



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE CIENCIAS, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

---

Dimensionamiento de generación de energía  
eléctrica a partir de biogás aplicado a un  
motor-generator híbrido

---

TESIS  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
**INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA**

PRESENTA  
**JOSÉ RODRIGO SANTANA CASARÍN**

DIRECTO DE TESIS:  
**DR. GUILLERMO BECERRA NÚÑEZ**

ASESORES  
**DR. EMMANUEL TORRES MONTALVO**  
**M. I. A. JUAN CARLOS ÁVILA REVELES**  
**DRA. EDITH OSORIO DE LA ROSA**  
**M. P. SET JUBAL CASTILLO ÁVILA**



Chetumal, Quintana Roo, México 10 de noviembre del 2022



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE QUINTANA ROO

## DIVISIÓN DE CIENCIAS, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

TESIS ELABORADA BAJO LA SUPERVISIÓN DEL  
COMITÉ DE TESIS DEL PROGRAMA DE  
LICENCIATURA Y APROBADA COMO REQUISITO  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

**INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA**

### COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR: \_\_\_\_\_

*Guillermo Becerra*  
Dr. Guillermo Becerra Núñez

ASESOR: \_\_\_\_\_

*Emmanuel Torres*  
Dr. Emmanuel Torres Montalvo

ASESOR: \_\_\_\_\_

~~*Juan Carlos Ávila*~~  
M. I. A. Juan Carlos Ávila Reveles

ASESOR: \_\_\_\_\_

*Edith Osorio*  
Dra. Edith Osorio de la Rosa

ASESOR: \_\_\_\_\_

*Set Jubal*  
M. P. Set Jubal Castillo Ávila



DIVISIÓN DE CIENCIAS,  
INGENIERÍA

Chetumal, Quintana Roo, México 10 de noviembre de 2022

## Agradecimientos

Cuando se trata de agradecer, palabras me faltan para describir todo aquello por lo que estoy agradecido, he recibido mucho apoyo a lo largo de mi vida, de formas tan distintas; desde cosas tan aparentemente insignificantes, hasta detalles remarcables que me han permitido seguir adelante. Por ende, procuraré ser lo más breve que me sea posible.

Antes que nada, quiero agradecer a Dios por permitirme haber llegado tan lejos y de buena manera, más de lo que creía honestamente.

Para mí el simple hecho de realizar un trabajo de tesis me parecía algo verdaderamente complejo, laborioso y técnico, lo cual lo fue, pero no tanto como me lo pude haber imaginado.

Por lo mismo, quisiera agradecer a todas aquellas personas que me han acompañado a lo largo de todo este trayecto, como mi familia, mi madre, padre y hermana que me han apoyado y alentado a no darme por vencido.

Yo no sé qué sería sin mi mamá detrás y delante de mí todo el tiempo, siempre cuidando mi camino y procurando darme lo mejor que tiene con tal de superarme, sin la ayuda de mi más grande guardiana, no habría podido seguir.

De la misma forma quiero agradecer a mi pareja, Leonela, que estuvo a mi lado motivándome y dándome esperanza, tranquilidad, al igual que confianza en mí mismo constantemente. Muchas gracias por todo, *You mean the world to me.*

Al igual que a mis seres queridos y amigos con los que he contado todo este tiempo, en particular al Ing. Yohanan Contreras, mi buen amigo y compañero con el que compartí toda la carrera, formando así un excelente equipo.

También me gustaría agradecer especialmente el apoyo del Dr. Guillermo Becerra, por ser un maestro y director, así como amigo. Pienso yo que sin su apoyo este trabajo no habría visto la luz.

Y en caso de que no los vea... Buenos días, buenas tardes y buenas noches.

## Resumen

El presente documento, corresponde a una investigación en la cual se describe un análisis pormenorizado para dimensionar los sistemas de biodigestión anaerobia, como fuente de energía alterna al uso del combustible convencional, es decir, la gasolina, proceso por medio del cual se pretende abastecer una demanda energética determinada, considerando una carga eléctrica y una planta de generación para la misma.

Se describe entonces, para su análisis, la sustitución en porcentajes del combustible – gasolina por el biogas que sea generado en el biodigestor, así como las ventajas del mismo.

Inicialmente, se considera suplir el 10 % de gasolina y se calcula la potencia máxima que se puede suplir con biogas, por el volumen disponible en el motor de combustión asociado. Para el caso seleccionado, el porcentaje máximo de potencia es del 41 %, con respecto al 100 % de la gasolina con el que se diseñó el sistema.

# Contenido

Capítulo 1. Generalidades .....	5
1.1 Introducción .....	5
1.2 Planteamiento del problema .....	11
1.3 Objetivos .....	12
1.3.1 Objetivo General: .....	12
1.3.2 Objetivos Específicos:.....	12
1.4 Justificación .....	12
1.5 Alcance y aportaciones .....	13
1.6 Descripción del contenido.....	14
Capítulo 2. Biodigestores y diseño metodológico .....	15
2.1 Dimensionamiento del biodigestor.....	15
2.2 Método de dimensionamiento del biodigestor .....	24
2.3 Materia prima para la carga.....	28
2.4 Relación carbono nitrógeno (C/N) .....	29
2.5 Crecimiento de metano (CH <sub>4</sub> ).....	31
2.6 Volumen biodigestor.....	34
Capítulo 3. Dimensionamiento de carga y generador .....	37
3.1 Análisis de carga eléctrica .....	37
3.2 Selección del equipo.....	39
3.3 Análisis de combustibles .....	44
3.4 Cantidad energética que suplir con biogás.....	46
Capítulo 4. Resultados de simulación y análisis.....	50
Capítulo 5. Conclusiones.....	56
Referencias.....	60

# Capítulo 1. Generalidades

## 1.1 Introducción

Es bien sabido que, gracias al gran progreso tecnológico de la humanidad se han ido desarrollando distintas formas de sustentar las necesidades y solventar las adversidades a las que se ha enfrentado a lo largo de la historia. Donde la energía ha sido el “combustible” que ha permitido este desarrollo y a su vez, la mejora de la calidad de vida.

La utilización de la energía por el hombre, siempre ha estado presente a lo largo de la historia, comenzando desde algo tan simple como el descubrimiento del fuego hace cerca de 1,000,000 de años, posteriormente inventos como la rueda, datada por el 3500 A. C, lograron facilitar el transporte empleando la fuerza animal. De la misma forma el invento de la vela permitió explotar la energía del viento (eólica) en el transporte marítimo, lo que desembocaría más adelante en el molino hidráulico o el eólico.

Asimismo, sucedió en China, más o menos por la edad media con el descubrimiento de la pólvora, donde se aprovechaba su poder destructivo a partir de la energía química que ésta generaba.

Hubo un periodo inerte, donde no se lograron avances significativos sino hasta finales del siglo XVII, cuando a partir de los progresos en el conocimiento de la física y la química aplicados en la ingeniería, se comenzaron a consolidar los primeros intentos para construir la máquina de vapor, la cual buscaba aprovechar el vapor producido del calor de la combustión de fósiles para accionar pistones mediante el vapor a presión.

Siendo así perfeccionada la máquina de vapor, años después por James Watt entre 1769 y 1782, quien introdujo mejoras y la convierte, en el primer motor de la Primera Revolución Industrial. Es decir, a fin de facilitarse el trabajo, el hombre empezó a desarrollar máquinas y mecanismos, donde el enfoque principal ha sido claro, la productividad. (Cassedy & Grossmann, 1990)

Es por eso mismo que siempre se ha procurado mantener un nivel alto de eficiencia, donde se logre aprovechar la mayor cantidad de tiempo, material, recurso, etc. Dicho de otra manera, se pueda optimizar al máximo los recursos.

Con el paso del tiempo, surgió el descubrimiento de la energía eléctrica gracias al estudio del electromagnetismo, y fue así que se hizo posible transformar la energía eléctrica en trabajo mecánico. Creando inventos como el motor de corriente continua, el generador eléctrico de corriente continua, alumbrado eléctrico, motor de corriente alterna, transporte, entre otros.

Posteriormente, a finales del siglo XIX se empezaron a extender las redes de distribución de energía eléctrica por todo el mundo, volviéndose de esa forma algo cotidiano, lo que en un principio se consideró un lujo y sinónimo de opulencia.

Observando la situación energética enteramente desde un enfoque económico, la energía siempre ha sido un factor fundamental contemplado para el cálculo del crecimiento económico, en México más recientemente es considerada como una de las variantes indispensables, como por ejemplo al estudiar el caso análisis del Producto Interno Bruto real (PIB) en términos per cápita (PIBPC), de la productividad media del trabajo (PIB/L), la del capital (PIB/K) y de la energía (PIB/energía) (Dieck Assad & Peralta Solorio, 2014).

Al ir analizando y repasando el historial energético y el impacto económico que ésta genera en México, se puede apreciar como el producto medio de energía muestra un



leve descenso entre los años 1993 y 2013, lo que viene significando que su uso estaría haciéndose eficiente dada la tendencia creciente de los precios de la energía (Barquín, 2004). Es decir, dado que la energía eléctrica es requerida básicamente en todo, el hecho de que pueda obtenerse una ganancia a pesar de todo el consumo que se tiene, demuestra su eficiencia y rentabilidad en la producción.

Es precisamente por eso, dado que la energía eléctrica se ha vuelto un recurso indispensable para la civilización actual, es que se han desarrollado distintas maneras de lograr la obtención de la energía eléctrica a través del aprovechamiento de los recursos con los que se cuenta, es decir empleando fuentes energéticas naturales. Surgiendo así las energías renovables, ya que los recursos abundan generalmente en el entorno.

Algunos ejemplos claros de éstas energías son la energía solar, que se aprovecha de la radiación solar, para producir por medio de reacciones químicas con el silicio energía eléctrica; la energía eólica, donde se aprovecha la energía cinética del aire en movimiento a través de turbinas eólicas; la energía geotérmica, que utiliza la energía térmica disponible en el interior de la tierra, extrayendo el calor en depósitos geotérmicos a través de pozos u otros medios; la energía oceánica, que aprovecha la energía térmica y el gradiente térmico que se generó para la producción de electricidad.

De la misma forma existe la biomasa, también conocida como bioenergía, es la energía producida por el aprovechamiento de la materia orgánica como la madera, el estiércol y otros abonos como combustibles para la generación energía eléctrica o calor, fuente de energía que fungirá como materia prima en la presente investigación.

Con esta energía se planea reemplazar el uso de algunos combustibles fósiles como el carbón mineral y el gas natural, pero concretamente con respecto al uso como fuente combustible y energética de los residuos producidos, tal como sucede en la industria agrícola, maderera y plantas de tratamiento de aguas.

Cuando la biomasa es quemada, el carbono reacciona con el oxígeno produciendo bióxido de carbono, agua y calor. Agua y bióxido de carbono en la atmósfera más energía solar y algunos compuestos inorgánicos, son absorbidos por las plantas verdes procesándolos, produciendo carbohidratos que posteriormente son convertidos en madera y tejido vegetal; En otras palabras; nueva biomasa es creada.

Esto implica que la combustión de biomasa posee una producción de CO<sub>2</sub> neutra. En los últimos años la contribución de la biomasa en la producción total de energía del mundo es cercana al 3% junto con la geotermia, según (OLADE, 2020) (SENER; PRODESEN, 2018).

<u>Conversion technique</u>	<u>Temperature range</u>	<u>Pressure</u>	<u>Main products</u>
Combustion	800 - 1200 °C	atm. - high	Heat, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O
Pyrolysis	400 - 800 °C	atm. - high	Char, oil, gas
Gasification	650 - 1100 °C	atm. - high	CO, H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub>
Hydrothermal Upgrading	250 - 600 °C	very high	Oil, char, gas, CO <sub>2</sub>
Aerobic fermentation	<< 100 °C	atm.	Ethanol, CO <sub>2</sub>
Anaerobic fermentation	< 100 °C	atm.	CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> O

*Ilustración 1.1 Técnicas de utilización de biomasa y sus respectivos rangos de temperaturas y composición de gas combustible producido (Estrada & Zapata Meneses, 2004)*

Existen varias técnicas para la utilización de la biomasa. En la ilustración 1.1 se presentan cada una de ellas con las respectivas temperaturas de reacción y los productos esperados al finalizar el proceso (Estrada et al. 2004).

