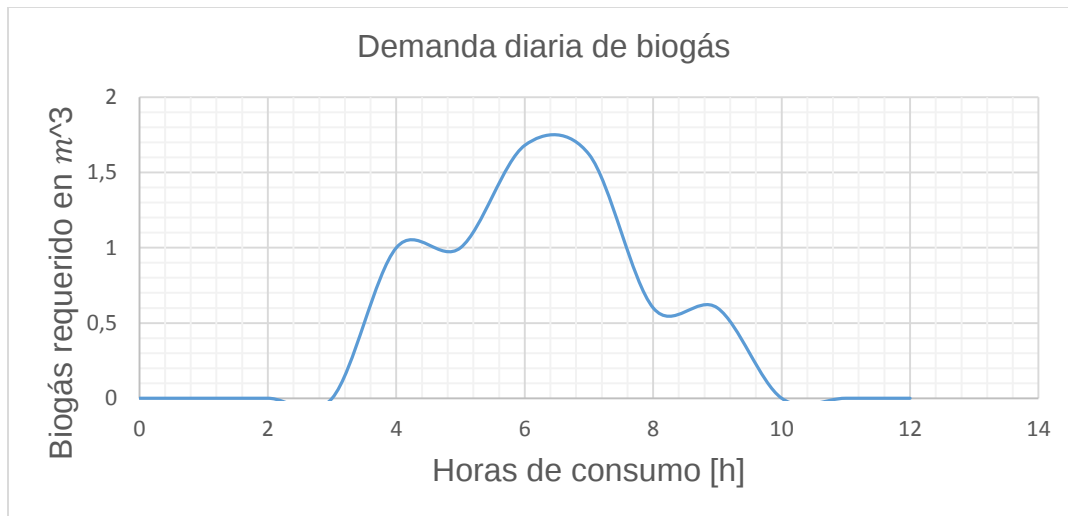


Figura 12. Demanda diaria de biogás

La demanda diaria de biogás estará acorde con la energía demandada a diario y este valor variara conforma se disminuya o se aumente la potencia en las distintas horas de funcionamiento de los equipos.

Paso 7. Dimensionamiento del grupo electrógeno.

Teniendo en cuenta la disponibilidad, el costo, la vida útil, el ruido y el espacio que ocupan los equipos, se concluye que la tecnología más adecuada para la generación de energía eléctrica a partir de biogás se encuentra entre la opción de motores de combustión interna o micro-turbinas a gas.

Para elegir adecuadamente el grupo electrógeno hay que tener en cuenta diversos factores como:

- La potencia que se necesita obtener del mismo, y para ello hay que tener en cuenta los picos de potencia que se puedan presentar en la demanda diaria.
- La carga o el trabajo que va a realizar el grupo electrógeno, la cantidad horaria que se tiene pensado tenerlo en funcionamiento.

- La cantidad de biogás a la entrada del motor para realizar correctamente la combustión.

Con base en la información anterior el grupo electrógeno elegido para suplir la demanda diaria de la finca es el siguiente:

Tabla 22.

Especificaciones técnicas del grupo electrógeno

Generador	
Modelo	E-S 3,5 kW
Fuente de gas	Biogás
Potencia	3,5 [kW]
Tensión nominal [V]	220/240 [V]
Factor de potencia	0,99
Ruido (Db)	65 Db
Tiempo de trabajo continuo (h)	9 h
Consumo de gasolina	1,2 l/h
Consumo de gas (m^3/kWh)	1,46 m^3/h
Frecuencia	50 HZ / 60HZ
Velocidad	3000 rpm
Método de enfriamiento	Refrigerado por aire
Peso	85 kg
Corriente nominal	15 A

Tomado de (Empresa de Trading, 2019)

El precio del grupo electrógeno es de US\$ 980,00 que en pesos colombianos serán \$ 3´134.481 (valor para la fecha 25/julio/2019)

Paso 8: consumo de biogás por hora a la entrada del grupo electrógeno

El consumo de biogás a la entrada del grupo electrógeno viene especificado en el dato de placa del equipo, dicho consumo es para entregar la potencia máxima del equipo. A continuación, se muestra la curva de consumo por hora de biogás a la entrada del grupo electrógeno.

