



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

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL MERCADO “LA PARROQUIA” ZONA 6 DE LA CIUDAD DE GUATEMALA, POR MEDIO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS

Carlos Eduardo García Cano

Asesorado por el Mtro. Edgar Yanuario Laj Hun

Guatemala, febrero de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL MERCADO “LA
PARROQUIA” ZONA 6 DE LA CIUDAD DE GUATEMALA, POR MEDIO DE LA
GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

CARLOS EDUARDO GARCÍA CANO

ASESORADO POR EL MTRO. EDGAR YANUARIO LAJ HUN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIA	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Marvin Mariano Hernández Fernández
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Byron Giovanni Palacios Colindres
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL MERCADO “LA PARROQUIA” ZONA 6 DE LA CIUDAD DE GUATEMALA, POR MEDIO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 20 de noviembre de 2020.

Carlos Eduardo García Cano

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser parte de mi motivación a cumplir mis metas.
Mis padres	Carlos Ovidio García y Flavia Arminda Cano. Su apoyo y amor me ha permitido seguir adelante en mis sueños.
Mis hermanos	Gabriela, Víctor, Marcos y Argelia García Cano su apoyo me motiva a seguir esforzándome en mi carrera.
Mis abuelos	Glenda Miriam Cano y Raúl Tello (q.e.p.d) a pesar de no estar cerca siempre están presentes apoyándome y dándome su cariño, permitiéndome seguir adelante.
Mis tíos y primos	Por la felicidad y la orientación que me han dado en todo momento.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser el pilar de conocimiento que me permitió una mejor formación académica.
Facultad de Ingeniería	Por los conocimientos que me permitieron mejorar como estudiante.
Escuela de Estudios de Postgrado	Por el apoyo brindado en todo momento.
Mis amigos	Por acompañarme durante toda la carrera, apoyándome en todo momento.
Mi asesor	Mtro. Edgar Yanuario Laj Hun, por sus consejos y su conocimiento impartido.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES.....	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
4. JUSTIFICACION.....	11
5. OBJETIVOS.....	13
6. NECESIDAD POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCION	15
7. MARCO TEÓRICO	17
7.1. Residuos sólidos y su gestión	17
7.1.1. Implicaciones medioambientales	18
7.1.2. Clasificación de los residuos sólidos	19
7.1.2.1. Según su origen	19
7.1.2.2. Según peligrosidad	20
7.1.2.3. Según composición.....	21

7.1.3.	Gestión integral de residuos sólidos en Guatemala.....	21
7.1.4.	Principios de la Política Integral de Residuos de Guatemala.....	23
7.2.	Proceso de digestión.....	25
7.2.1.	Digestión aeróbica	26
7.2.2.	Digestión anaeróbica	27
7.2.3.	Principios de la fermentación anaeróbica	27
7.2.3.1.	Hidrólisis	28
7.2.3.2.	Etapa Fermentativa.....	29
7.2.3.3.	Etapa Acetogénica	29
7.2.3.4.	Etapa Metanogénica	29
7.2.4.	Microorganismos Involucrados.....	30
7.2.4.1.	Bacterias que participan de la hidrólisis.....	30
7.2.4.2.	Bacterias que participan de la acidogénesis y acetogénesis.....	30
7.2.4.3.	Bacterias que participan de la metanogénesis	30
7.3.	Reactores anaeróbicos	31
7.3.1.	Reactor Continuo	32
7.3.2.	Reactor Semicontinuo	32
7.3.3.	Reactor Discontinuo o de régimen estacionario	32
7.3.4.	Componentes de un digestor anaeróbico	33
7.3.4.1.	Reactor	33
7.3.4.2.	Cúpula	33
7.3.4.3.	Válvulas de seguridad.....	34
7.3.4.4.	Medidor de gas.....	34
7.3.4.5.	Sistema de gas y quemador	34

7.3.5.	Tipos de reactores para medios rurales	35
7.3.5.1.	Modelo Chino	35
7.3.5.2.	Modelo Hindú	36
7.3.5.3.	Horizontal	36
7.3.5.4.	Tipo Batch	37
7.3.5.5.	Reactor de Alta Velocidad	38
7.3.5.6.	Reactor de contacto	39
7.4.	Biogás como fuente energética	39
7.4.1.	Aplicaciones para el biogás.....	40
7.4.1.1.	Generación de electricidad o calor.....	41
7.4.1.2.	Combustible de motores	42
7.4.1.3.	Antorchas de quema de gas.....	42
7.4.2.	Purificación y adaptaciones para aprovechamiento	43
7.4.3.	Usos del residuo o lodo de digestión	44
8.	HIPÓTESIS	47
9.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO.....	49
10.	METODOLOGÍA	53
10.1.	Tipo de estudio	53
10.1.1.	Definición de variables.....	53
10.2.	Fases de estudio	55
10.2.1.	Fase 1. Exploración bibliográfica	55
10.2.2.	Fase 2. Recolección de datos	55
10.2.3.	Fase 3. Obtención de materia prima.....	56
10.2.4.	Fase 4. Determinación experimental	57
10.2.4.1.	Construcción del reactor.....	57

10.2.4.2.	Medición volumétrica	59
10.2.4.3.	Cálculo de la producción de biogás.	61
10.2.4.3.1.	Producción de metano ..	61
10.2.4.3.2.	Máxima producción de metano.....	61
10.2.4.4.	Medición de sustrato biofertilizante	62
10.2.5.	Fase 5. Evaluación del potencial energético del gas.....	62
10.2.6.	Fase 6. Análisis de resultados	63
10.2.7.	Fase 7. Presentación y discusión de resultados	64
11.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS	65
12.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	67
13.	FACTIBILIDAD DE ESTUDIO	69
14.	REFERENCIAS	71
15.	APÉNDICES	75

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

- | | | |
|-----|--|----|
| 1. | Composición de los residuos generados en el 2018 | 17 |
| 2. | Acumulación de residuos sólidos en el lago de Amatitlán..... | 18 |
| 3. | Normativa para la Gestión de Residuos en Guatemala | 22 |
| 4. | Diagrama de las reacciones involucradas en la digestión anaeróbica . | 28 |
| 5. | Microorganismos presentes en las 3 etapas de la digestión..... | 31 |
| 6. | Biodigestor modelo Chino | 35 |
| 7. | Biodigestor modelo Hindú | 36 |
| 8. | Biodigestor Horizontal | 37 |
| 9. | Biodigestor tipo Batch | 38 |
| 10. | Biodigestor de contacto..... | 39 |
| 11. | Aplicaciones del biogás..... | 41 |
| 12. | Alternativas de purificación | 43 |
| 13. | Esquema de reactor | 58 |
| 14. | Probeta para medición volumétrica | 60 |

TABLAS

I.	Rendimiento de metano según el tipo de sustrato	25
II.	Características Generales del Biogás	40
III.	Definición de variables	53
IV.	Composición de muestras.....	56
V.	Composición química	56
VI.	Propiedades de la muestra del reactor.....	59
VII.	Producción de biogás.....	60
VIII.	Análisis químico del biofertilizante	62
IX.	Cromatografía de gases.....	63
X.	Producción mensual	64
XI.	Producción anual.....	64
XII.	Cronograma de actividades	67
XIII.	Recursos necesarios para la investigación	69