Para el tratamiento de la biomasa existen diversos equipos según sea la técnica de conversión con la que se trabaje, para el caso de la fermentación, existen los biodigestores.

Por biodigestor se entiende como un depósito que permite la fermentación de la materia orgánica de manera anaerobia, es decir, los microorganismos digieren los desechos en ausencia de oxígeno, para lograr la producción de biogás. Se diseña según el tipo de material, sean residuos sólidos urbanos, contenido gástrico de ganado, etc. con el fin de obtener biogás y emplearlo según se desee, sea cocción, calefacción y electrificación.

Los biodigestores se clasifican en continuos y estacionarios o tipo Batch. Los continuos se cargan y descargan en forma periódica, por lo general todos los días; los estacionarios son cargados de una vez y se vacían por completo después del tiempo de retención prefijado. Con cualquier tipo de biodigestor, toda materia orgánica es apta para la fermentación.

El depósito de gas debe estar dimensionado de tal manera que pueda almacenar todo el gas que se produzca durante la fermentación (ITINTEC, 1983).

La digestión anaerobia es una de las soluciones para el tratamiento de residuos orgánicos que permite el aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía renovable. Se obtienen compuestos altamente energéticos que pueden ser utilizados para la obtención de energía calorífica o energía eléctrica (Kaiser et al. 2002). Desde la invención del primer biodigestor, se han ido creando y probando distintos modelos de plantas de biogás con el objetivo de aumentar la eficiencia y reducir los costos (Kaiser et al. 2002).

Un factor importante es el material de construcción de los biodigestores. Poggio et al. (2009) reportan que en 2007 fueron instalados 13 biodigestores tubulares

familiares (11 de polietileno y 2 de PVC), en la micro cuenca del Japón Mayo (Perú) y a finales del 2008 evaluaron el estado de dichos sistemas resultando que el 30% de los biodigestores de polietileno estaban en desuso, a consecuencia de ruptura en el plástico, por animales o envejecimiento.

Pedraza et al. (2002) mencionan que el tipo de material no afecta el comportamiento de los parámetros evaluados, la diferencia está en el costo del biodigestor. Se han utilizado diversos tipos de sustratos en la digestión anaerobia como residuos y subproductos de actividades agrícolas, forestales, industriales, estiércol de vacas, borregos, caballos, aves de corral, excrementos humanos, procesadora de carne e inclusive el jacinto de agua (Krishna et al. 1991).

La temperatura es un factor que influye en la generación de biogás: cuanto más caliente el ambiente, mayor es la velocidad y el grado de fermentación de la materia orgánica (Asankulova 2008).

Dentro de todo biodigestor existen tres fracciones por diferencia de densidad, la parte superior, es una costra formada por grandes partículas y en el tiempo puede llegar a ser sólida, evitando la fluidez del biogás; la parte media de la fermentación, donde el líquido se acumula y la parte inferior, donde se ubica la fracción de lodos precipitados; las bacterias son más activas en la zona media y por lo tanto las fracciones en el digestor deben ser periódicamente mezcladas (Asankulova, 2008).

Esta tecnología permite satisfacer diferentes necesidades, es una alternativa para obtención de energía eléctrica, tratamiento de los residuos pecuarios, evitando la contaminación de suelo y agua por la deposición inadecuada de las excretas; en el caso de cocción de alimentos, iluminación, calefacción y calentamiento de agua. En el caso del biol como fertilizante y regenerador de suelos. De la misma forma existen biodigestores de pequeña y gran escala.

Los gases combustibles con bajo poder calorífico (LCV) que se generan durante la gasificación de biomasa, se prevén como combustibles alternativos para diversas aplicaciones. Ésta presenta varias complicaciones para su utilización, como puede ser la necesidad de adecuación de un sistema eficiente de filtrado y una adaptación de los sistemas de combustión.

## **1.2 Planteamiento del problema**

La carencia de energía eléctrica, así como los incrementos en las tarifas por el consumo de esta, son una situación frecuente que suele darse tanto en zonas urbanas como rurales donde la red eléctrica no logra abarcar y en algunos casos resulta costoso el acceso a la misma red. Además de la búsqueda de propuestas para reducir el impacto ambiental ocasionado por el incremento de población, residuos y tarifas eléctricas, los cuales se ligan también al incremento del consumo de energía.

Las cuestiones anteriores propician que la sociedad se vea en la necesidad de optar por alternativas energéticas que puedan abastecer la demanda requerida para una calidad de vida decente, así como reducir la contaminación, tanto por el consumo de energía como por la generación de residuos. Motivado por los inconvenientes asociadas a la producción de energía, así como los conflictos por generación de basura y residuos humanos mencionados anteriormente, la presente investigación se enfoca en valorar un sistema de energía para alimentar una carga cuantificada que hace alusión a la demanda de una vivienda, así como el aprovechamiento del biogás que se puede producir por medio de un sistema de biodigestión anaerobia conjuntamente al combustible convencional.

El tratamiento de residuos orgánicos permite el aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía renovable, con lo cual se obtienen compuestos altamente

energéticos que pueden ser utilizados para la obtención de energía calorífica o energía eléctrica Kaiser et al. (2002), Poggio et al. (2009), Pedraza et al. (2002), Asankulova (2008).

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General:**

Dimensionar un sistema de energía híbrido mediante biogás en combinación de combustible fósil para producción de energía eléctrica.

### **1.3.2 Objetivos Específicos:**

- Examinar los diferentes residuos orgánicos para aprovechamiento energético.
- Examinar tecnologías de sinterización de biomasa.
- Seleccionar el equipo para aprovechamiento de biomasa y generación de biogás.
- Analizar y evaluar el consumo de electricidad para el caso de estudio.
- Dimensionar y acoplar el caso de estudio con el sistema de aprovechamiento de biomasa y generador convencional.

## **1.4 Justificación**

El desarrollo y uso de energía está cambiando constantemente, sin embargo, en los últimos años se considera principal el uso de energía en forma de calor mayormente para la cocción de alimentos y electricidad para diferentes aplicaciones, sean éstos lo más esenciales como iluminación, electrodomésticos, equipos de cómputo y comunicación.

Puesto que dichos servicios son esenciales, prácticamente básicos e imprescindibles en la actualidad, en zonas urbanas son de fácil adquisición y acceso. El problema recae que, en zonas rurales, donde por uno u otro motivo, principalmente que la red eléctrica no llega hasta dichas zonas y por lo tanto se opta por alternativas para la generación de energía, como suele ser la energía fotovoltaica, eólica, mareomotriz, etc.

Sin embargo, la energía térmica no suele ser tomada en cuenta, y éste es un caso es idóneo donde puede implementarse para su correcta aplicación.

## **1.5 Alcance y aportaciones**

El presente trabajo se limita a los dimensionamientos de sistemas de energía renovable por biodigestores, para el reuso de los residuos orgánicos que son generados en zonas rurales para la obtención y utilización de la energía eléctrica limpia para un estimado número de viviendas carentes promoviendo la implementación de plantas de biogás.

Así mismo, se consideran diferentes alternativas de plantas de generación de emergencia para suplir la carga, además de obtener en porcentajes la sustitución de combustible fósil y la potencia que es posible aprovechar, considerando el volumen disponible en la planta y el poder calorífico del biogas y de la gasolina, respectivamente.

## **1.6 Descripción del contenido**

En lo que resta del trabajo de tesis presente se ve constituido de la siguiente manera, en el capítulo 2, se describen los diversos tipos de biodigestores posibles, al igual que los procesos de tratamiento de la materia orgánica, la clasificación y composición química de ésta, para el dimensionamiento del sistema de biodigestión, así como la cantidad de biogas que es posible generar a través de este tipo de equipos.

En el capítulo 3 se estudian las posibles cargas eléctricas, para en función de estas seleccionar la planta de generación pertinente y el procedimiento de sustitución y mezcla del combustible fósil convencional con el biogas producido naturalmente.

De la misma forma, el resumen de los resultados y análisis de los mismos se describen en el capítulo 4, así como la comparación energética al variando en los porcentajes de biogas en la sustitución de combustibles y por último las conclusiones del trabajo y su utilidad para investigaciones e implementaciones futuras, se ven descritas en el capítulo 5.



## **Capítulo 2. Biodigestores y diseño metodológico**

Para poder realizar el cálculo y estudio del dimensionamiento del biodigestor se requiere conocer la caracterización del excremento de animales de granja en cuanto a su composición, cantidad, presión atmosféricas y temperaturas. Seleccionar el biodigestor apropiado de acuerdo con las características de la biomasa y las necesidades del lugar.

### **2.1 Dimensionamiento del biodigestor**

Las granjas producen un elevado volumen de residuos húmedos en forma de estiércol de animales. La forma común de tratar estos residuos es esparciéndolos en los campos de cultivos, con el doble interés de disponer de ellos y obtener beneficios de su valor nutritivo. Sin embargo, cuando existen cantidades elevadas de estiércol esta práctica puede provocar una sobre fertilización de los suelos y la contaminación de las cuencas hidrográficas.

La materia prima para la producción de biogás es estiércol fresco. Se pueden considerar otros tipos de residuos orgánicos, pero en ningún caso residuos duros (con cascara dura) o de larga duración de descomposición (como vísceras).

El estiércol que mayor cantidad de biogás produce es el de cerdo y de humano, pero el fertilizante que produce es muy ácido en el caso del humano hay que tener otras consideraciones. El estiércol más equilibrado es el de la vaca, además, por animal que produce una gran cantidad de estiércol, algunos ejemplos que se consideraron relevantes en esta investigación se muestran en la tabla 2.1 (Herrero, 2008).

Tabla 2.1 Producción de Estiércol (Herrero, 2008)

Especie	Peso vivo (Kg)	Estiércol (Kg/día)	%CH <sub>4</sub>
Cerdos	50	4.5-6	65-70
Vacunos	400-500	25-40	65
Ovinos	45	0.06	63
Aves	1.5-2	1.5	60

Para la digestión anaerobia, que es el proceso que se lleva a cabo para obtención del biogás (como principal producto del proceso de digestión anaerobia), se suelen considerar tres etapas para residuos sólidos o lodos (hidrólisis, acidogénesis, metanogénesis) y dos para residuos líquidos (acidogénesis y metanogénesis); cabe mencionar que la metanogénesis se encuentra presente tanto en residuos sólidos como en líquidos.

Por lo tanto, las cuatro etapas previamente mencionadas, se describen a continuación.

#### ▪ **Hidrólisis**

La hidrólisis es la descomposición biológica de polímeros orgánicos en moléculas más pequeñas (monómeros y dímeros) que son capaces de atravesar la membrana celular, este proceso se lleva a cabo por medio de enzimas denominadas hidrolasas, que son capaces de solubilizar la materia orgánica y romper enlaces específicos con ayuda de agua para poder ser utilizadas.

#### ▪ **Acidogénesis**

La segunda etapa, controlada por bacterias, consiste en la transformación de los compuestos formados en la primera etapa en otros compuestos de peso molecular intermedio, la población acidogénica es la más grande, consiste en cerca del 90 % de la población total de un digestor.

## ▪ Acetogénesis

Esta es una fase en la cual se aceleran los procesos metabólicos bacterianos, con transformación enzimática o hidrólisis, de lípidos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos, en otros compuestos que serán utilizados como fuentes de energía y como transformación a carbono celular.

## ▪ Metanogénesis

La metanogénesis es la etapa final de la digestión anaerobia. La formación de metano se da a partir de dos rutas principales, la primera, es la acetoclástica en la cual los microorganismos crecen principalmente en su sustrato (acetato) y la segunda, es la hidrogenotrófica en donde los microorganismos crecen en sustratos como hidrógeno ( $H_2$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Dando, así como producto final el metano ( $CH_4$ ).

De la misma forma, es importante enfatizar que, el biogás generado estará formado por una mezcla de gases como se muestra en la tabla 2.2, su composición dependerá del tipo de residuo orgánico que se emplee para su producción.

Tabla 2.2 Composición del biogás (Grima-Ramirez, 2013)

Componentes	Formula química	Porcentajes (%)
Metano	$CH_4$	60-70
Gas carbónico	$CO_2$	30-40
Hidrogeno	$H_2$	1
Nitrógeno	N	0.5
Monóxido de carbono	CO	0.1
Oxigeno	$O_2$	0.1
Ácido Sulfhídrico	$H_2S$	0.1

Ya que el biogás está formado por varios gases que posteriormente se ven removidos para conseguir un resultado en particular.