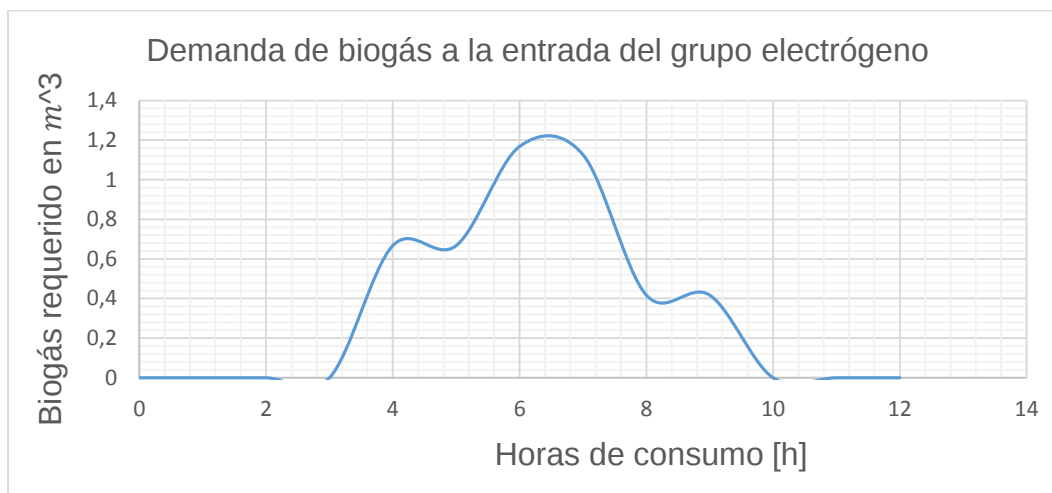


Figura 13. Consumo de biogás a la entrada del motor

Como se resaltó en el paso 5 la cantidad de biogás con la que dispone la finca para suplir la demanda energética diaria es de $5,5 \text{ [m}^3/\text{día}]$ y el consumido por el grupo electrógeno diariamente es de $3,8 \text{ [m}^3/\text{día}]$.

Todos los datos para la realización de las curvas se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 23.

Resumen de demandas caso práctico.

Horas	Demanda de energía diaria [kW.h]	Demanda de biogás diario m^3/h	Demanda de biogás a la entrada del grupo electrógeno m^3/h
4-5	1,6	1	0,67
5-6	2,8	1,68	1,2
6-7	2,7	1,62	1,13

Horas	Demanda de energía diaria [kW.h]	Demanda de biogás diario m^3/h	Demanda de biogás a la entrada del grupo electrógeno m^3/h
7-8	1,0	0,6	0,42
8-9	1,0	0,6	0,42

6.1 Viabilidad económica

En este apartado se realiza una comparación sencilla entre los costos que existen al generar energía eléctrica a partir de biogás y generar con combustibles fósiles (gasolina en este caso) para el funcionamiento de las herramientas de producción de la finca.

6.1.1 Generación con gasolina. Teniendo en cuenta la necesidad de suplir la demanda energética del caso de estudio presentado en este proyecto donde la carga total es de 3,8 [kW], correspondiente a la suma de la potencia de todos los elementos mencionados en la tabla 19 los cuales corresponden a las herramientas de operación de la finca y teniendo en cuenta que la máxima potencia proyectada es de 2,8 [kW] el grupo electrógeno escogido es el generador DIYBIOGAS, dicho generador emplea biogás o gasolina para su funcionamiento.

Para iniciar los cálculos habrá que referirse a los datos técnicos del generador, cuanto biogás o cuanta gasolina requiere para un trabajo continuo de 5 [h] con picos en su consumo.

Para este caso el modelo elegido consume 6 [L] de gasolina para garantizar un funcionamiento de 5 [h] diariamente, al ser la gasolina un combustible con una variación impredecible en su costo, dificulta la proyección a largo plazo. Por tal motivo se toma el valor del galón de gasolina en \$9736 “valor tomado para el 1/08/2019”.

La planta Generador DIYBIOGAS consume 1,2 [L/h] de gasolina, y el tiempo de trabajo del generador es de 5 [h] que corresponden al tiempo de labores como ordeño, riego y preparación del alimento, diariamente de la finca en estudio. Como ya se mencionó, el consumo diario de gasolina es de 6 [L], el consumo anual será de 2088 [L] que son equivalentes a 551 galones de anuales, estos resultados corresponden a los valores de la operación promedio de la finca de la tabla 18.

$$\$9736 * 551 \text{ galones} = \$5'364.536 \quad (11)$$

Por tanto, el valor de la gasolina necesaria para satisfacer el consumo diario del caso de estudio es de:

$$\$9736 * 1,58 \text{ galones} = \$15.413,2 \quad (12)$$

Para la DIYBIOGAS el precio es de US\$ 980,00 que correspondiente a pesos colombianos serán \$ 3'134.481 (valor para la fecha 25/julio/2019).