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
pH	Acidez
H ₂ S	Ácido sulfídrico
CO ₂	Dióxido de carbono
°C	Grados Celsius
H ₂	Hidrogeno
H	Humedad
Kg	Kilogramo
KWh	Kilowatt hora
Lt	Litro
CH ₄	Metano
m ³	Metro cúbico
N ₂	Nitrógeno
Kcal/m ³	Poder calorífico
%	Porcentaje
Pr	Proteína
ST	Sólidos Totales
SV	Sólidos Volátiles

GLOSARIO

CD	Carga Diaria de Residuos Orgánicos.
Cromatografía	Método de análisis que permite la separación de gases o líquidos de una mezcla en sus componentes más básicos.
CTR	Volumen Total del Reactor.
GEI	Gases de Efecto Invernadero.
Hidrocarburo	Compuesto orgánico conformado únicamente por átomos de carbón e hidrógeno.
MARN	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, es el instituto encargado de regular la gestión ambiental y promover el desarrollo sostenible en Guatemala. Se ubica en la 7 avenida 03-67, zona 13 de la ciudad de Guatemala.
PCH_{max}	Producción Máxima de Metano.
PM	Peso de Materia Orgánica Disuelta en el Reactor.

Poder calorífico Cantidad de energía por unidad de masa o por unidad de volumen de materia que puede desprenderse al producir una reacción química.

TR Tiempo de Retención Hidráulica.

VT Volumen de Trabajo del Reactor.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación busca evidenciar el potencial de generación energética que posee el mercado “La Parroquia” ubicado en la zona seis de la ciudad capital aprovechando la acumulación constante de desechos orgánicos para generar biogás que puede ser utilizado como fuente de energía eléctrica o calor en las actividades comerciales del lugar.

El biogás es un combustible generado por la descomposición de materia orgánica y su contenido de metano contribuye en mayor medida al efecto invernadero, sin embargo, posee un potencial calorífico que le permite sustituir a otros combustibles y debido a que es de origen renovable es utilizado en diversas aplicaciones para generar energía, lo cual permite reducir los niveles de GEI y mejora la gestión de residuos sólidos.

El proceso de digestión anaerobia permitirá aprovechar los residuos orgánicos para la generación de biogás y lodos de la digestión que serán aprovechados como fertilizante en proyectos municipales, los cuales permitirán ser un punto de comparación para futuros proyectos de gestión de residuos.

1. INTRODUCCIÓN

La escasa cultura para el adecuado manejo de desechos sólidos producidos diariamente genera las condiciones necesarias para la aparición de plagas. Dichos residuos acumulados al ser recolectados son trasladados a un vertedero sanitario, donde se depositan junto a otros desechos de distinta naturaleza y/o procedencia, los cuales comenzarán a emitir gases de efecto invernadero y a despedir malos olores.

La investigación busca evidenciar el potencial que tienen los residuos orgánicos del mercado “La Parroquia” como fuente para la generación de biogás para fines energéticos. Al utilizar un proceso de digestión anaerobia en residuos orgánicos se obtiene gas y lodo, el cual puede ser utilizado como biofertilizante debido a su composición rica en nutrientes para la tierra y el gas puede tener diversas aplicaciones como la generación de energía eléctrica o calor. El aprovechamiento de residuos permite reutilizar materias que son descartadas evitando que generen contaminantes al ambiente, por otro lado, se identificará la cantidad de biogás que genera un mercado cantonal como “La Parroquia” para ser usado en la generación de energía eléctrica.

El estudio se dividirá en diferentes actividades que permitirán la realización del proyecto, las cuales son:

- Actividad 1: Recolección, separación y análisis de los componentes activos de los desechos sólidos.
- Actividad 2: Análisis microbiológico de los componentes activos y la capacidad de generación de biogás.

- Actividad 3: Se definirá la cantidad de desechos sólidos que produce el mercado “La Parroquia” y su nivel de potencial para producir biogás.
- Actividad 4: Se definirá según el nivel de biogás producido la cantidad y calidad de energía renovable que puede producir y su capacidad de atender una demanda sostenible y sustentable que permita redireccionar los desechos diarios.
- Actividad 5: Se establecerá un prototipo de generación que permita replicarlo en otros espacios públicos y privados a través de la conservación de medio ambiente.

Para la realización de este estudio, se tendrá una fase de recolección de datos, donde se estimará la producción mensual y anual de residuos sólidos y los factores que afectan la producción, posteriormente se hará una recolección de muestras de desechos, haciendo una caracterización para la obtención de materia orgánica. Se tendrá un reactor semicontinuo para la digestión anaeróbica que controlará las características de la digestión y la producción diaria de biogás. Luego del proceso se hará un análisis en el biogás, permitiendo conocer su composición y poder calorífico, así como un análisis en el sustrato que permita conocer su calidad como biofertilizante. Se presentará un análisis que permitirá estimar la producción de gas y la energía total que puede aprovecharse para fines energéticos.

En el capítulo 1, se presentarán los antecedentes más importantes para esta investigación. En el capítulo 2, se hará una revisión de la bibliografía relacionada al tema de estudio, destacando los conceptos de mayor relevancia, tales como, gestión de residuos, procesos de digestión, tipos de reactores y el biogás como fuente energética en diversas aplicaciones. En el capítulo 3, se mostrará la construcción de un reactor anaeróbico. En el capítulo 4, se detallará el proceso para la toma de muestras y selección de la materia prima que será

tratada en el reactor anaeróbico. En el capítulo 5, se describirán los métodos para la obtención de datos, como lo son la medición en la producción diaria y los análisis de composición de biogás. En los capítulos 6 y 7 se presentarán los resultados más significativos de la investigación y la discusión de estos para una mayor comprensión de los resultados. Finalmente se darán las conclusiones y recomendaciones de la investigación, para la continuidad de esta.

2. ANTECEDENTES

En Guatemala se han hecho estudios sobre el aprovechamiento de los residuos sólidos biodegradables para la generación de biogás con fines energéticos, tanto en el uso doméstico reemplazando fuentes de calor como leña y carbón, como en el uso industrial para la generación de electricidad conectada a la red de distribución. A continuación, se presentan algunos casos de estudio y diseño de equipos generadores de biogás.

En la tesis de graduación *Diseño de un prototipo bioenergético, empleando residuos sólidos orgánicos de la Universidad de San Carlos de Guatemala* (Barillas, 2017), se estableció que los niveles de pH en la mezcla de compuestos biodegradables debe estar entre 6 y 8, fuera de estos valores de acidez el compuesto generará un biogás con un pobre contenido de metano, disminuyendo así sus cualidades energéticas. La temperatura de los biodigestores anaeróbicos debe ubicarse entre el rango de 30 °C y 40 °C, para fomentar el crecimiento de los microorganismos ligados a la descomposición de los residuos.