- Aumentar el poder calorífico del biogás (Purificándolo y filtrándolo el dióxido de carbono).
- Poder usarlo en motores, calderas, celdas de combustibles, vehículos, etc. (Filtrando el ácido sulfhídrico).

La comparación en cantidad de biogas con otros combustibles de acuerdo con su poder calorífico se presenta en la tabla 2.3.

*Tabla 2.3 Equivalencias del biogás (Grima-Ramirez, 2013)*

<b>1m<sup>3</sup> de biogás equivale a</b>	
Carbón vegetal	0.8 kg
Leña	1.5 kg
Diésel	0.55 kg
Gasolina	0.61 kg
GLP	0.45 kg

Por otra parte, los procesos anaeróbicos dependen esencialmente de la temperatura de la velocidad de crecimiento; siendo la temperatura uno de los factores esenciales que afectan el crecimiento de bacterias responsables de la producción de biogás, tal y como se muestra en la tabla 2.4 (Grima-Ramirez, 2013).

Tabla 2.4 Rango de temperatura y tiempo de fermentación anaerobia (Grima-Ramirez, 2013)

Fermentación	Mínimo	Optimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psicrophilica	4-10°C	15-18°C	20-25°C	Sobre 100 días
Mesophilica	15-20°C	20-35°C	35-45°C	30-60 días
Thermophilica	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

## Clasificación y variantes de biodigestores

La clasificación de los biodigestores varía dependiendo de su complejidad y la cantidad de carga que se le vaya a administrar.

### ▪ Continuos

Cuando la alimentación del digestor es un proceso interrumpido, el efluente que descarga es igual al efluente o materia que carga, con producción de biogás, uniformes en el tiempo.

### ▪ Semicontinuos

Cuando la primera carga que se introduce al digestor consta de una gran cantidad de materias primas, posteriormente se agregan volúmenes de nuevas cargas de materias primas (efluentes), calculados en función del tiempo de retención hidráulica (THR) y del volumen total del digestor.

### ▪ Discontinuos

Los digestores se cargan con materias primas en una sola carga o lote.

En cuanto a los tipos de biodigestor dependerá del lugar donde se instala, la complejidad de su construcción y la cantidad de biogás que puede producir. Por ende, se tienen diferentes tipos como:

- **Biodigestor de campana flotante**

Se coloca habitualmente sobre el nivel del suelo, adaptándose a cualquier situación climática y puede construirse en cualquier condición de topografía del suelo, como se muestra en la ilustración 2.1. Las propiedades, así como ventajas y desventajas de este biodigestor se ven descritas en la tabla 2.5

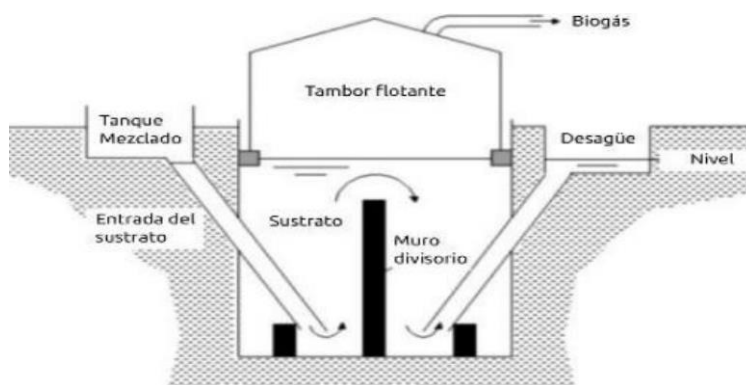


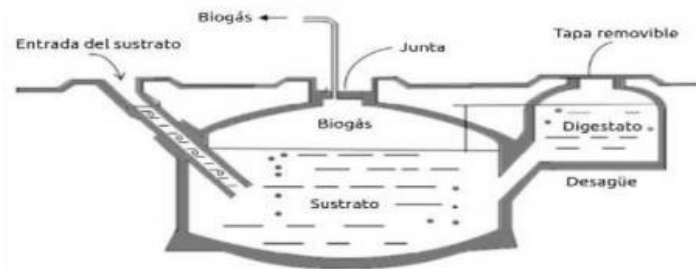
Ilustración 2.1 Biodigestor de campana flotante (modelo hindú) (Acosta & Muñoz Santana, 2020)

Tabla 2.5 Características generales biodigestor de campana flotante (Acosta & Muñoz Santana, 2020)

Material	Aplicación	Ventaja	Desventaja
Domo de acero con fibra de vidrio, estructura de ladrillo, greda.	Para desechos animales, aguas negras.	Presión constante de salida del biogás. Acepta alimentación semiconstante.	Mayor dificultad y costo de instalación. Mano de obra en relación a un sistema de estructura flexible.

- **Biodigestor de copula fija**

Los digestores de este tipo son tanques cilíndricos con el techo y piso en forma de domo y se construyen totalmente herméticos. Al iniciar el proceso, el digestor se llena con residuos agrícolas procedentes de compostas mezclados con lodos activados de otro digestor, a través de la cubierta superior que es removible. Para más detalle de esta variante véase la ilustración 2.2 y la tabla 2.6.



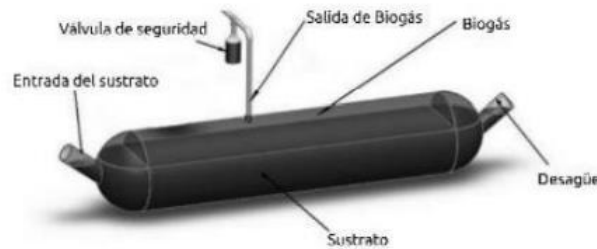
*Ilustración 2.2 Biodigestor de copula fija (modelo chino) (Acosta & Muñoz Santana, 2020)*

*Tabla 2.6 Características generales biodigestor de copula fija (Acosta & Muñoz Santana, 2020)*

Material	Aplicación	Ventaja	Desventaja
Ladrillo, mortero, cemento, greda, fibra de vidrio, metal.	Desechos de animales, aguas negras, desechos vegetales.	Larga vida útil (20 años aprox.), alta presión del biogás 1 a 1.5 m columna de agua. Acepta alimentación semiconstante.	Altos costos de instalación en relación a sistemas de estructura flexible, se requiere estructura resistente para altas presiones del biogás.

- **Biodigestor de tipo tubular o de salchicha**

El biodigestor tubular se caracteriza por ser de muy bajo costo y operación simplificada, y, en comparación con los modelos de domo fijo y tambor flotante, su costo es aproximadamente la mitad del precio de ellos. Es ideal para comunidades rurales alejadas que desean instalar un biodigestor para cubrir sus necesidades. Presentado posteriormente en la ilustración 2.3 y tabla 2.7, respectivamente.



*Ilustración 2.3 Biodigestor tipo tubular (Acosta & Muñoz Santana, 2020)*

*Tabla 2.7 Características generales biodigestor tubular (Acosta & Muñoz Santana, 2020)*

Material	Aplicación	Ventaja	Desventaja
PVC, polietileno (mangas d3 0.1 mm), HDPE, EPDM (geomembranas).	Todo tipo de desechos humanos.	Según material mediana y larga vida útil. Bajos costos de instalación en relación a sistemas de estructura rígida. 100% hermético. Acepta alimentación semiconstante.	Requiere mayor protección para evitar roturas.



- **Biodigestor familiar**

Este tipo de biodigestores familiar o de bajo costo, son sistemas eficientes para el tratamiento de desechos de animales de granja, el cual reemplaza las fosas sépticas tradicionales, eliminando costos de mantenimiento, como el de la ilustración 2.4. De los diferentes tipos de biodigestores existentes se seleccionó el biodigestor familiar elaborado con tanque plástico PVC debido a que son tanques de polietileno 100% virgen y su durabilidad excede los 10 años, además de su cómoda construcción e implementación son de fácil adquisición, para más detalles se agrega la tabla 2.8.

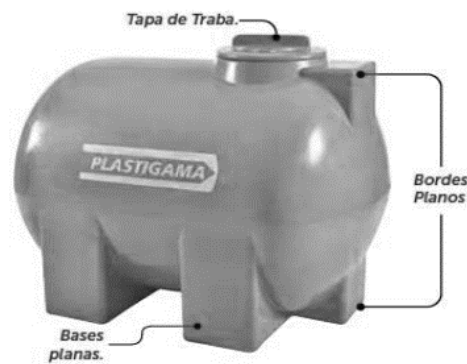


Ilustración 2.4 Biodigestor familiar o de bajo costo (Acosta & Muñoz Santana, 2020)

Tabla 2.8 Características generales biodigestor familiar (Acosta & Muñoz Santana, 2020)

Material	Aplicación	Ventaja	Desventaja
PVC, polietileno 100% virgen.	Eficiente para tratamiento de desechos residuales.	Bajos costos de instalación en relación a sistemas de estructura rígida.	Por su composición plástica no soporta mucha presión

## **2.2 Método de dimensionamiento del biodigestor**

Para obtener el cálculo de un biodigestor capaz de abastecer a 10 familias, se requiere hacer un escalado, de una familia; por lo tanto, se empleará el biodigestor familiar, puesto que es el más práctico en casos como éstos, donde es más accesible para una zona rural además de económico, siendo una inversión redituable.

Por lo tanto, se consideran los siguientes análisis:

- Cálculo del volumen del biodigestor
- Cálculo del dimensionamiento
- Cálculo de producción de biogás

### **Cálculo del volumen del biodigestor**

Para este cálculo se consideran los siguientes parámetros:

- Sólidos volátiles (Kg/día)
- Sólidos totales (Kg/día)
- Cantidad de biomasa disponible (Kg/día)
- Volumen de biodigestor (m<sup>3</sup>)
- Tiempo de retención (días)
- Cantidad de agua para la mezcla (Kg/día)
- Carga diaria de biomasa (Kg/L)

## Potencial de producción de gas metano (PCH4)

Es el volumen de metano producido, medido en metros cúbicos (m<sup>3</sup>) por masa, medida en kilogramos (kg) de sólidos volátiles (SV) en (m<sup>3</sup>. CH<sub>4</sub>/Kg SV), según sea el tipo de desecho orgánico que se muestra en la tabla 2.9.

Tabla 2.9 Potencial de producción de gas metano PCH4 (Huerga, 2014)

Residuos Orgánicos	PCH <sub>4</sub> [m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg SV]
Vaca	0.2
Res	0.35
Desecho municipal	0.2
Cerdos	0.45
Gallinas	0.39
Aguas negras	0.406

Igualmente, algunas propiedades de la materia orgánica, estiércol, mas comunes pueden verse en la tabla 2.10.

Tabla 2.10 Características de la materia orgánica utilizada en la biodigestión (Huerga, 2014)

No.	Fuente	W <sub>A</sub>	T	ST	SV	N <sub>P</sub>	P <sub>P</sub>	K <sub>P</sub>	ST/T	SV/ST
1	Vaca	500	86	12	10	0.45	0.094	0.29	14%	83%
2	Toro	500	58	8.5	7.2	0.34	0.092	0.21	15%	85%
3	Becerro	40	62	5.2	2.3	0.27	0.066	0.28	8%	44%
4	Cerdo	70	84	11	8.5	0.52	0.18	0.29	13%	77%
5	Oveja	60	40	11	9.2	0.42	0.087	0.32	28%	84%
6	Chivo	50	41	13	-	0.45	0.11	0.31	32%	0
7	Caballo	400	51	15	10	0.3	0.071	0.25	29%	67%
8	Gallina	2.2	85	22	17	0.84	0.3	0.3	26%	77%
9	Roedor	2	64	16	12	1.1	0.3	0.4	25%	75%
10	Pavo	8	47	12	9.1	0.62	0.23	0.24	26%	76%
11	Pato	3	110	31	19	1.5	0.54	0.71	28%	61%

Donde:

$W_A$ = Peso promedio del animal en kg.

$T$ = Cantidad total de residuo (estiércol) promedio; kg por cada 1000 kg de peso del animal.

$ST$ = Contenido promedio de sólidos totales; kg por cada 1000kg de peso del animal.

$SV$ = Contenido promedio de sólidos volátiles; kg por cada 1000kg de peso del animal.

$N_p$ = Contenido promedio de nitrógeno en gramos por kg de sustancia.

$P_p$ = Contenido promedio de fósforo en gramos por kg de sustancia.