En conclusión, para generar energía eléctrica con este modelo de planta y a base de gasolina el costo anual será aproximadamente el resultado de la suma del costo de adquisición del generador, más el costo de operación de dicho equipo más el costo por mantenimiento K del mismo. Esto es:

$$CTG_{\text{gasolina}} = \$3'134.481 + \$5'364.536 + k \quad (13)$$

$$CTG_{\text{gasolina}} = \$8'499.017 + k \quad (14)$$

6.1.2 Generación con biogás. El principal factor con el cual tiene que competir este tipo de generación es con la generación de energía a base de combustibles fósiles, la mayoría de estos combustibles son adquiridos de manera sencilla y rápida. Queriendo aprovechar el biogás para reemplazar la gasolina o el diésel se debe considerar que su cantidad justifique la compra o modificación de un grupo electrógeno.

Primeramente, para producir biogás se necesita disponer de un biodigestor, para el caso de estudio visto el biodigestor debe tener una capacidad de 11.000 [L]. Actualmente en el mercado un biodigestor de forma horizontal con capacidades desde 4.500 a 20.000 [L] y cilíndrico puede alcanzar un precio cercano a \$ 8'000.000 (buscando el más económico), esto si se tiene la idea de adquirir el biodigestor. Además, se tiene que analizar la forma de transportarlo y si la zona donde se va a realizar su montaje es cercana al punto de comercialización.

Es por esto que partiendo de los estudios realizados por (Barrientos Verjel & Banco Peñarete, 2010) para el diseño de un biodigestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno de 60 [m^3] el precio para el año 2010 era aproximadamente de \$2'800.000, sus materiales son asequibles en cualquier lugar debido a su diseño robusto. Para un biodigestor de 11 [m^3] se estima un valor de construcción de este tipo de planta de \$1'200.000.

Para generar energía eléctrica con este modelo el costo anual será aproximadamente el resultado de la suma del costo de adquisición del generador más el costo por mantenimiento K del mismo, más el costo de implementación del biodigestor.

En conclusión, para generar energía eléctrica a partir de biogás con la planta DIYBIOGAS se tendrá que realizar una inversión de

$$CTG_{biogás} = \$3'134.481 + \$1'200.000 + k \quad (15)$$

$$CTG_{biogás} = \$4'334.481 + k \quad (16)$$

6.1.3 Comparación de resultados. En la tabla 24 se muestra a modo de resumen el valor del kW.h entre las dos formas de accionar el sistema moto-generador con los dos diferentes tipos de

combustibles, teniendo en cuenta la operación promedio de la finca (5 horas diarias por 29 días al mes).

Tabla 24.

Estimación de resultados para los dos tipos de combustible

	CTG gasolina	CTG biogás
Inversión fija	\$ 3'134.481	\$ 3'134.481+\$ 1'200.000
Pago anual por combustible	\$ 5'364.536	\$ 1'134.000
Costo total anual	\$ 8'499.017	\$ 5'464.481
Energía demandada	3166,8 kW.h/año	3166,8 kW.h/año
Valor por kW.h/año	\$ 2.683.79	\$ 1.726,8

El uso del biogás requiere de una mayor inversión para iniciar el proceso de generación, además que en la construcción se pueden aprovechar elementos que se encuentran en una finca como rocas para las paredes del biodigestor disminuyendo así el costo inicial del proyecto.

Se debe disponer de la capacidad financiera para cubrir el costo del equipo y de la planta generadora de biogás. Esta planta resulta más factible construirla debido a los altos precios de las tecnologías de captación disponibles en el mercado para el uso del biogás, un inconveniente, es contar con el espacio suficiente para el montaje del biodigestor y que este se instale en un lugar cercano a la zona donde se encuentra el establo para darle un manejo rápido y fácil a los residuos.

Se realizó un análisis básico de viabilidad para un proyecto de micro-generación a pequeña escala con la suposición que quién va a realizar este proceso práctico cuenta con la capacidad económica para financiar el proyecto, es decir, que no tiene que adquirir créditos ya que el estudio se tendría que realizar de forma más detallada teniendo en cuenta los intereses por la adquisición del crédito.

7. Conclusiones

Actualmente las tecnologías de micro-generación de energía eléctrica para suplir un déficit de energía son los motores de combustión interna y las micro-turbinas por su disponibilidad comercial, por su costo y porque son una tecnología madura en este ámbito. Además, estos equipos se pueden adaptar a funcionamiento con biogás por el contenido de metano del que está compuesto este combustible.