En la tesis de graduación titulada *Potencial de producción de biogás de los residuos orgánicos biodegradables de la terminal zona 4* (Alvarado, 2017), se encontró que la fase más crítica durante el proceso de digestión anaeróbica es en la hidrólisis, en la cual se degradan los residuos orgánicos, el tiempo de duración de dicha etapa depende de la composición de los residuos, al tener residuos con compuestos complejos la degradación será más prolongada; se demostró que la temperatura es el factor determinante en la producción de biogás, ya que al alcanzar los 33 °C se inicia la producción de gas dentro del biodigestor.

En otros países se encontraron estudios relacionados al tema de investigación, los cuales se presentan a continuación:

En la publicación *Evaluación de la pre-factibilidad de un sistema de generación eléctrica a partir de biogás con estiércol de ganado vacuno o porcino en Cundinamarca* (Sánchez y García, 2014), se encontró que para poder producir 3 KWh eran necesarias 2.43m^3 de gas, que equivalen a los residuos producidos de 40 reses; utilizando un sistema de recolección de biogás a partir de un biodigestor de polímero tipo tubular y una mezcla de agua y excretas de 4:1 para obtener la mayor cantidad de biogás, reduciendo la cantidad de sustrato generado.

En la publicación *Evaluación técnica y económica de una planta de biogás para autoabastecimiento energético: Una estrategia para diferentes contextos* (Carrasco, 2015), se contempló la viabilidad técnica como económica de un proyecto de generación de biogás con fines energéticos, mencionando los puntos más importantes a considerar a la hora de incursionar en un proyecto de este tipo, entre los cuales se mencionan las propiedades físico-químicas del sustrato, el potencial de generación de biogás, la disponibilidad de materia prima y las distintas tecnologías para generación de gas tomando en consideración sus ventajas y desventajas dependiendo de las condiciones en las que se estará operando.

En la tesis de graduación *Producción de biogás en sustrato sólido mediante la digestión anaerobia de pulpa de café* (Rosa, 2015), se demostró que el inóculo puede alterar la producción de biogás, al hacer una adaptación previa de la biomasa a degradar, puede dar lugar a una mayor producción de biogás y metano. Así mismo, se expone un método analítico para el cálculo de metano considerando las condiciones ideales de trabajo, en promedio la

capacidad calorífica del biogás es de 5500 kcal/m³, siendo así un buen sustituto en actividades diarias que requieran combustibles fósiles.

En la publicación *Potencial de biogás de los residuos agroindustriales generados en el departamento de Cundinamarca* (Montenegro, Rojas, Cabeza y Hernández, 2016), se encontró que los cultivos como el mango, la lima, la naranja, el tomate, la papa y las flores aportan un mayor porcentaje de sólidos volátiles, conteniendo en promedio 94.6% de sólidos volátiles que favorecen la generación de metano, pero es necesario un proceso de codigestión para poder contrarrestar las deficiencias de los residuos y estimular la síntesis de enzimas que favorezcan el proceso.

En la tesis de graduación *Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia a partir de aprovechamiento de sustratos orgánicos (pasto y aserrín), en la ciudad de Estelí en el año 2017* (Sanabria, Sánchez y Rodas, 2018), se determinó que un reactor tipo Batch muestra el mejor comportamiento al momento de iniciar una pequeña producción de biogás con fines energéticos o experimentales; se estima la producción de biogás en 23 a 30 días, pudiendo reducir el tiempo de producción si se incluye en el sustrato inóculos de materia fecal (estiércol animal) y controlando la temperatura dentro del biodigestor, la cual se estima entre 25 °C y 30 °C, siendo en los primeros días que alcance una temperatura por encima de los 30°C, estabilizándose después de la primera semana.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El mercado Municipal “La Parroquia” ubicado en zona seis de la ciudad de Guatemala, presenta una generación constante de residuos que dañan el entorno comercial, residencial y peatonal, provocando la expulsión de olores fétidos, la acumulación de desechos varios y contaminación, generando incomodidad entre los vecinos y molestia tras las actividades comerciales que se llevan a cabo en dicho lugar. El problema ha aumentado debido al crecimiento de las actividades comerciales en las cercanías sin un plan establecido, lo cual genero un crecimiento desordenado que afecta a los vecinos.

El mercado posee un área específica para la acumulación de los desechos, preparándose así para su recolección a través del servicio municipal de recolección de basura y posterior trasladado al relleno sanitario ubicado en la zona 3 de la ciudad capital. La actividad de recolección ocurre todos los días por las tardes, pero al tener un gran número de comerciantes en las cercanías y sumado a ello el difícil acceso al área de recolección a las horas pico del sector, impide que se complete el proceso de traslado de desechos al lugar específico, por lo cual se llega a generar una acumulación no deseada de residuos que emiten olores fétidos y molestia en los vecinos del sector.

El deficiente manejo de residuos y la falta de interés o poca conciencia de los comerciantes, provoca acumulación de desechos varios que son producidos bajo la actividad comercial, esto permite generar las condiciones necesarias para la propagación de plagas como cucarachas, moscas, roedores y otros animales rastreadores, los cuales pueden transmitir enfermedades y llegar a contaminar los productos y alimentos que se venden en los puestos.

Al no existir una mejor organización entre las entidades responsables, se han descuidado aspecto como el manejo adecuado de los residuos, esto afecta negativamente a los locatarios y a los vecinos debido a la aparición de plagas, olores fétidos y la contaminación visual del entorno, al mismo tiempo el desconocimiento del potencial energético de los residuos y las aplicaciones que pueden tener los residuos orgánicos provoca que sean desechados o descartados, contribuyendo a su acumulación.

Por lo que nos lleva a plantear la pregunta ¿Cuál es el potencial energético del mercado La Parroquia?

Por lo que para responder a esta interrogante se deben de contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuántos residuos son biodegradables del total generado de forma diaria?
- ¿Cuánto biogás se puede producir por tonelada de residuos?
- ¿Cuánta es la energía que se puede generar mensual y anualmente?
- ¿De qué forma puede aprovecharse el biogás?

4. JUSTIFICACION

La realización de la presente investigación se ajusta en la línea de investigación de gestión y tratamiento de los residuos del área de gestión ambiental de la Maestría en Energía y Ambiente.

El biogás es una fuente alternativa de energía que a pesar de ser menos eficiente que el gas natural, puede aprovecharse en aplicaciones como la generación de energía eléctrica, como una fuente de calor o como una solución para el manejo de residuos orgánicos que se acumulan en áreas urbanas y comerciales, el cual representa una problemática en áreas con una mayor densidad poblacional.

Este trabajo presentará el potencial que tienen los residuos sólidos generados en el mercado “La Parroquia” como fuente para la generación de biogás, con el fin de ser aprovechados en las actividades comerciales del lugar, al mismo tiempo se estimará el total que puede generar dicho lugar y las propiedades que presenta el gas como fuente energética.

La investigación busca beneficiar a los comerciantes del mercado “La Parroquia” al ofrecer una solución accesible para la problemática presentada en la generación constante de residuos orgánicos y su posible utilización en las actividades comerciales como fuente de calor, así mismo, beneficiar futuros estudios que deseen utilizar los residuos generados como fuente de energía renovable, por lo que se presentarán las bases para futuros proyectos de generación de energía.