$K_p$ = Contenido promedio de potasio en gramos por kg de sustancia.

$ST/T$ = Porcentaje de  $ST$  sobre el total de estiércol.

$SV/ST$ = Porcentaje de sólidos volátiles sobre sólidos totales.

## **Caracterización y cuantificación del estiércol**

De acuerdo con los diferentes tipos de animales que se puede tener en el sector rural, existen diversos recursos de biomasa para ser utilizado en los biodigestores, se describen en la tabla 2.11.

Especialmente se utiliza el vacuno, por ser poligástricos es decir que éste posee cuatro estómagos que aportan una gran cantidad de bacterias metanogénicas, siendo un material muy apropiado para la digestión anaerobia.

Tabla 2.11 Valores y características del estiércol por animal (Acosta & Muñoz Santana, 2020)

Animales	% por peso vivo		% del material de digestión		P - Producción de biogás (m <sup>3</sup> de gas/ 1 kg So)
	PE - Estiércol	PO - Orina	% EST Solidos	% SO Sol. Orgánicos	
Vacunos	5	4	15 - 16	13	0.250
Cerdos	2	3	16	12	0.350
Caprinos	3	1.5	30	20	0.200
Caballos	5	4	25	15	0.250
Avícolas	4.5	4.5	25	17	0.400
Humanos	1	2	20	15	0.300

### Calculo cantidad de estiércol

$$E = N_A \cdot PVP \cdot \frac{PE}{100} \quad \text{Ec. (2.1)}$$

Donde:

E= Producción de estiércol (kg/día).

N<sub>A</sub>= Numero de animales por especie.

PVP= Peso promedio por animal.

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

### Calculo cantidad de orín

$$O = N_A \cdot PVP \cdot \frac{PO}{100} \quad \text{Ec. (2.2)}$$

Donde:

O= Producción de orín por día (kg).

N<sub>A</sub>= Numero de animales por especie.

**PVP**= Peso promedio por animal.

**Po**= Producción de orín por animal por día en % de peso vivo.

## 2.3 Materia prima para la carga

$$MPC = E + O \quad \text{Ec. (2.3)}$$

Donde:

**MPC** = Materia prima para carga (kg/día).

**E**= Producción de estiércol (kg/día).

**O**= Orín día; kilogramos.

## Tiempo de retención

Indica el tiempo conveniente que debe dejarse el material dentro del biodigestor, según la tabla 2.12, para que en las condiciones ambientales del lugar pueda degradarse.

$$TR = (-51.227 \times \ln(T^{\circ}C) + 206.72) \quad \text{Ec. (2.4)}$$

Donde:

**TRH**= Tiempo de retención Hidráulico; días.23

**Ln**= Logaritmo natural.

**T°C**= Temperatura promedio en grados centígrados del sitio donde se instalará el biodigestor.

Tabla 2.12 Tiempo de retención según temperatura (Acosta & Muñoz Santana, 2020)

Región característica	Temperatura (°C)	Tiempo de retención (días)	Temperatura de trabajo (°C)
Trópico	30	20	25 - 30
Valle	20	32	15 - 20
Altiplano	10	60	6 - 12 (con invernadero)

## Nivel de pH y alcalinidad

Los microorganismos metano génicos son mucho más sensibles a las variaciones de pH que los otros organismos de la comunidad microbiana anaeróbica. El pH óptimo de trabajo del biodigestor se encuentra en el rango entre 6.8 y 7.4, siendo el pH neutro 7 el ideal. Para que el proceso de biodigestión se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6 ni subir de 8. (Acosta & Muñoz Santana, 2020)

## 2.4 Relación carbono nitrógeno (C/N)

Toda materia orgánica es capaz de producir biogás al fermentarse de manera anaeróbica, la calidad del mismo dependerá de la composición final que se use en la cámara de biodigestión. Se considera una relación óptima de carbono nitrógeno, esta sea fresca o seca cuando se encuentre en un rango de 30:1 hasta 20:1. Como se describe en la ecuación 2.5 y tabla 2.13, según sea el tipo de estiércol.

$$K = \frac{C1 * Q1 + C2 * Q2 + \dots Cn * Qn}{N1 * Q1 + N2 * Q2 + \dots Nn * Qn} \quad \text{Ec. (2.5)}$$

Donde:

**K**= C/N de la mezcla de materias primas.

**C**= % de carbono orgánico contenido en cada materia prima.

**N**= % de nitrógeno orgánico contenido en cada materia prima.

**Q**= Peso fresco o seco de cada materia expresada en kg o Ton.

Tabla 2.13 Relación Carbono/Nitrógeno (Acosta & Muñoz Santana, 2020)

Estiércol	C/N
Bovino (500 kg)	25:1
Porcino (50 kg)	13:1
Aves (2 kg)	19:1
Conejo (3 kg)	13:1
Papas	20:1
Tomate	12:1

## Sólidos

Corresponde a la materia orgánica seca, sin humedad. Valores promedio de ST de algunos sustratos se muestran en la tabla 2.10.

$$ST' = W_A \cdot \frac{ST}{1000 \text{ Kg de ave}} \quad \text{Ec. (2.6)}$$

Donde:

**ST'**= Sólidos totales (kg/día).

**W<sub>A</sub>**= Peso promedio del animal (kg).

**ST**= Cantidad total de residuo (estiércol) promedio en kg. por cada 1000 kg de peso del animal.



## Sólidos volátiles

Es la parte del total de sólidos que se puede transformar en biogás.

$$SV' = W_A \cdot \frac{SV}{1000 \text{ Kg de ave}} \quad \text{Ec. (2.7)}$$

Donde:

$SV'$  = Sólidos volátiles (kg/día).

$W_A$  = Peso promedio del animal (kg).

$SV$  = Cantidad total de residuo (estiércol) promedio; kg. por cada 1000 kg de peso del animal.

## Descomposición de sólidos volátiles

$$K_o = 0.6 + 0.0006 \cdot e^{(0.1185 \cdot SV)} \quad \text{Ec. (2.8)}$$

Donde:

$K_o$  = Descomposición de los sólidos volátiles en el tiempo (adimensional).

$SV$  = Sólidos volátiles (kg/día).

## 2.5 Crecimiento de metano (CH<sub>4</sub>)

$$U_o = 0.013 \cdot T^{\circ}C - 0.129 \quad \text{Ec. (2.9)}$$

Donde:

$U_o$  = Crecimiento de producción de metano (m<sup>3</sup>/día).

$T^{\circ}C$  = Temperatura (Celsius)

## Volumen de metano ( $V_{CH_4}$ )

Es el volumen de metano producido por masa de sólidos volátiles en [ $m^3 CH_4/kg SV$ ]. El volumen de metano que se obtiene de un biodigestor alimentado con una masa orgánica para ciertas condiciones de tiempo de retención  $RT$  y temperatura  $TC$ .

$$V_{CH_4} = P_{CH_4} \cdot SV \cdot \left(1 - \frac{K_o}{U_o \cdot TR - 1 + K_o}\right) \quad Ec. (2.10)$$

Donde:

$V_{CH_4}$ = Volumen de metano; ( $m^3 CH_4/día$ ).

$P_{CH_4}$ = Potencial de producción de gas metano ( $P_{CH_4}$ ) de algunos residuos.

$SV$ = Sólidos Volátiles ( $kg/día$ ).

$K_o$ = Descomposición de los sólidos volátiles en el tiempo (adimensional).

$U_o$ = Crecimiento de producción de metano con el cambio de temperatura (días).

$TR$ = Tiempo de Retención (días).

## Volumen de $CO_2$

Basándose en la condición de que el biogás está formado por 60% de  $CH_4$  y 40%  $CO_2$ , se tiene:

$$Vol. CO_2 = \left(\frac{V_{CH_4} \cdot 0.4}{0.6}\right) \quad Ec. (2.11)$$

Donde:

$Vol. CO_2$ = Volumen de dióxido de carbono; ( $m^3 .CH_4/día$ ).

$V_{CH_4}$ = Volumen de metano.

## Volumen biogás

Es el valor máximo de almacenamiento de biogás que puede contener este reservorio y su capacidad dependerá de las necesidades particulares y está en función del consumo diario, es decir del uso particular del biogás generado.

$$V_{BG} = CH_4 + CO_2 \quad \text{Ec. (2.12)}$$

Donde:

$V_{BG}$ = Volumen Biogás ( $m^3$  biogás/día).

$CH_4$ = Volumen de metano.

$CO_2$ = Dióxido de carbono.

## Factores de dilución

Es el espacio ocupado por la biomasa en digestión, representa el volumen efectivamente útil para efectuar la biodigestión anaeróbica, la cual de acuerdo al tipo de animal varía la relación estiércol-agua, descrito en la tabla 2.14, así como su capacidad está determinada por el consumo de biogás necesaria para satisfacer las diferentes necesidades energéticas.

*Tabla 2.14 Relación mezcla estiércol-agua (Acosta & Muñoz Santana, 2020)*

Tipo de animal	Relación estiércol-agua
Bovino	1:1
Porcino	1:3
Aves	1:3

## 2.6 Volumen biodigestor

$$V_{BD} = ST \cdot TR \cdot Fd \quad \text{Ec. (2.13)}$$

Donde:

$V_{BD}$ = Volumen Biodigestor (litros).

$ST$ = Cantidad de estiércol que ingresa al digestor (kg/día).

$TR$ = Tiempo de retención (días).

$Fd$ = Factor de dilución del residuo; 2:1 -> 1 litro de agua + 2 de residuo.

Para el cálculo de volumen de biodigestor vertical de plástico, tipo tanque se debe calcular en función al volumen total en litros del tanque que va a ser utilizado.

## Aprovechamiento del biogas

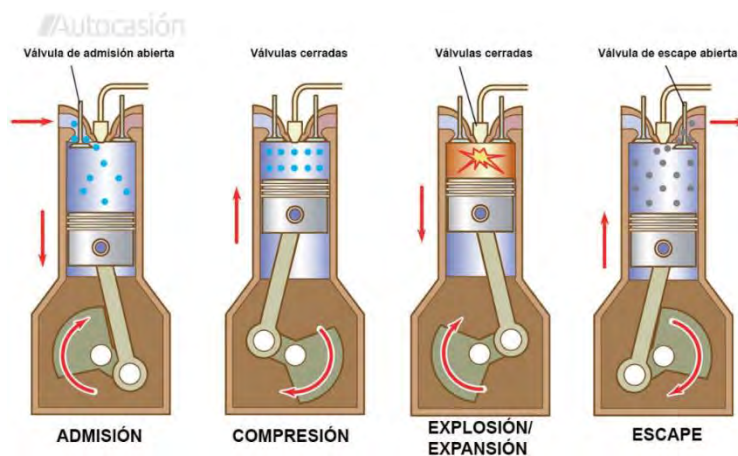
Como se comentó anteriormente el biogas puede ser utilizado tanto para el aprovechamiento de calor al quemarse, como para ingresarlo a un motor generador para que la combustión del mismo, se transforme en energía mecánica y esta a su vez, en eléctrica para su aprovechamiento final como suele hacerse en la vida cotidiana.

El proceso de conversión de energía química del biogas a energía mecánica es posible mediante un motor de combustion interna, encendido por chispa, también conocido como el Ciclo de Otto, en honor a Nikolaus A. Otto, que lo estudió en Alemania alrededor del año 1876. (Çengel & Boles, 2012)

El ciclo Otto se considera de cuatro tiempos, el cual está conformado por seis procesos. Donde dos de ellos no participan como tal en el ciclo termodinámico del

fluido de operación. Sin embargo, son principales para reiniciar la operación del mismo.

Los 4 tiempos que constan el ciclo Otto son la admisión, compresión, explosión o expansión y escape, como se muestra en la ilustración 2.5.



*Ilustración 2.5 Etapas del Ciclo de Otto (Autocasión, 2022)*

Estos procesos corresponden a la admisión, donde normalmente es la mezcla de gasolina con aire, pero en este trabajo se considera también el ingreso del biogas al sistema de operación, abriéndose así la entrada en el cilindro para la mezcla. Al finalizar esta primera etapa, la válvula de admisión se cierra y el pistón se mueve al punto muerto inferior (PMI).

La compresión, donde la mezcla se ve comprimida sin efectuarse el intercambio de calor con el exterior, por lo que, la transformación es isentrópica. De la misma forma, el pistón alcanza al punto muerto superior (PMS).