Los moto-generadores de combustión interna tienen una ventaja significativa en comparación con las micro-turbinas, ya que estos se encuentran en rangos de potencias desde los 3 [kW] en adelante y son útiles para ser utilizados en generación a pequeña escala mientras que las micro-turbinas inician en un rango de 30 [kW].

El consumo de biogás de los motores y micro-turbinas está especificado por los datos de placa del equipo. Para la adecuación de una tecnología a funcionamiento con biogás, se realiza una comparación con los combustibles tradicionales y se puede hacer una estimación de la cantidad necesaria para su funcionamiento.

El uso de biogás en estas tecnologías altera la eficiencia de los mismos, debido alto porcentaje de dióxido de carbono, es por esto que se debe realizar una adecuación y purificación del biogás para reducir la mayor proporción posible de este componente.

La implementación de este tipo de proyectos en sectores rurales es una buena posibilidad de abastecimiento energético para fincas no interconectadas, con deficiencias en el servicio o para

sistemas de coberturas de picos, debido a que su utilización es versátil y trae como ventaja la posibilidad de ser instalada en cualquier ambiente.

La elección del biodigestor adecuado se debe realizar teniendo en cuenta parámetros como el costo de construcción, su vida útil, el mantenimiento bajo y que se cuente con un lugar acorde para su instalación es decir, que este cerca al sitio donde se encuentre la fuente de energía, que no obstaculice y retrase las demás actividades agropecuarias. Por seguridad se debe evitar la cercanía con el grupo electrógeno.

La generación de energía eléctrica a partir de biogás causa afectaciones positivas a nivel social ya que es un método de aplicación que promueve la autonomía energética y abastece una demanda básica con electricidad. Siendo esta generación amigable con el medio ambiente evitando las emisiones de óxidos de nitrógeno y dióxido de carbono.

Referencias Bibliográficas

- Angamarca Castillo, E. R., & Arequipa Iza, D. P. (2014). *Análisis del Rendimiento de un Motor de Combustión Interna con Biogás y Aplicación Para la Generación de Energía Eelétrica*. Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.
- Arango Gómez, J. E., Sierra Vargas, F. E., & Silva Leal, V. (2014, January). Análisis Exploratorio de Investigaciones Sobre los Motores de Combustión Interna que Trabajan con Biogás. *Tecnura*, 18(39), 152–164. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.1.a11>
- Arce Cabrera, J. 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*. Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil.
- Barrientos Verjel, W. A., & Banco Peñarete, A. (2010). *Estudio de Factibilidad Técnica y Financiera del Uso del Biogás Obtenido del Excremento de Ganado Para Suplir Necesidades Energéticas en el Sector Rural*. Universidad Industrial de Santander.
- Blanco, G., Santalla, E., Córdoba, V., & Levy, A. (2017, March). Generación de Electricidad a Partir de Biogás Capturado de Residuos Sólidos Urbanos: Un Análisis Teórico-Práctico. *División de Energía*, 52.
- Castillo Villabona, D., & Valderrama Solano, A. C. (2004). *Estudio de Pre-Factibilidad Técnica y Económica de la Utilización de Biogás en Plantas Diésel Para Generación Eléctrica*. Universidad Industrial de Santander.
- Corredor Cruz, M. R. (2017). *Remoción de H₂S del Biogás Producido a Partir de Estiércol Bovino, en la Unidad de Digestión Anaerobia de la Finca Marcella (Km 9 Casco Urbano Girón Santander)*. Universidad Industrial de Santander.
- Desconocido. (2009). Clasificación de Biodigestores | Energía Casera. Retrieved May 20, 2019, from <https://energiacasera.wordpress.com/2009/09/17/clasificacion-de-biodigestores/>