El estudio prevé beneficiar al medio ambiente puesto que el metano es un gas de efecto invernadero 21 a 25 veces más nocivo que el dióxido de carbono,

a través de la combustión del biogás se reducirá su efecto y el consumo de hidrocarburos y combustibles (carbón, propano, gasolina, diésel, leña).

Se beneficiará a futuras investigaciones de proyectos de generación de electricidad o calor, dado que aporta datos de la forma de obtención del gas por medios anaerobios, proporción entre residuos y agua, subproductos de la digestión, poder calorífico del gas y la forma de almacenamiento del biogás para su posterior utilización en alguna actividad productiva.

5. OBJETIVOS

General

Evaluar el potencial energético del mercado “La Parroquia”, ubicado en la Ciudad de Guatemala.

Específicos

- Identificar la cantidad de residuos biodegradables que se producen diariamente.
- Estimar la producción de biogás por tonelada de residuos biodegradables.
- Calcular la energía presente en el gas generado de forma mensual y anual.
- Clasificar las formas en que puede aprovecharse el biogás generado.

6. NECESIDAD POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

La investigación busca establecer una forma eficiente para el aprovechamiento de los residuos orgánicos generados en el mercado “La Parroquia”, utilizándolos para la generación de biogás y establecer su potencial para fines energéticos.

La causa de la acumulación de residuos que se sufre se deriva de la poca organización entre los comerciantes y las autoridades encargadas, así mismo la falta de interés por parte de la localidad en el manejo apropiado de residuos, tanto orgánicos como inorgánicos, provocando contaminación visual, aparición de plagas y enfermedades a través de la descomposición de desechos. Es evidente entonces que un mejor manejo de los residuos presentará una mejora considerable en las condiciones generales.

Con la generación de biogás reducir la acumulación de sólidos orgánicos al utilizarlo como una futura fuente energética. Por medio de un digestor anaeróbico semicontinuo que permita establecer las condiciones de temperatura, pH, sólidos totales, sólidos volátiles, tiempo de retención, nutrientes de la composición, poder calorífico y cantidad de gas generado para determinar el potencial de los residuos orgánicos como fuente energética.

Los datos obtenidos de la investigación establecerán la capacidad del mercado “La Parroquia” como fuente de producción de biogás para la generación de energía y otras aplicaciones en las que se pueda utilizar gas como combustible, aumentando su uso para reducir el total de emisiones de gases de efecto invernadero. Otros beneficios que se pueden mencionar son la utilización de residuos orgánicos disminuyendo la cantidad que llega a los

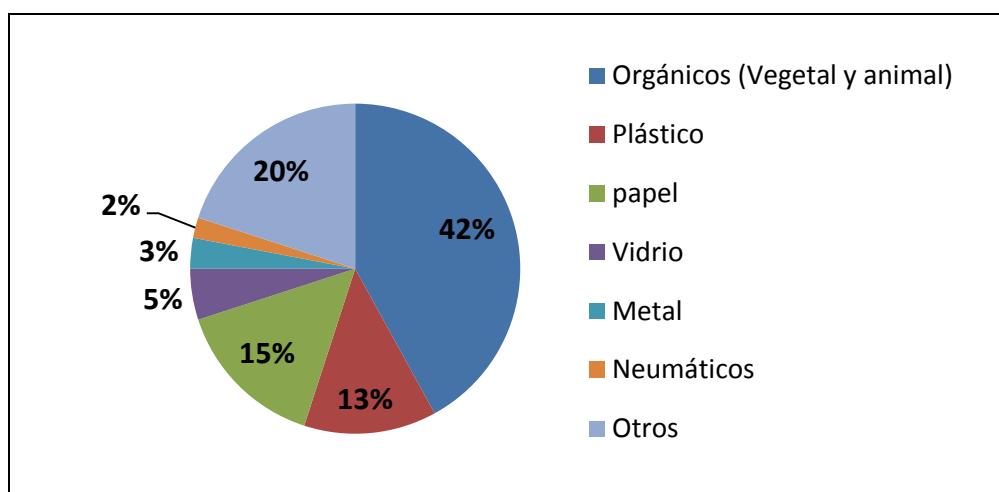
vertederos municipales (relleno sanitario de la zona 3), reducir la cantidad de desechos que pueden llegar a las calles o a los sistemas de alcantarillado municipal, disminuir la contaminación de las fuentes hídricas y reducir la aparición de roedores y olores fétidos; de la misma forma se busca establecer un punto para comparar otros mercados que generan una cantidad similar de residuos y así ser considerados como futuras fuentes de generación para proyectos energéticos.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Residuos sólidos y su gestión

Los residuos sólidos representan toda la materia sobrante o de desecho tanto de procesos industriales como desechos residenciales. Su origen proviene de la actividad humana como de la producción animal, por lo que pueden obtenerse tanto productos orgánicos como inorgánicos, los sólidos orgánicos representan casi el 50% de los desechos generados, el otro 50% representa materia que puede recuperarse, como lo es el papel, plástico, metales, cartón, entre otros. Otra parte de los desechos son los materiales que no se pueden recuperar debido a que son materiales peligrosos, nocivos o inertes, entre los principales podemos encontrar todos los desechos que generan los hospitales, así como los desperdicios generados de la actividad industrial (García, 2016).

Figura 1. Composición de los residuos generados en el 2018



Fuente: elaboración propia basada en datos de la Dirección de Gestión y Manejo de Residuos y Desechos Sólidos de la Municipalidad de Guatemala.

7.1.1. Implicaciones medioambientales

La expansión de la población, la sobreproducción y el uso frecuente de los productos desechables sobre los retornables ha causado que la acumulación de basura sea la principal causa de problemas ambientales en la actualidad. “Un cambio en la mirada desde el concepto de desechar, al de reducir y reutilizar, puede abrir el camino a la mitigación del problema” (Franco, 2019, p. 14).

La deficiente gestión de residuos puede ocasionar la contaminación del suelo y de los cuerpos acuíferos como ríos y lagos, muchos de los cuales son fuentes vitales para el sector económico. En las ciudades y comunidades urbanas puede ocasionar contaminación visual; sumado a ello la irresponsabilidad de los pobladores para el manejo de los desechos arrojándolos a las calles o utilizando áreas que no son rellenos sanitarios, lo que originar olores fétidos y la aparición de insectos y plagas que pueden ser portadores de enfermedades (MARN, 2017) y (Rondón, Szantó, Pacheco, Contreras y Gálvez, 2016).

Figura 2. Acumulación de residuos sólidos en el lago de Amatitlán



Fuente: Prensa Libre. *Alarmante contaminación de ríos y lagos de Guatemala*. Consultado el 16 de agosto de 2020. Recuperado de <https://www.prenslibre.com/guatemala/comunitario/la-alarmante-contaminacion-en-los-rios-y-lagos-de-guatemala/>

7.1.2. Clasificación de los residuos sólidos

Los residuos abarcan una gran variedad que dependen de factores como su procedencia, su naturaleza como desecho o su peligrosidad, a continuación, se menciona algunas de ellas.