La explosión o expansión, la mezcla se encuentra totalmente comprimida y las válvulas están cerradas, produciéndose en la bujía una chispa, provocando que la mezcla arda. Esta explosión generada por la combustión es lo que empuja al pistón hacia la parte de abajo. Esta es la fase efectiva de todo el ciclo y es la que define la

potencia de un motor. Durante este proceso, la energía química liberada durante la combustión se transforma en energía mecánica.

Y finalmente, el escape, donde al volver el pistón al PMI, la válvula de escape se abre para que el pistón ascienda y liberando fuera del cilindro los gases que resultan de la explosión.

Esto permite que haya nuevamente aire limpio para comenzar el ciclo en la fase de admisión.

# Capítulo 3. Dimensionamiento de carga y generador

## 3.1 Análisis de carga eléctrica

Se propone un caso de estudio del consumo eléctrico de una residencia doméstica promedio de clase media. Esto es debido a que también debe notarse que esto es con la finalidad de abarcar un porcentaje significativo de familias; ya que es bien sabido que no todas las familias tienen el mismo nivel socioeconómico y, por lo tanto, tampoco los mismos gastos y recursos. Un ejemplo del consumo en una vivienda urbana familiar promedio se presenta a continuación, donde se logra apreciar que cuenta con una demanda energética medianamente alta.



Ilustración 3. 1 Historial de consumo eléctrico domestico en Chetumal, Q. Roo (Propio)

Donde al promediar su historial energético cuenta con una demanda de 20.30 kW diarios, únicamente para una vivienda.

En cambio, al verse comparada con una vivienda rural promedio, su consumo doméstico será menor, un posible ejemplo de las cargas que normalmente se tienen es mostrado en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Cuadro de cargas promedio domestico (Propio)

Consumo promedio doméstico					
Descripción	Número	P(W)	Horas / día	Días de uso / semana	Energía (Wh/semana)
Cargador de móvil	2	10	3	7	420
Bomba	1	500	1	4	2000
Refrigerador	1	300	16	7	33600
Microondas	1	1300	2	4	10400
Televisor LED 32"	2	90	7	7	8820
Ventilador de techo	3	60	13	8	18720
Computadora	1	300	6	7	12600
Focos led	12	13	7	7	7644
Lavadora	1	2200	2	2	8800
Cafetera	1	700	1	7	4900
Total					107,904

Para el presente estudio se estimó un valor aproximado al consumo rural de 133.32 kWh bimestral. De tal modo, se procede a dividirlo entre dos meses, es decir 60 días, para obtener el consumo diario, siendo éste de 2.2 kWh.

Para un adecuado análisis de este caso de estudio, se plantean ciertas consideraciones a tomar en cuenta.



Estimando principalmente el horario de mayor consumo, estableciendo así poco más o menos de 8 horas diarias.

Puesto que usualmente las horas donde más energía se consume es durante el día, suponiendo que todos los miembros de la familia estén en casa. Además de considerar los aparatos eléctricos que más suelen emplearse con frecuencia.

De esta forma, al contar con un consumo diario de 2.2 kWh, durante 8 horas de trabajo, se obtiene que el consumo instantáneo por una única vivienda vendría siendo de 0.275 kW.

Por ende, una vez ya habiendo tomado en cuenta las consideraciones previamente dichas con respecto al tiempo de consumo diario se procede a seleccionar un generador eléctrico capaz de abastecer la demanda energética.

Como se maneja una alta potencia eléctrica, se plantea realizar una escala donde 5 viviendas puedan verse beneficiadas.

Ahora bien, para poder solventar la demanda energética de un máximo de 20 viviendas se proponen algunos casos donde emplea una diferente opción de generador eléctrico, que éstos normalmente son de emergencia.

### **3.2 Selección del equipo**

Como se mencionó anteriormente para alcanzar a suplir la demanda energética del caso de estudio debe seleccionarse el sistema de generación. Puesto que en el mercado existe una amplia variedad de opciones de equipos generadores capaz de brindar electricidad aun en lugares remotos, se presentan 4 posibles opciones a considerar, para que al examinarlas a detalle se pueda elegir el equipo adecuado para llevarse a cabo esta labor de abastecimiento eléctrico.

## ❖ PROPUESTA 1

Se selecciona una planta de generación comercial de 10000 Watts Yamaha Technology Trigen-Coleman, como se muestra en la ilustración 3.2.



*Ilustración 3.2 Generador Yamaha de 10kW máximo (Mercado Libre, 2022)*

Este cuenta con un consumo por hora de 1.6 L, un método de arranque eléctrico-manual, una autonomía de 13 horas, un tanque de 25 litros, un motor de 16 HP, con potencia máxima de 10000 W, una potencia nominal de 8000 W (capaz de abastecer 29 vivienda de 275 W c/u), corriente de 60 A, voltaje de 120/240 V, un peso de 90 Kg. Además, éste generador cuenta con una alimentación híbrida, es decir, gasolina y propano.

Sin embargo, la tecnología híbrida en estos sistemas, es capaz de utilizar únicamente un tipo de combustible mientras se encuentra en operación, lo cual hace la principal distinción en el análisis actual, en el que se plantea emplear la mezcla de los combustibles simultáneamente.

## ❖ PROPUESTA 2

Para esta propuesta se selecciona una planta de generador de menor capacidad, siendo un generador eléctrico PRETUL GEN-70P 8000W BIFÁSICO, como se muestra en la ilustración 3.3.



*Ilustración 3.3 Generador PRETUL de 8kW (Mercado Libre, 2022)*

Este generador es de método de arranque manual, alimentación a gasolina, con una autonomía de batería de 5.5 horas, un tanque con 25 litros de capacidad, un motor de 4 tiempos, un voltaje de corriente 120/240 V y una potencia nominal de 7000 W (capaz de abastecer 25 viviendas de 275 W c/u) y una máxima de 8000 W además de un peso de 70 Kg.

### ❖ PROPUESTA 3

En esta propuesta se selecciona un generador HYUNDAI HYE6000 de 6 kW con un motor de 13 HP 110 V/ 220V, representado en la ilustración 3.4.



*Ilustración 3.4 Generador HYUNDAI de 6kW (Raiker, 2022)*

Este generador profesional con motor a gasolina de 4 tiempos de la marca HYUNDAI de 13 HP y arranque manual/eléctrico, está equipado con sensor de bajo nivel de aceite, además de incluir batería, ideal para intemperie o situaciones de emergencia.

Cuenta con una capacidad de tanque de combustible de 25 litros, una autonomía de 5 horas, un embobinado de aislamiento de clase F, una frecuencia nominal de 60 Hz, un motor a 4 tiempos y 3600 rpm, un peso total de 82 Kg, una potencia máxima de 6000W y una nominal de 5500 W (capaz de abastecer 20 viviendas de 275 W c/u), salidas en corriente directa de 12 V/ 8.3 A y un voltaje de 110/220 V.

#### ❖ PROPUESTA 4

En esta propuesta se selecciona un generador pequeño HYUNDAI HHY3000 3000 W BIFÁSICO, presentado en la ilustración 3.5.



*Ilustración 3. 5 Generador HYUNDAI de 3kW (Raiker, 2022)*

Este generador es de método de arranque manual, alimentación a gasolina, una autonomía de 5 horas, un tanque 20 litros de capacidad, un motor de 4 tiempos de 7.5 hp, un voltaje de 110/220 V y una potencia nominal de 2800 W (capaz de abastecer 10 viviendas de 275 W c/u) y máxima 3000 W. Además de un peso 36 Kg.

Ahora bien, ya presentados todas las posibles propuestas donde se emplean diferentes equipos, se puede hacer una relación de comparación para determinar cuál propuesto es más eficiente y rentable, es decir, que no se vea desaprovechada tanto inversión como potencia y pueda llevarse a cabo la energización de manera eficaz. Puesto que en varias ocasiones no reditúa invertir de más en potencia que al fin y al cabo no se verá aprovechada en su totalidad.

Por lo tanto, habiendo tenido en cuenta lo anterior, se selecciona la propuesta 3, es decir, el generador eléctrico de HYUNDAI HYE6000 de 6 KW puesto que este equipo es capaz de energizar aproximadamente un máximo de 20 viviendas sin problema sin forzarse a su máxima potencia.

Además de contar con un buen motor con suficiente potencia, el cual permite que se lleve a cabo la generación eléctrica.

Indagando más a detalle sobre el motor, este generador cuenta con uno HYUNDAI 13 HP - HYG1300, cuyas especificaciones se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Características motor HYUNDAI 13 HP (Raiker, 2022)

Hyundai HYG1300	
Potencia	13 HP
Tipo	Gasolina
Características	Cigüeñal de cuñero 1"
Cilindrada	390 cc
Motor	4 tiempos
Rpm	3600
Torque Máximo	22.5 N-m

Conociendo a fondo el equipo de generación, se procede con el análisis de combustibles para la mezcla que se pretende emplear en el presente trabajo de investigación para su óptimo funcionamiento.

### 3.3 Análisis de combustibles

De acuerdo con la planta de generación seleccionada se puede observar que con un tanque de 25 L cuenta con una autonomía de 5 horas, por lo tanto, el flujo volumétrico ( $\dot{V}_g$ ) se obtiene por medio de la ecuación 3.1.

$$\dot{V}_g = \frac{25 \text{ l}}{5 \text{ h}} = 5 \text{ l/h}$$

$$\therefore \dot{V}_g = 5 \text{ l/h} = \frac{5 \text{ l}}{60 \text{ min}} = \frac{5 \text{ l}}{3600 \text{ s}} = \frac{1}{720} \text{ l/s} = \frac{1}{720000} \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{Ec. (3.1)}$$

Tomando de (Chi-Sánchez, 2019) de propiedades físicas y químicas de la gasolina, el valor de la densidad de la gasolina es de 680 kg/m<sup>3</sup> y el poder calorífico es de 42 MJ/kg. Se realiza con el cálculo del flujo másico de la gasolina ( $\dot{m}_g$ ), en la ecuación 3.2.

$$\dot{m}_g = \left( \frac{1}{720000} m^3/s \right) (680 \text{ Kg}/m^3) = 0.9444 \times 10^{-3} \text{ kg}/s \quad \text{Ec. (3.2)}$$

Conociendo el valor del dosado, es decir, la relación aire–combustible ( $\lambda$ ) o también llamado aire estequiométrico, que se define como la relación entre la masa de aire y la del combustible líquido presente en un proceso de combustión.

Resultando así  $\lambda=14.7$  partes de aire por cada una de gasolina. (Çengel & Boles, 2012)

Con lo anterior se procede a calcular el volumen de aire que debe fluir ( $Aire_g$ ) en conjunto a la gasolina en la cámara de combustión, en la ecuación 3.3, a la par que la masa requerida.

$$Aire_g = (\lambda)(\dot{m}_g)$$

$$Aire_g = (14.7) (0.9444 \times 10^{-3} \text{ kg}/s) = 13.8833 \times 10^{-3} \text{ kg}/s \quad \text{Ec. (3.3)}$$

Considerando ahora que la densidad del aire es de  $\rho_{\text{aire}} = 1.2 \text{ kg}/m^3$ , el flujo volumétrico es de  $\dot{V}_{\text{aire}} = 0.01156 \text{ m}^3/s$ , como se describe en la ecuación 3.4.

$$\dot{V}_{\text{aire}} = \frac{Aire_g}{\rho_{\text{aire}}} = 0.0115694 \text{ m}^3/s \quad \text{Ec. (3.4)}$$

Por lo tanto, el volumen teórico necesario para la mezcla estequiométrica es  $\dot{V}_{\text{aire}} + \dot{V}_g$ , es de  $11.50 \times 10^{-3} \text{ m}^3/s$ . Por otra parte, el volumen de la cilindrada del motor a gasolina que está implementado en el generador es de 390cc (Raiker, 2022), es decir,  $0.39 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ , el cual no debe ser excedido.

Considerando los parámetros del motor empleado, se tiene que es un motor de 4 tiempos y 3600 RPM, lo que viene siendo 60 Rev/s, entonces analizando el

funcionamiento del motor a partir del ciclo de Otto (Çengel & Boles, 2012) se observa que el ingreso de la mezcla requiere 2 revoluciones para extraer la mezcla aire-combustible, tal como se muestra en la ilustración 2.5, por lo que solo extraerá 30 veces el volumen de la cilindrada cada segundo, resultando así un flujo volumétrico total de  $11.70 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ .

Por tal motivo, solo se considerará sustituir el 10 % de la mezcla con el biogas obtenido.

### 3.4 Cantidad energética que suplir con biogás

Considerando el poder calorífico de la gasolina (Heat of combustión) siendo de  $HC_g = 42 \text{ MJ/kg}$  (Chi-Sánchez, 2019) y el 10% del flujo másico de la gasolina ( $\dot{m}_{g_{10\%}}$ ), se puede obtener el cálculo de la energía ( $E_{10}$ ), como se describe en la ecuación 3.5.

$$E_{10} = (\dot{m}_{g_{10\%}})(HC_g) \quad \text{Ec. (3.5)}$$

$$E_{10} = [(0.10)(0.9444 \times 10^{-3} \text{ Kg/s})](42 \text{ MJ/kg})$$

$$E_{10} = (0.09444 \times 10^{-3} \text{ Kg/s})\left(42 \frac{\text{MJ}}{\text{Kg}}\right) = 3966.48 \text{ J/s} = 3.96648 \text{ kJ/s}$$

Entonces teniendo en cuenta la relación  $1 \text{ J/s} = 1 \text{ W}$ , por lo tanto, se tiene la equivalencia:

$$3966.48 \text{ J/s} = 3966.48 \text{ kW}$$

### Cantidad de flujo másico del biogas

Para obtener este cálculo, es necesario partir del análisis previo de la cantidad de energía a suplir con biogas. Por lo tanto, teniendo en cuenta las propiedades físicas y químicas del biogas producido se puede proceder con el análisis.



Tabla 3.3 Propiedades físicas y químicas del biogas (Varnero Moreno, 2011)

	Biogas (60% CH <sub>4</sub> )	Gas natural	Propano	Metano
Poder Calorífico (kWh/m <sup>3</sup> )	6	10	26	10
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1.2	0.7	2.01	0.72
Densidad con respecto al aire	0.9	0.54	1.51	0.55
Temperatura de ignición (°C)	700	650	470	595
Vel. máx. de propagación de la llama en el aire (m/s)	0.25	0.39	0.42	0.47
Consumo de aire teórico (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	5.7	9.5	23.9	9.5

Como se indica en la tabla 3.3 la unidad del poder calorífico del biogas de composición 60% metano (CH<sub>4</sub>) se encuentra en kWh/m<sup>3</sup>, sin embargo, interesa modificar las unidades con (kJ=kWs), por lo que se realiza la conversión siguiente:

$$\left(6 \frac{kWh}{m^3}\right) \left(\frac{3600s}{1h}\right) = 21,600 \frac{kWs}{m^3} = 21,600 \frac{kJ}{m^3}$$

Ahora bien, ya que para poder continuar con el análisis las unidades son un elemento fundamental para su comprensión, se hará la relación para que este parámetro coincida con las unidades establecidas de poder calorífico (Heat of combustion) como es el caso de la gasolina. Por lo tanto, para que las unidades puedan estar en kJ/kg, basta con dividir el poder calorífico del combustible entre la densidad del mismo, como se muestra a continuación:

$$\frac{21,600 \text{ kJ}/\text{m}^3}{1.2 \text{ kg}/\text{m}^3} = 18,000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

De la misma forma puede corroborarse según (Sánchez Hernández, 2021) que, dependiendo del porcentaje de metano en el biogás, varía el poder calorífico. Un biogás con un contenido de metano entre 55 y 65%, al entrar en combustión, produce una llama azul y puede tener un poder calorífico entre 18.000 a 24.000 kJ/m<sup>3</sup>.

Para la obtención del flujo másico de biogás ( $\dot{m}_{biogás}$ ), se realiza la siguiente ecuación, tomando los valores y parámetros previamente mencionados.

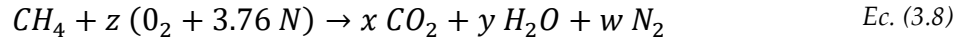
$$\dot{m}_{biogás} = \frac{3966.48 \text{ J}/\text{s}}{(18,000,000 \text{ J}/\text{kg})} = 2.2036 \times 10^{-4} \text{ kg}/\text{s} \quad \text{Ec. (3.6)}$$

Donde el numerador es el 10% de la energía que entregaba la gasolina y será reemplazado por biogás.

Ahora bien, se procede al cálculo de flujo volumétrico del biogás ( $\dot{V}_{biogás}$ ), tomando únicamente la densidad del biogás ( $\rho_{biogás}$ ), sin rebasar el valor anterior calculado de la cilindrada, como se aprecia en la ecuación 3.7.

$$\dot{V}_{biogás} = \frac{\dot{m}_{biogás}}{\rho_{biogás}} = \frac{(2.2036 \times 10^{-4} \text{ kg}/\text{s})}{(1.2 \text{ kg}/\text{m}^3)} = 0.183633 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{Ec. (3.7)}$$

Una vez obtenidos los parámetros necesarios para su estudio, se procede a realizar el balance de la ecuación de combustión (ecuación 3.8) para obtener la relación aire-combustible ideal del metano (CH<sub>4</sub>), puesto que el biogás está principalmente compuesto de éste.



Donde se considera que el aire este compuesto de  $(O_2 + 3.76 N)$ , y de producto se obtiene dióxido de carbono ( $CO_2$ ), vapor de agua ( $H_2O$ ) y nitrógeno ( $N_2$ ). De la misma forma, siguiendo el método para el balance de la ecuación de combustión del metano (Çengel & Boles, 2012) se tiene que  $x = 1$ ,  $y = 2$ ,  $z = 2$ ,  $w = 7.5$ .

Procediendo con el cálculo de la relación aire-combustible ( $\lambda_{CH_4}$ ), se tiene la ecuación 3.9.

$$\lambda_{CH_4} = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} = \frac{(N_m M)_{AIRE}}{(N_m M)_C + (N_m M)_{H_2}} = 17.25 \quad Ec. (3.9)$$

Donde  $N_m$  es el número de moles y  $M$  la masa molar de cada elemento químico.

Por lo tanto, se requieren 17.25 kg de aire para quemar 1kg de  $CH_4$ .

## Capítulo 4. Resultados de simulación y análisis

En el presente capítulo, se detalla la simulación de la hibridación de combustibles, partiendo de las especificaciones del equipo seleccionado para calcular el volumen teórico necesario para la mezcla estequiométrica y de los resultados obtenidos se desarrolla el análisis de los porcentajes de sustitución aplicables en la mezcla combustible insumo del generador.

El análisis parte de la consideración de una vivienda estándar con un consumo energético diario de 2.2 kWh durante 8 horas, lo que resulta a 0.275 kW instantáneos a suplir.

Lo siguiente consiste en escalar el consumo de una a 20 viviendas, con lo que resulta una carga total de 5.5 kW, por lo que el equipo que se debe seleccionar para poder llevar a cabo adecuadamente este proceso es el generador de la propuesta 3, mencionado en el subcapítulo 3.2, HYUNDAI HYE6000 de 6 kW máximos y 5.5 kW nominales, que cuenta con un motor de 13HP de 4 tiempos.

Derivado de la investigación plasmada en el capítulo anterior, se sabe también que el tanque del citado generador es de 25 L y cuenta con una autonomía de 5 horas, por lo que se calcula que su consumo, es decir el flujo volumétrico, es de  $5 \text{ l/h}$ .

Conociendo la densidad de la gasolina, se calcula el flujo másico de  $0.9444 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ . De la misma forma ya obtenida la relación estequiométrica de  $\lambda=14.7$ , se calcula el volumen de aire, es decir, flujo volumétrico  $0.0115694 \text{ m}^3/\text{s}$ , a partir de la densidad de este mismo.

Por lo tanto, el volumen teórico necesario para la mezcla estequiométrica es la suma del flujo volumétrico del aire y del flujo volumétrico de la gasolina ( $\dot{V}_{\text{aire}} +$

$\dot{V}_g=11.50 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ). Por otra parte, el volumen de la cilindrada del motor a gasolina que está implementado es de  $0.39 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ , el cual no debe ser excedido.

Ahora bien, habiendo considerado los parámetros del motor empleado (mencionados en el capítulo anterior) y examinando el funcionamiento del motor a partir del ciclo de Otto (Çengel & Boles, 2012), se sabe que este, solo extraerá 30 veces el volumen de la cilindrada cada segundo, resultando así un flujo volumétrico total de  $11.70 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . Consecuentemente, solo se considerará sustituir el 10 % de la mezcla con el biogas obtenido, a efecto de que no se exceda el volumen máximo antes referido.

Adicionalmente, es indispensable calcular cuánta energía se puede obtener usando como combustible la gasolina. En vista de que el poder calorífico de la gasolina (heat of combustion) es de 42 MJ/kg (Chi-Sánchez, 2019) y que solo se tomará el 10% del flujo másico de la gasolina, se calcula la energía, siendo de  $3.96648 \text{ kJ}/\text{s}$ , es decir,  $3.96648 \text{ kW}$ .

Es también de suma importancia, para efectos de la simulación calcular la energía que el porcentaje sustituido de biogas es capaz de producir, tomando en cuenta su composición, así como sus propiedades físicas y químicas. Por lo que, se calcula la cantidad de flujo másico del biogas partiendo del análisis previo sobre la cantidad de energía a suplir con biogas (10%).

Teniendo en cuenta las propiedades físicas y químicas del biogas, siendo este de una composición 60% Metano y 40%  $\text{CO}_2$ , cuenta con un poder calorífico de  $21,600 \text{ kJ}/\text{m}^3$ .

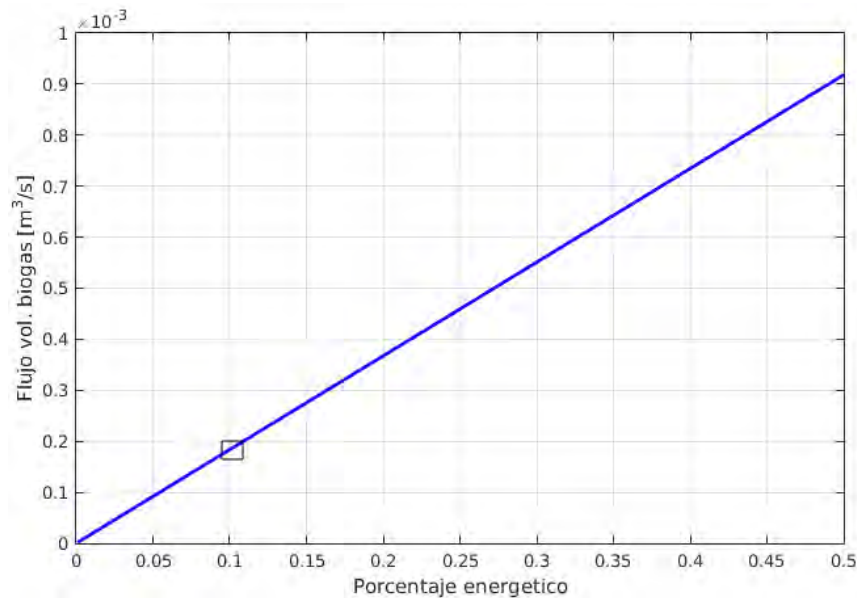
De tal modo, se ajustan las unidades en razón de mantener el parámetro coincidente.

Dividiendo el poder calorífico del combustible entre la densidad del mismo, resultando así un total de  $18,000 \text{ kJ/kg}$ .

Consecuentemente, se calcula el flujo másico tomando los valores y parámetros previos, obteniendo  $2.2036 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ .

Ahora bien, se procede al cálculo de flujo volumétrico del biogas siendo así  $0.183633 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ , el cual se encuentra marcado en la gráfica 4.1

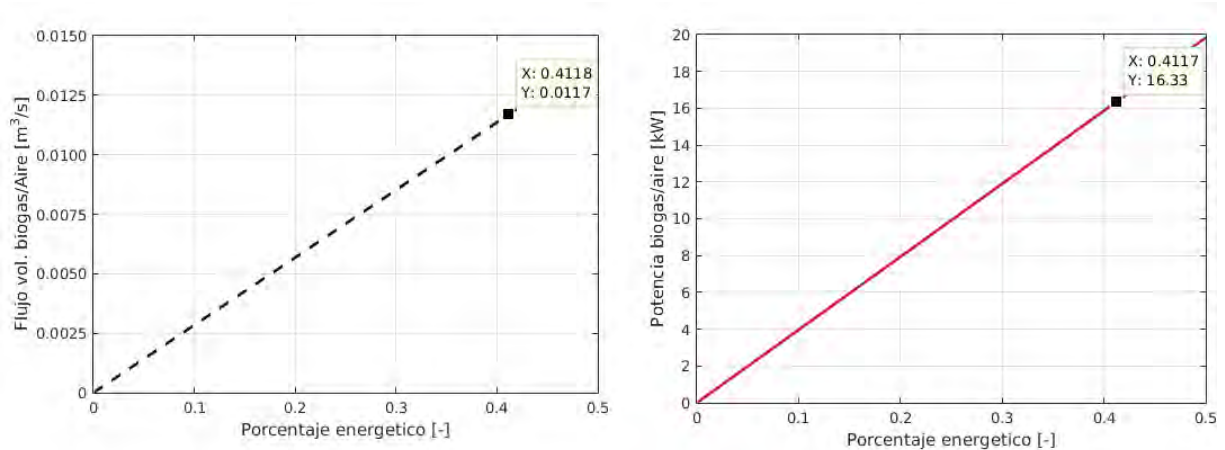
Como parte de los cálculos de simulación, se planteó un vector que comprende desde 0 hasta un valor cercano a 0.5, que refiere al 50% del porcentaje energético que puede llegar a sustituirse por el combustible convencional y en cuanto al límite superior, se aproxima a un valor de  $0.9 \times 10^{-3}$  como se muestra en la gráfica 4.1.



Gráfica 4.1 Relación del flujo de biogas con respecto al porcentaje de energía generada

Ya habiendo obtenido los parámetros necesarios para su estudio, se procede a realizar el balance de la ecuación de combustión para obtener la relación aire-combustible ideal del metano ( $\text{CH}_4$ ). Obteniendo  $\lambda_{\text{CH}_4} = 17.25$ , es decir, se requieren 17.25 kg de aire para quemar 1kg de  $\text{CH}_4$ .

Considerando la relación estequiométrica anterior, la suma de biogas/aire y el vector del porcentaje energético a sustituir de la gráfica 4.1, se obtiene la gráfica 4.2, donde se muestra el porcentaje de energía a sustituir con respecto al flujo volumétrico de la mezcla de combustibles biogas/aire para que pueda efectuarse el proceso de combustión, siendo la gráfica de la izquierda.



Gráfica 4.2 Relación de la mezcla biogas/aire y potencia generada con respecto al porcentaje de energía a suplir

De la misma forma, en caso de que se deseara analizar la relación en función de la potencia de biogas/aire en kilowatts, puede apreciarse en la misma gráfica 4.2.

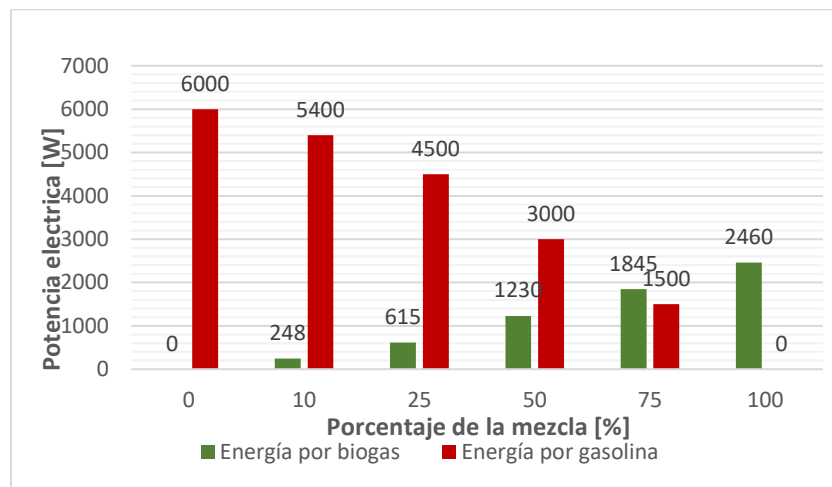
Cabe destacar que la potencia energética (química) de la figura anterior se refiere a la entrada del sistema, lo cual, hace alusión a la cantidad de potencia requerida por el motor de combustión para accionar el generador eléctrico. Y para evitar la confusión, entiéndase que dicha potencia no es el valor de la salida del generador, más bien, tómese como la cantidad de debe ser suplida por el biodigestor.

En cuanto al punto marcado en el vector presentado en figuras anteriores de la gráfica 4.2 se retoma el análisis del motor generador donde para poder entregarse los 60 Hz, la velocidad de giro debe ser 3600 RPM, además el volumen del motor de combustión es 390cc.

Con lo que se obtiene el flujo volumétrico total de  $11.70 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . Siendo este valor el límite permitido de flujo volumétrico de la mezcla y al comprenderse en la gráfica, hace alusión al porcentaje máximo de energía capaz de entregar usando biogas como combustible, es decir el 41%.

Dicho porcentaje (41%) representa la cantidad de energía que es admitida en el cilindro en forma de biogas con respecto al 100% del combustible convencional que se usaría.

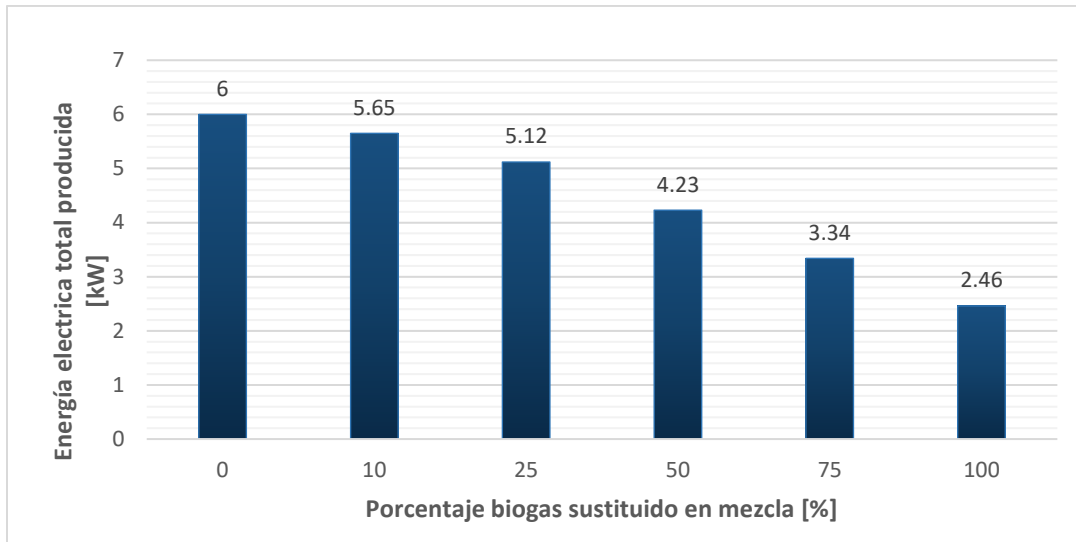
En consecuencia, si el generador es capaz de producir 6 kW al 100% de funcionamiento empleando gasolina, al emplear únicamente biogas trabajaría al 41%, produciendo así 2.460 kW como se muestra en la gráfica 4.3, ocupando el máximo flujo volumétrico para la velocidad requerida (3600 RPM).



*Gráfica 4.3 Potencia generada con respecto al porcentaje de biogas sustituido en la mezcla (cuanto aporta el biogas en la mezcla).*

De igual manera, en la gráfica 4.4 puede apreciarse la cantidad de energía total producida por el generador según sea su porcentaje de biogas sustituido en la mezcla de combustibles.





Gráfica 4.4 Energía eléctrica total producida según el porcentaje de biogas empleado en la mezcla.

De la simulación desarrollada se puede observar que el rendimiento del biogas es notablemente menor en comparación a aquel de la gasolina, sin embargo, hay que tomar en cuenta que al implementar el biogas en el sistema, el rendimiento más favorable se alcanza cuando se emplea un 41% del biogas y un 59% de gasolina, puesto que no supera el volumen máximo de la cilindrada, produciendo una cantidad de energía aceptable, que no afectará de manera radical el desempeño del motor generador y si constituirá un avance en materia de reutilización de recursos naturales propiciados por el entorno mismo.

## Capítulo 5. Conclusiones

El trabajo realizado permite demostrar que la utilización de los residuos orgánicos es posible, permitiendo a la humanidad fructificar a partir de aquello que se creía inservible, lo que hoy en día resulta sustancial y es muy importante para el aprovechamiento de los recursos con los que se dispone en el entorno. La presente tesis fue diseñada para aportar una propuesta susceptible de beneficiar específicamente a comunidades rurales, en donde abundan recursos como el estiércol de ganado, típico de las actividades secundarias en las que se desenvuelven.

Las conclusiones a las que se llegaron, tras el desarrollo de esta investigación, son el resultado del estudio de biodigestores y su diseño metodológico, en el cual se observó que, teniendo como variables principales, una materia prima para la carga, su nivel de pH y alcalinidad, así como su crecimiento de metano, para que de esta manera se pueda calcular el total de biogas que se puede obtener de este sistema de tratamiento de biomasa. Tal y como se observó en el segundo capítulo existe una amplia gama de opciones de combustibles que pueden emplearse para la obtención de biogas, sus respectivas especificaciones, así como sus características físicas y químicas, como por ejemplo el porcentaje de metano presente en su composición, el factor de dilución requerido o el tiempo de retención necesario. Asimismo, se ilustra la clasificación y variantes de los biodigestores detallando sus generalidades y características. Igualmente puede comprenderse como se logrará el aprovechamiento del biogas que sea generado.

A lo largo del tercer capítulo, es posible dimensionar el ahorro de combustible convencional en el proceso de alimentación de carga eléctrica de una o más viviendas, mediante el uso de biogas, como una propuesta híbrida que abastecerá

un motor generador. Para llegar a este resultado, fue necesario identificar previamente la demanda energética a solventar y conocer la cantidad de combustible convencional requerido por el generador, para su funcionamiento durante un determinado lapso.

Los beneficios del ahorro de combustible, mediante la implementación de un sistema híbrido con biogas, permite apreciar beneficios desde dos enfoques. El primero, es un enfoque económico, en el cual se genera un ahorro en la inversión que las personas hacen para adquirir la gasolina, como insumo principal de los generadores. Toda vez que la construcción de un biodigestor familiar es un procedimiento sencillo, que requiere de una baja inversión, para eficientar el gasto del inversionista y obtener los mismos beneficios del combustible convencional, mediante una propuesta innovadora, autosuficiente y más económica. El ahorro que se pueda lograr de los recursos familiares, puede significar una redistribución del gasto para los hogares, susceptible de ser utilizado en otros aspectos que puedan mejorar su calidad de vida.

El segundo, es un enfoque es ecológico, toda vez que la implementación de lo propuesto en la presente investigación, tiende a fomentar la disminución del uso de combustibles fósiles, así como, promover la cultura del aprovechamiento de los recursos de nuestro entorno, reduciendo el impacto humano en el medio ambiente. Se trata, entonces, de una propuesta que rescata principios básicos de los sistemas mecánicos de combustión, transformándolos en una opción más innovadora, ecológica, sostenible y positiva para la preservación del medio ambiente.

Todo lo anterior, parte de la comprensión del principio de combustion aplicado a motores, comúnmente conocido como el Ciclo de Otto, que requiere del oxígeno presente en el aire para quemar algún combustible. Simultáneamente, se investigaron las relaciones estequiométricas, es decir la relación aire-combustible,

para calcular y codificar la cantidad de biogas requerida para el proceso de generación eléctrica en el caso de estudio planteado.

Motivo por el cual, en el cuarto capítulo se detallan, los cálculos y aspectos esenciales en la simulación de la hibridación de combustibles, partiendo de las especificaciones del equipo seleccionado para calcular el volumen teórico necesario para la mezcla estequiométrica, y de los resultados obtenidos se desarrolla el análisis de los porcentajes de sustitución aplicables en la mezcla combustible insumo del generador. Derivado de que en la simulación un valor está en función de otro, se calculó el volumen de la mezcla híbrida que es capaz de admitir la cilindrada, para después, obtener cuánta energía se puede proveer usando como combustible únicamente la gasolina. Sabiendo esto es posible conocer la energía que el porcentaje sustituido de biogas es capaz de producir, tomando en cuenta sus características físicas y químicas.