- Desconocido. (2012). Guía de Planificación para Proyectos de Biogás en Chile. *División de Energías Renovables*, 136.
- Dimpl, E. (2010). Small-scale Electricity Generation from Biomass Part II: Biogas. (M. BLUNCK, Ed.), *Small-Scale Electricity Generation from Biomass*, 23.
- Empresa de Trading. (2019). Catalogo grupos electrogenos. Retrieved August 1, 2019, from <http://www.aqualimpia.com/generadores-biogas/>
- Energypedia. (2016). Electricity Generation from Biogas - energypedia.info. Retrieved May 22, 2019, from https://energypedia.info/wiki/Electricity_Generation_from_Biogas
- Escalante, H., Orduz, J., Zapata, H. J., Cardona Ruiz, M. C., & Duarte Ortega, M. (2010). *Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia*. Retrieved from [https://biblioteca.minminas.gov.co/pdf/ATLAS POTENCIAL ENERGETICO BIOMASA RESIDUAL COL. UPME.pdf](https://biblioteca.minminas.gov.co/pdf/ATLAS_POTENCIAL_ENERGETICO_BIOMASA_RESIDUAL_COL.UPME.pdf)
- González-Longatt, F. M. (2004). Tecnologías de Generación Distribuida : Costos y Eficiencia. *I Seminario de Ingeniería Eléctrica, Unexpo, Puerto Ordaz*, 11.
- Goodyear. (2018). Motor gasolina: tipos y cómo funciona un motor a gasolina. Retrieved January 12, 2019, from <http://kilometrosquecuentan.com/motor-gasolina/>
- Hincapié Buitrago, E. (2017). *Residuos Orgánicos Producidos en Viviendas: una mirada desde su potencial para la producción de energía*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Kipping, D. R., & Ortíz Laurel, H. (2013, June). Combustible Biogás en Celdas de Hidrógeno. *Conciencia Tecnológica*, 01(45), 37–40.
- Lambiano Iradiel, I. (2014). *Estudio De Viabilidad De Un Sistema De Generación De Energía Eléctrica Empleando Biogás Como Combustible En El Matadero Municipal de Cochabamba (Bolivia)*. Universidad Pública de Navarro.

- Lozano Piñeros, L. H. (2009). *Stirling: Estudio Técnico-Económico Para Determinar La Factibilidad De La Implementación De Unidades De Generación De Energía Eléctrica a Partir De Fuentes Solar Térmica Y Geotérmica*. Universidad Industrial de Santander.
- Navarro Ortiz, N. (2017). *Potencial Técnico Para la Producción de Biogás, Generado a Partir de Residuos Orgánicos Producidos en la Comuna de Independencia*. Universidad de Chile.
- Orozco, J. E., Carmona, F., Botero, R., & Hernández, C. (2004, December). Utilización de Biogás Para Uso en Motores de Cuatro Tiempos (Diésel o gasolina). *Manual*, 9.
- Plata Alvarez, J., & Siachoque Alarcón, L. E. (2011). *Celdas de Combustible: Determinación del Tipo Apropriado Para la Generación Eléctrica Utilizando Gas Natural Como Combustible*. Universidad Industrial de Santander. <https://doi.org/10.1287/orsc.7.2.136>
- Quesada, R., Salas, N., Arguedas, M., & Botero, R. (2007). Generación de Energía Eléctrica a Partir de Biogás. *Tierra Tropical*, 3(2), 227–235.
- Ramírez Balaguera, L. F., & Barrera Ojeda, D. F. (2017). *Potencial Energético de la Biomasa Residual Pecuaria del Departamento de Cundinamarca – Colombia*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Razbani, O., Mirzamohammad, N., & Assadi, M. (2011). Literature review and road map for using biogas in internal combustion engines. In *Third International Conference on Applied Energy* (p. 10). Perugia, Italy.
- UPME. (2003, March). Guía de implementación de Sistemas de Biogás. *Formulación de Un Programa Básico de Normalización Para Aplicaciones de Energías Alternativas y Difusión*, 47.
- Valladares, S. (2017). Motor De Combustión Interna: 2 Tiempos, 4 Tiempos, Wankel Y Turbinas. Retrieved February 15, 2019, from https://www.mundodelmotor.net/motor-de-combustion-interna/#ciclo_wankel_de_4_tiempos
- Varela Antón, D. (2013). *Análisis de la Situación Actual del Aprovechamiento de la Biomasa Para Producción de Electricidad en España*. Universidad Carlos III de Madrid. Retrieved from <https://e->

archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/17764/PFC_Daniel_Varela_Anton.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. (CHI/00/G32, Ed.), *Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables*. Santiago de Chile: FAO 2011.

Vera-Romero, I., Estrada-Jaramillo, M., González-Vera, C., Tejada-Jiménez, M., López-Andrade, X., & Ortiz-Soriano, A. (2017). Biogás como una fuente alternativa de energía primaria para el Estado de Jalisco, México. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 18(3), 307–320. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432017000300307

Vera-Romero, I., Martínez-Reyes, J., Estrada-Jaramillo, M., & Ortiz-Soriano, A. (2013). Potencial de Generación de Biogás y Energía Eléctrica Parte I: Excretas de Ganado Bovino y Porcino. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 15(3), 429–436. [https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(14\)70352-x](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(14)70352-x)