7.1.2.1. Segundo su origen

En este tipo podemos clasificar los residuos según la actividad económica de donde provienen, ya sea de origen domiciliar, industrial, hospitalario, construcción y agroindustria. Esta forma de clasificación permite agrupar las actividades de donde provienen los residuos y desechos de una forma general, sin embargo, en algunas ocasiones es más importante conocer la procedencia de los residuos, como lo es en el caso de los residuos hospitalarios o los residuos mineros (García, 2016).

- Domiciliar: Son todos los desechos que provienen de hogares o comercios pequeños, representan una mezcla entre materia orgánica e inorgánica como plástico, vidrio y metales; usualmente no se separan por lo que llegan a los vertederos como una mezcla de residuos (Franco, 2019).
- Industrial: Son los residuos que se generan por la misma actividad industrial, el tipo de residuo dependerá del tipo de industria y su tecnología, pudiendo ser productos de limpieza o derivados del petróleo (García, 2016).
- Hospitalario: Es un tipo de residuo que requiere un manejo especial debido a la actividad a la que está ligada, muchos de estos residuos pueden ser infecciosos, cortantes y fármacos que deben ser desechados de manera especial (Franco, 2019).

- Minero: Estos residuos incluyen los materiales que se obtienen de la remoción de tierras para poder acceder a los minerales requeridos. La minería ha resultado muy controversial en los últimos tiempos debido a los efectos negativos que genera y que en muchos casos afectan a la población aledaña (García, 2016).

7.1.2.2. Según peligrosidad

- No peligrosos: Son todos aquellos materiales que no representan un peligro a las personas o animales, tal es el caso del papel y los metales comunes que no tengan aleaciones con elementos dañinos o estén contaminados de alguna otra forma. (Recytrans, 2013)
- Inertes: Son todos aquellos materiales que son estables con el paso del tiempo, por lo que no produce efectos nocivos al medio ambiente (García, 2016). Los materiales inertes no son solubles, ni tampoco reaccionan químicamente ante la presencia de otros agentes que puedan ser contaminantes o dañinos al ser humano y el medio ambiente, ejemplos de residuos inertes son los desechos de construcción como el ripio, piedrín y tierra (Recytrans, 2013).
- Peligrosos: Es todo residuo que por sus características y propiedades puede causar enfermedades o la muerte, por lo que representa un serio riesgo para la salud del ser humano y del medio ambiente; por lo que deben de ser manejados y desechados de maneras específicas cumpliendo con normativos de seguridad (Recytrans, 2013).

7.1.2.3. Segundo criterio

- Orgánicos: Residuos de origen biológico, en el que podemos incluir restos de alimentos (vegetales, frutas, carnes), hojas y ramas de poda y heces de origen humano y animal.
- Papel: Material hecho a partir de celulosa, entre los que podemos encontrar cartones, periódico, servilletas, papel fotografía y celofán.
- Metales: Todo material metálico ferroso y no ferroso, entre los más comunes encontramos el hierro, acero, cobre, aluminio, estaño, entre otros. La mayoría de los derechos metálicos se encuentra como chatarra o piezas metálicas que ya no tienen uso (tuberías rotas, herramientas desgastadas, entre otros).
- Vidrio: Es un material cerámico hecho a partir de silicio como materia prima, en su mayoría es reciclable y es implementado para diversas aplicaciones en la industria alimenticia (envases para alimentos y bebidas) como en la construcción y en automóviles.
- Plásticos: Es un material sintético que se deriva del petróleo, es un material que tiene infinidad de aplicaciones debido a sus diferentes propiedades según qué tipo de plástico sea (PET, HDPE, PVC, LDPE, PP, PS), su uso masivo en los diferentes ámbitos de la industria y la vida cotidiana hace que sea uno de los principales contaminantes del medio ambiente.

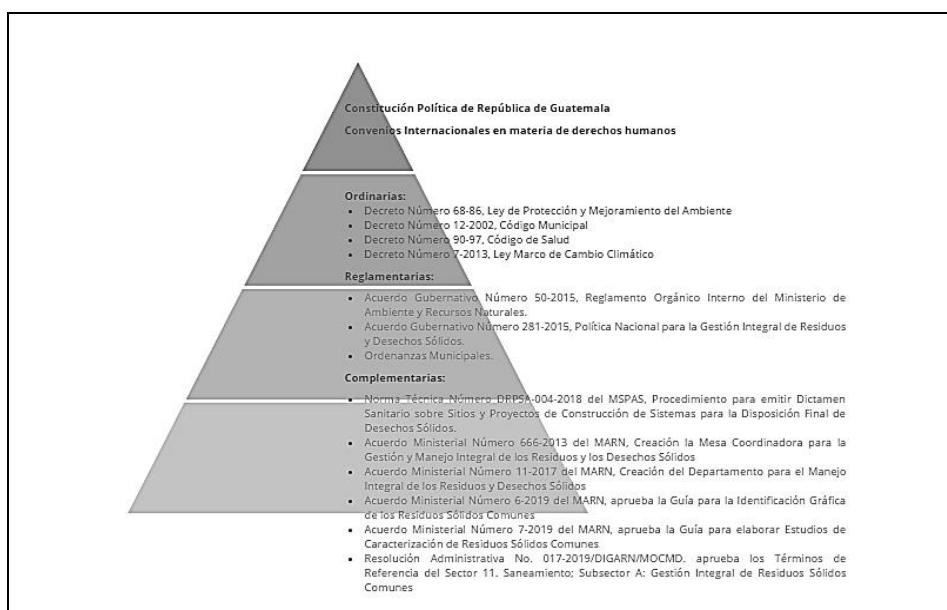
7.1.3. Gestión integral de residuos sólidos en Guatemala

La Política Nacional para la Gestión Integral de los Residuos y Desechos Sólidos tiene como propósito fundamental establecer a través de programas y líneas de política, acciones para minimizar de la manera más eficiente los riesgos a los seres humanos y al ambiente, en especial la

reducción de la cantidad o peligrosidad de los desechos sólidos que llegan a los sitios de disposición final a través de una gestión integral que contribuya al bienestar del ambiente y la salud.

La presente política se enfoca a toda clase de residuo y desecho sólido en general, es una Política Marco que orienta y plantea la necesidad de fortalecer el marco jurídico y normativo en la materia considerando las características en base al origen, composición o peligrosidad de los residuos y desechos sólidos (MARN, 2017, p. 29).

Figura 3. Normativa para la Gestión de Residuos en Guatemala



Fuente: Ministerio de ambiente y recursos naturales. *Normativa*. Consultado el 23 de septiembre de 2020. Recuperado de https://www.marn.gob.gt/s/dsolidos/paginas/Normativa_1

7.1.4. Principios de la Política Integral de Residuos de Guatemala

Las políticas de gestión de residuos se sustentan en los aspectos regulatorios que se relacionan fuertemente con la conservación, protección y cuidado ambiental, por ende, están unidas a las políticas de conservación ambiental vigentes hasta la fecha.