La aportación principal de la tesis se ilustra durante el desarrollo de la simulación, al plantear un vector que comprende desde 0 hasta un valor cercano a 0.5, que refiere al 50% del porcentaje energético que puede llegar a sustituirse por el combustible convencional y en cuanto al límite superior, se aproxima a un valor de  $0.9 \times 10^{-3}$ .

Se concluyó que el máximo porcentaje de biogas que puede ser sustituido corresponde al 41%, siendo este porcentaje representativo de la cantidad de energía que es admitida en el cilindro en forma de biogas con respecto al 100% del combustible convencional que se usaría. En consecuencia, si el generador es capaz de producir 6 kW al 100% de funcionamiento empleando gasolina, al emplear únicamente biogas trabajaría al 41%, produciendo así 2.460 kW como se muestra en el capítulo cuarto, ocupando el máximo flujo volumétrico para la velocidad requerida (3600 RPM).

Haciendo énfasis que el rendimiento más favorable, se alcanza entonces, cuando se emplea un 41% del biogas y un 59% de gasolina, puesto que no supera el volumen máximo de la cilindrada, produciendo una cantidad de energía aceptable, que no afectará de manera radical el desempeño del motor generador y si constituirá un avance en materia de reutilización de recursos naturales propiciados por el entorno mismo.

Para apreciar las aristas de esta investigación, es necesario resaltar para su mejor estudio y comprensión, que se tomó en cuenta que los sistemas de generación convencionales, no están diseñados para funcionar óptimamente con una fuente híbrida de energía, debido a que no se puede aprovechar su máximo potencial. Es por tanto materia de nuevas investigaciones, desarrollar un motor generador que funcione de manera óptima, empleando únicamente como fuente de energía una mezcla híbrida, o bien, desarrollar un motor que funcione en su totalidad a base de biogas, que tenga la capacidad de potenciar la baja energía producida a causa de su bajo poder calorífico.

La simulación y los cálculos desarrollados, son también parte aguas, para generar un sistema de almacenamiento energético compatible con el sistema de generación presentado en esta tesis, con la adición de baterías, que almacenarán la energía producida para luego disponer de ella. Distinto al que se usa actualmente, siendo una opción innovadora que requerirá de una inversión mayor con beneficios posiblemente observables a largo plazo.

## Referencias

- A., d. I. (27 de Agosto de 2019). *SANTAFE*. Obtenido de SANTA FE TECNOLOGÍA.
- Acosta, C., & Muñoz Santana, J. (2020). *Implementación de un biodigestor para la obtención de biogas a partir de los excrementos de los animales de granja ubicada en el cantón Salcedo*. Obtenido de UTC: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/6834>
- Asankulova. (2008). *Analysis of Factors Influencing Biogas*. Obtenido de Release Geliotekhnika. 3.
- Autocasión. (15 de Agosto de 2022). *Ciclo Otto - ¿Qué es Ciclo Otto? | Diccionario Autocasión*. Obtenido de <https://www.autocasion.com/diccionario/ciclo-otto>
- Barquín, J. (2004). *Energía: técnica, economía y sociedad*. Madrid: Universidad Pontificia de Comillas.
- Becerra, G., Chi-San, N., Aviles, J., Osorio, E., & Aguilar, J. (2019). Control de cuerpo de aceleración para pruebas con mezclas de combustible en MCI. *Congreso Nacional de Control Automático*, (págs. 535-539). Puebla, México.
- Becerra-Nuñez, G., Aguilar-Aguilar, J., Chi-Sanchez, N., & Aviles, J. D. (2021). Rendimiento de un motor de combustión interna utilizando diferentes mezclas carburantes. *Química Hoy*, 11(3), 1183. doi: <https://doi.org/10.29105/qh10.3-264>
- Canepa, L., Ramón, J., Sosa, O., & Aurelio, J. (01 de 2013). *Degradación anaerobia del contenido gástrico ruminal bovino para la obtención de biogás, en un*. Obtenido de Ingeniería, Revista Academica UADY: <https://www.redalyc.org/pdf/467/46729718005.pdf>
- Cassedy, E. S., & Grossmann, P. Z. (1990). *Introduction to energy: resources, technology and society*. (Vol. XI). Cambridge: Cambridge University Press.
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *TERMODINAMICA* (7a ed.). México: MCGRAW-HILL.
- Chi Sanchez, N. G. (2019). Caracterización de motor de combustión interna con mezcla de combustibles. *Tesis de licenciatura, Universidad de Quintana Roo*, 98.

- De la Merced Jiménez, D. (2012). *Evaluación de los parámetros de un biodigestor anaerobio tipo continuo*. Obtenido de Repositorio Institucional Universidad Veracruzana: <http://cdigital.uv.mx/handle/123456789/31560>
- Dieck Assad, F. A., & Peralta Solorio, E. (2014). The importance of energy for economic growth in Mexico. *Entreciencias*, 287-301.
- Estrada, C., & Zapata Meneses, A. (2004). *GASIFICACIÓN DE BIOMASA PARA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES DE BAJO PODER CALORÍFICO Y SU UTILIZACIÓN EN GENERACIÓN DE POTENCIA Y CALOR*. Obtenido de Scientia et Technica: <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/7229>
- Fantozzi, F., & Buratti, C. (2009). *Biogas production from different substrates in an experimental Continuously Stirred Tank Reactor anaerobic digester*. Obtenido de Bioresource Technology 100.
- Grima-Ramirez. (2013). *El biogás y sus diferentes tecnologías*. Obtenido de Agroinforme, p.287.
- Herrero, J. (2008). *Biodigestores familiares*. Obtenido de Guía de diseño y manual de instalacion .
- Huerga, I. (Febrero de 2014). *Biodigestores de pequeña escala*. Obtenido de Instituto de Ingeniería Rural: <http://www.produccion-animal.com.ar/Biodigestores/26-Biodigestor-Familiar.pdf>.
- Kaiser, F., Bas, F., & Gronauer, A. (2002). *Producción de biogás a partir del guano animal: el caso de Alemania*. Obtenido de Agronomía y Forestal UC Vol.16.
- Martinez, G. L. (01 de 07 de 2003). *Biodigestión anaerobia de residuos sólidos urbanos. Alternativa energética y fuente de trabajo*. Obtenido de Tecnura, Vol. 7 Num. 13: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/6187>
- Mercado Libre. (15 de Agosto de 2022). *Generador Dual Sportsman 3500/4000w Gen4000df*. Obtenido de [https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-904286158-generador-dual-sportsman-35004000w-gen4000df-\\_JM?matt\\_tool=16271307&matt\\_word=&matt\\_source=google&matt\\_campaign\\_id=15696443666&matt\\_ad\\_group\\_id=130236951063&matt\\_match\\_type=&matt\\_network=g&matt\\_device=c&m](https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-904286158-generador-dual-sportsman-35004000w-gen4000df-_JM?matt_tool=16271307&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=15696443666&matt_ad_group_id=130236951063&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&m)

- Mercado Libre. (15 de Agosto de 2022). *Generador portátil Pretul GEN-70P 8000W bifásico 120V/240V*. Obtenido de [https://www.mercadolibre.com.mx/generador-portatil-pretul-gen-70p-8000w-bifasico-120v240v/p/MLM15822990?pdp\\_filters=category:MLM33396#searchVariation=MLM15822990&position=10&search\\_layout=grid&type=product&tracking\\_id=cb71169d-cc3f-4b2a-9c84-4c5a12d4d986](https://www.mercadolibre.com.mx/generador-portatil-pretul-gen-70p-8000w-bifasico-120v240v/p/MLM15822990?pdp_filters=category:MLM33396#searchVariation=MLM15822990&position=10&search_layout=grid&type=product&tracking_id=cb71169d-cc3f-4b2a-9c84-4c5a12d4d986)
- Mercado Libre. (15 de Agosto de 2022). *Planta De Luz 10000 Watts Yamaha Technology Trigen, Coleman*. Obtenido de [https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-650089208-planta-de-luz-10000-watts-yamaha-technology-trigen-coleman-JM#position=29&search\\_layout=grid&type=item&tracking\\_id=7fbb212fd560-45a0-98cd-57dadb7f1184](https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-650089208-planta-de-luz-10000-watts-yamaha-technology-trigen-coleman-JM#position=29&search_layout=grid&type=item&tracking_id=7fbb212fd560-45a0-98cd-57dadb7f1184)
- OLADE. (28 de Junio de 2020). *Sistema de Información Energética de Latinoamérica y el Caribe*. Obtenido de <http://www.sielac.olade.org>
- Parra Ortiz, D. L., Botero Londoño, M. A., & Botero Londoño, J. M. (07 de 2018). *Biomasa residual pecuaria: revisión sobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros subproductos*. Obtenido de Revista UIS Ingenierías: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/5537/553762463014/553762463014.pdf>
- Pedraza, G., Chará, J., Conde, N., & Giraldo, S. (2002). *Evaluation of polyethylene and PVC tubular biodigesters in the treatment of swine wastewater*. . Obtenido de *Livestock Research for Rural Development* Vol. 14.
- Poggio, D., Ferrer, I., Batet, L., & Velo, E. (2009). *Adaptación de biodigestores tubulares de plástico a climas fríos*. Obtenido de *Livestock Research for Rural Development* Vol. 12: <http://www.lrrd.org/lrrd21/9/pogg21152.htm>.
- Prosap. (2009). *Biodigestores-Biogás en la actividad rural*. Obtenido de *Encuentro Prosap*, vol. V.
- Raiker. (15 de Agosto de 2022). *Generador Hyundai 6000W C/Motor 13.1 Hp 110V/220V Hye6000*. Obtenido de <https://www.raiker.com.mx/generador-hyundai-6000w-c-mot-13-1-hp-110v-220v-hye6000/p>
- Raiker. (15 de Agosto de 2022). *Hhy3000 Generador Hyundai Portatil a Gasolina 3.0 kW*. Obtenido de [https://www.raiker.com.mx/portatiles-hyundai-hhy3000m/p?gclid=CjwKCAiAvK2bBhB8EiwAZUbP1H\\_EoRkWfD631n8qj4WfehjfG\\_7OwXejZU70XX5UfowrlpaRfr0ZVhoCDmIQAvD\\_BwE](https://www.raiker.com.mx/portatiles-hyundai-hhy3000m/p?gclid=CjwKCAiAvK2bBhB8EiwAZUbP1H_EoRkWfD631n8qj4WfehjfG_7OwXejZU70XX5UfowrlpaRfr0ZVhoCDmIQAvD_BwE)



- Raiker. (16 de Agosto de 2022). *MOTOR A GASOLINA HYUNDAI 13 HP - HYGC1300*. Obtenido de [https://www.raiker.com.mx/de-gasolina-hyundai-hygc1300/p?idsku=2423&gclid=CjwKCAiA4KaRBhBdEiwAZi1zzj4uei1F-wD7C49mg3nrBVb47meY21Jy1TuzBN4z90J7bJW-WMxwyBoC9uAQAuD\\_BwE](https://www.raiker.com.mx/de-gasolina-hyundai-hygc1300/p?idsku=2423&gclid=CjwKCAiA4KaRBhBdEiwAZi1zzj4uei1F-wD7C49mg3nrBVb47meY21Jy1TuzBN4z90J7bJW-WMxwyBoC9uAQAuD_BwE)
- Román, G., & R., A. (16 de Sep de 2016). *Diseño y simulación de un biodigestor para generar biogás y abono a partir de vísceras animales*. Obtenido de EPN: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16720>
- Sánchez Hernández, S. (2021). Purificación del biogás para su uso en motores. *Revista Estudiantil Nacional de Ingeniería y Arquitectura*, 2(1), 1-15. doi:ISSN:2307-471X
- SENER; PRODESEN. (2018). *Balance nacional de energía - Programa de desarrollo eléctrico nacional*. Ciudad de México: SENER.
- Solano, O. (2009). *Biodigestores: factores químicos, físico y biológicos relacionados con sus productividad*. Obtenido de *Tecnología en Marcha*, vol. XXIII.
- Turare, C. (2009). *Biomass Gasification technology and utilisation*. Obtenido de Institute University of Flensburg.: <http://mitglied.lycos.de/cturare/bio.htm>
- Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual del biogás, FAO*. Santiago de Chile: Food and Agriculture Organization.