En los convenios internacionales acordados por el gobierno de Guatemala, a efectos de reducir la acumulación de residuos sólidos y emisiones de gases de efecto invernadero, son relevantes las siguientes cuestiones para su funcionamiento:

- Derecho humano a un ambiente sano: todos los pobladores tienen el derecho de vivir en un ambiente saludable que garantice su bienestar y desarrollo seguro.
- Estado facilitador y solidario: el Estado de Guatemala deberá de fomentar, apoyar y dar seguimiento a los proyectos que permitan fortalecer la descentralización económica, política y fiscal de la gestión ambiental y los recursos naturales. Asimismo, tiene el deber de fortalecer las acciones que promueva la participación de los sectores públicos y privados para la gestión integral de los residuos y los desechos sólidos.
- Precautoriedad: el Estado de Guatemala, con la finalidad de proteger al medio ambiente deberá aplicar ampliamente el criterio de gestión integral del riesgo conforme a sus capacidades. “Cuando haya peligro de daño grave o irreversible, la falta de certeza científica absoluta no deberá utilizarse como razón para postergar la adopción de medidas eficaces en función de los costos para impedir la degradación del medio ambiente” (MARN, 2017, p. 37), lo que significa que no es requerida una

comprobación científica para demostrar sus efectos, solamente es necesario saber si genera malestar a la población, por lo que las autoridades de gobierno deberán de tomar las medidas para afrontar el problema social.

- Gestión integral del riesgo: comprende toda acción que prevenga, reduzca y elimine los riesgos para la población y el medio ambiente, es uno de los requisitos fundamentales para lograr la gestión integral de los residuos y desechos sólidos.
- Adaptabilidad: incorpora los efectos del cambio climático y los planes de proyecto para mitigar efectos en la población.
- Desarrollo sostenible: búsqueda de la mejora del desarrollo sostenible y equitativo para el mejoramiento de la calidad de vida de toda la población guatemalteca, sin generar alteraciones dañinas al ecosistema del país.
- Participación ciudadana y pertinencia cultural: promover la participación de toda la población del país sin importar su género, cultura o creencia, promoviendo el dialogo de la correcta gestión de los desechos.
- Educación ambiental con énfasis a la gestión integral de los residuos y desechos sólidos: implementar un diseño y sistema que permita la participación de toda la población, creando hábitos para el manejo de desechos y fomentando su implementación.
- Responsabilidad compartida pero diferenciada: la responsabilidad social y empresarial debe ser reconocida y asumida en forma diferenciada durante el ciclo de vida de los residuos por los diferentes participantes, los cuales son el sector público, privado, entidades de servicio y otras organizaciones de la sociedad civil, así como la población en general. Para ello, las entidades del Estado deben ejercer una constante vigilancia y control en forma coordinada con entidades encargadas de tratar los residuos, con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de las medidas propuestas.

- Responsabilidad extendida: las entidades industriales deberán de implementar propuestas para la utilización de productos y materiales de calidad por medio de la recolección, tratamiento y reutilización o reciclaje de manera ecológica, garantizando la seguridad y salud de la población.
- Sanciones y multas: toda aquella entidad pública o privada que genere residuos deberá de comprometerse con los costos de la gestión integral y en caso de un mal manejo que ocasione repercusiones negativas al medio ambiente, la entidad deberá de hacerse responsable de dicha falta.

7.2. Proceso de digestión

Según Acosta y Abreu (2005):

Dependiendo de las sustancias y materias que forman los residuos, será de efectiva la degradación anaerobia. Mientras más compleja sea la mezcla mayor será el rendimiento de metano. Dicho esto podemos concluir que se requiere de un buen balance entre los nutrientes del sustrato, se plantea que debe regirse con base en la demanda química de oxígeno, buscando no tener un exceso de nitrógeno ya que este puede inhibir el proceso anaeróbico. (p. 39)

Tabla I. Rendimiento de metano según el tipo de sustrato

Componente	% CH ₄	m ³ /kg SV
Carbohidratos (C ₆ H ₁₀ O ₅)	50.0	0.886
Grasas (C ₅₀ H ₉₀ O ₆)	70.0	1.335
Proteínas (6C.2NH ₃ .3H ₂ O)	84.0	0.587

Fuente: Acosta y Abreu (2005). *La digestion anaerobia. Aspectos teoricos parte I.*

7.2.1. Digestión aeróbica

Este proceso consiste en la descomposición de la materia o desechos orgánicos en presencia de oxígeno, este proceso puede observarse en los vertederos al aire libre.

Por este medio los lodos o desechos se someten a una aeración prolongada en un tanque separador expuesto al aire libre, el proceso requiere que la materia orgánica se oxide para proceder a la descomposición, el cual puede requerir de algunos días y exceder por varias semanas dependiendo del tipo de desecho. A medida que avanza la oxidación de la materia, disminuye la tasa de crecimiento de las bacterias. Luego las fuentes de carbono en la materia orgánica se limitan junto con el oxígeno, seguido de ello los microorganismos comienzan a auto-oxidarse al no tener suficiente oxígeno para garantizar su crecimiento (Varnero, 2011).

El proceso de digestión aeróbica presenta grandes ventajas a la hora de implementarse, como lo es la reducción de los malos olores, reducción de sólidos volátiles en los desechos, desinfección del lodo resultante, y un bajo costo de implementación a diferencia de un sistema anaeróbico, sin embargo presenta grandes desventajas como lo son la falta de parámetros para su diseño, presenta una elevada dificultad para separar el lodo por medios mecánicos y presenta una acumulación de sólidos debido a su proceso de reposo (Varnero, 2011).

7.2.2. Digestión anaeróbica

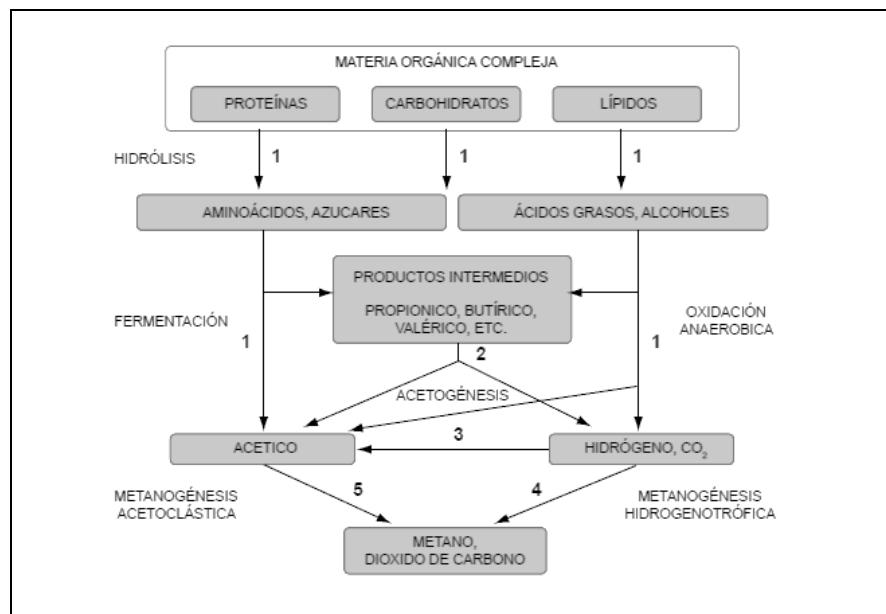
Es un proceso de digestión microbiana en ausencia de oxígeno, que da como resultado una mezcla de gas suspendido (biogás) y lodos donde se encuentran los microorganismos responsables de la fermentación de la materia orgánica.

Por medio de este proceso es posible tratar grandes cantidades de materia biodegradable de origen animal o vegetal (estiércol, vegetación, viseras) y convertirlos en biogás que es su subproducto principal; la cantidad de gas que puede producir depende de la mezcla de residuos, pero se encuentra alrededor de 350l/Kg de sólidos degradables con un contenido de metano alrededor de 70 %. Aunque el gas generado tenga un poder calorífico menor en comparación al gas natural o cualquier otro combustible ($3,500 \text{ kcal/m}^3$), tiene la ventaja de que es un recurso renovable y que puede producirse en casi cualquier lugar que genere desechos, como lo son ciudades, mercados, fincas ganaderas y plantaciones (Acosta y Abreu, 2005).

7.2.3. Principios de la fermentación anaeróbica

La digestión es un proceso complejo en el que están involucradas varias etapas, entre los principales que se encuentran involucradas se mencionan la hidrólisis, la etapa fermentativa, la etapa acetogénica y la etapa metanogénica (Ortiz, 2017).

Figura 4. Diagrama de las reacciones involucradas en la digestión anaeróbica



Fuente: Varnero (2011). *Manual de biogás*.

7.2.3.1. Hidrólisis

Los desechos orgánicos poliméricos no pueden ser utilizados en el proceso de digestión hasta que se hidrolicen en compuestos solubles. La hidrólisis por lo tanto es el proceso en donde los compuestos poliméricos se hidrolizan por enzimas excretadas de bacterias que actúan en el exterior de la célula, convirtiendo de esta forma los polímeros en sus respectivos monómeros para proseguir con las etapas de fermentación (Acosta y Abreu, 2005).

La etapa de hidrólisis puede repercutir en la velocidad del proceso de digestión anaeróbica, en especial si la mezcla de compuestos orgánicos contiene un gran porcentaje de sólidos. Además, que en esta etapa se encuentran otros factores que pueden afectar su proceso como lo son la

temperatura, los niveles de pH, la retención hidráulica, así como la composición propia del sustrato (Varnero, 2011).

7.2.3.2. Etapa Fermentativa

Durante esta etapa los compuestos orgánicos solubles se fermentan, la materia resultante será utilizada por las bacterias metanogénicas y acetogénicas. La importancia del proceso radica que durante esta fermentación se producirán ácidos orgánicos como el acético, el propiónico y el butírico (Acosta y Abreu, 2005).

7.2.3.3. Etapa Acetogénica

También llamada acidogénesis, es la materia resultante de la etapa anterior convertida en ácidos, materiales importantes para la formación de metano. Un tipo de bacteria acetogénica es la homoacetogénica, la cual se prolifera en presencia de azúcares produciendo acetato como producto de su metabolismo (Varnero, 2011).

Luego de que la mayoría de las bacterias anaeróbicas hayan consumido su alimento de los residuos, darán paso a productos ácidos volátiles que son utilizados como sustratos para las bacterias de la etapa metanogénica (Corrales, Romero, Macías & Vargas, 2015).

7.2.3.4. Etapa Metanogénica

En esta etapa se metabolizan los productos de las etapas anteriores, dando como resultado el metano (CH_4), así como una mezcla de hidrógeno y dióxido de carbono, completando el proceso de digestión; aproximadamente el

70% del metano producido en el biodigestor viene de la descarbonización del ácido acético (Acosta y Abreu, 2005).

7.2.4. Microorganismos Involucrados

A continuación, se presentan las bacterias que repercuten en cada etapa del proceso de digestión anaerobia.

7.2.4.1. Bacterias que participan de la hidrólisis

“Entre los microorganismos que contribuyen con esta etapa, destacan los siguientes: *Bacteroides*, *Lactobacillus*, *Propioni-bacterium*, *Sphingomonas*, *Sporobacterium*, *Megasphaera*, *Bifidobacterium*” (Corrales, Romero, Macías & Vargas, 2015, p. 60).

7.2.4.2. Bacterias que participan de la acidogénesis y acetogénesis

En estas etapas contribuyen los mismos microorganismos, entre los que destacan: *Clostridium*, *Paenibacillus* y *Ruminococcus*, también podemos mencionar los *Syntrophobacter* que se especializan en la oxidación de propano y ácidos grasos que contribuirán en la etapa metanogénica (Corrales, Romero, Macías & Vargas, 2015).

7.2.4.3. Bacterias que participan de la metanogénesis

En esta fase la descomposición se ve dominada por un grupo específico de organismos, entre los cuales destacan *Bacteroides*, *Clostridium*,

Bifidobacterium, Sphaerophorus, Fusobacterium, Veillonella, Peptococcus, Desulfovibrio y Methanobacterium (Corrales, Romero, Macías & Vargas, 2015).

Figura 5. **Microorganismos presentes en las 3 etapas de la digestión**

Bacterias aisladas en un reactor anaerobio
Fase no metanogénica
Anaerobicos facultativos
Lactobacillus Spirillum Klebsiella Actinomyces Vibrio Corynebacterium Bacillus Micrococcus Pseudomonas Alcaligenes Sarcina Aerobacter
Anaeróbicos estrictos
Bacteroides Clostridium Bifidobacterium Sphaerophorus Fusobacterium Veillonella Peptococcus Deulfovibrio
Fase Metanogénica
Anaeróbicos extremos
Methanobacterium Methanococcus Methanospirillum Methanobrevibacter Methanomicrobium

Fuente: Acosta y Abreu (2005). *La digestion anaerobia. Aspectos teoricos parte I.*

7.3. Reactores anaeróbicos

El reactor o digestor es la parte principal y donde se llevan a cabo todas las transformaciones químicas y físicas de los residuos orgánicos, contiene la carga de residuos como los gases resultantes, por lo que su hermeticidad debe estar garantizada. Dependiendo de la aplicación o del tipo de materia prima el reactor tendrá distintas configuraciones y componentes que permitirán utilizar los gases y los lodos de maneja segura para la aplicación.

7.3.1. Reactor Continuo

Como su nombre lo indica este tipo de configuración fue diseñado para la alimentación continua de sustratos o residuos sólidos, principalmente aguas negras. Usualmente son plantas de gran tamaño que generan grandes cantidades de gas que se aprovecha en la industria o en poblaciones pequeñas como fuente de energía. (Bautista, 2010)

7.3.2. Reactor Semicontinuo

Es el tipo de configuración más común en áreas rurales o sistemas domiciliares con poca demanda energética que no tenga acceso al servicio eléctrico. Su nombre proviene que la carga de residuos ingresa en el reactor y permanece un tiempo retenido dentro de él, luego es removido el lodo para dar paso a una nueva carga. Entre los reactores más usados de esta configuración se encuentran el tipo Chino y el Hindú (Varnero, 2011).

7.3.3. Reactor Discontinuo o de régimen estacionario

En esta configuración los reactores se cargan completamente con los residuos y luego se sella el reactor, la evolución de la producción de biogás sigue la tendencia de microorganismos por lo que luego de un tiempo de retención la producción de gas disminuye, por lo que se procede a retirar la materia resultante y se carga nuevamente con materia. En esta configuración se pueden usar cualquier residuo con un alto contenido de sólidos, como vegetación o residuos pastosos de ganado (Bautista, 2010).

7.3.4. Componentes de un digestor anaeróbico

El reactor dependiendo del tipo se compone de diferentes partes que contribuyen en el proceso de digestión, a continuación, se denotan las principales:

7.3.4.1. Reactor

Representa el cuerpo del digestor, la parte más importante del sistema ya que dentro de él ocurren los respectivos procesos químicos y físicos para la generación de biogás.

Los reactores pueden tener diversas formas, pero usualmente son cilíndricos o rectangulares, deben ser herméticos para evitar fuga de metano y malos olores, algunos de estos son construidos bajo tierra para facilitar la fluencia de residuos (modelo Chino y modelo Hindú).

7.3.4.2. Cúpula

Representa la parte superior del reactor, dentro de él se almacenan los gases generados por la digestión, pueden ser de ladrillo rígido (tipo Chino) o de polímero en forma de tubo (tipo horizontal). Según Varnero (2011), “tiene como función proteger la estructura del tanque del exceso de presiones positivas causadas por la extracción de lodos en los reactores continuos o semicontinuos” (p. 80).

7.3.4.3. Válvulas de seguridad

La válvula de seguridad se coloca en la tubería del sistema de gas, su función es proteger contra las sobrepresiones de gas que se acumula en la cúpula y la tubería, al detectar dicha presión la válvula se abrirá y dejara escapar gas para recuperar las presiones deseables de operación.

7.3.4.4. Medidor de gas

Medidor que indica el caudal de gas que sale de la cúpula del digestor, cuentan con dispositivos de seguridad y en algunos casos se combinan con válvulas de regulación de caudal.

7.3.4.5. Sistema de gas y quemador

En el sistema de gas se agrupan todos los componentes que permiten el almacenamiento, la conducción y el control del gas del reactor, en ellas podemos agrupar las tuberías de gas, las válvulas de protección, los sistemas de medición de presión y temperatura y los filtros, estos componentes variaran dependiendo de si el gas será usado para generación de energía eléctrica o será quemado en su totalidad.

“Los quemadores son antorchas que como su nombre indica queman el gas sobrante del reactor y en algunos casos queman todo el gas producido del reactor con la finalidad de disminuir la cantidad de metano que ingresa a la atmósfera” (Varnero, 2011, p. 82).

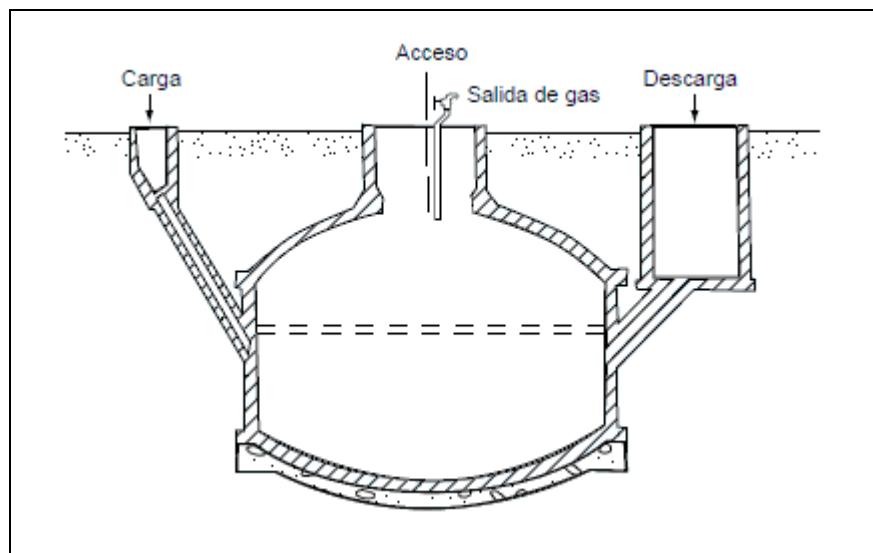
7.3.5. Tipos de reactores para medios rurales

A continuación, se denotan los tipos más comunes en los medios rurales.

7.3.5.1. Modelo Chino

Este reactor consiste en una cámara de gas construida de ladrillos o de hormigón, formada por un cilindro en cuyos extremos se colocan semiesferas que retendrán los residuos en el fondo y el gas en la parte superior. El interior es completamente aislado para evitar filtraciones y la tubería de la entrada esta nivelada en los extremos con la tubería de descarga; el gas se acumula en la cúpula y al no ser flexible su presión incrementa entre 1 y 1.5 m de columna de agua. Este sistema tiene la ventaja de poseer una mayor vida útil debido a su sencilla construcción y funcionamiento, se estima que en China se encuentran funcionando más de 5 millones de estos digestores (Bautista, 2010).

Figura 6. **Biodigestor modelo Chino**



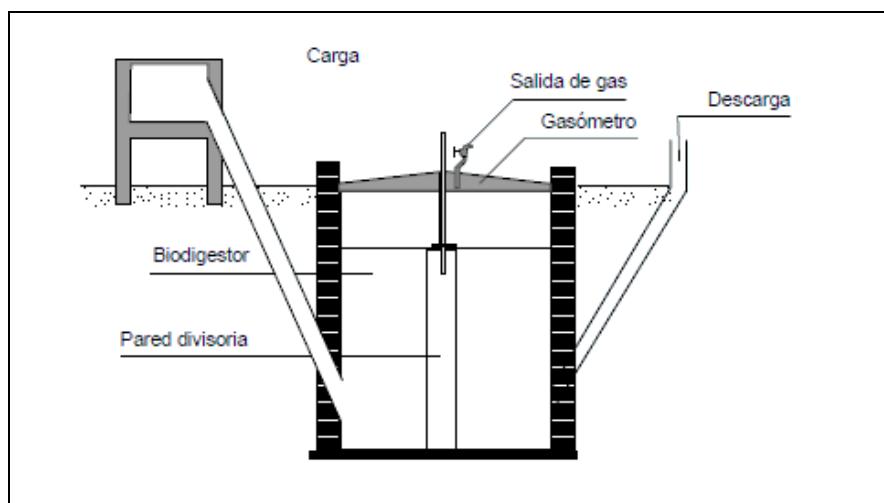
Fuente: Varnero (2011). *Manual de Biogás*.

7.3.5.2. Modelo Hindú

Según Forget (2011):

Consiste en un pozo o tambor hecho de ladrillo y reforzado con hormigón, el domo es de plástico y se desplaza por medio de una guía que se instala en el centro del pozo. Este tipo de reactor es de carga semicontinua y es de sencilla operación; funciona a través de presiones constantes por lo que se comporta de buena manera con equipos alimentados con gas. (p. 12)

Figura 7. **Biodigestor modelo Hindú**



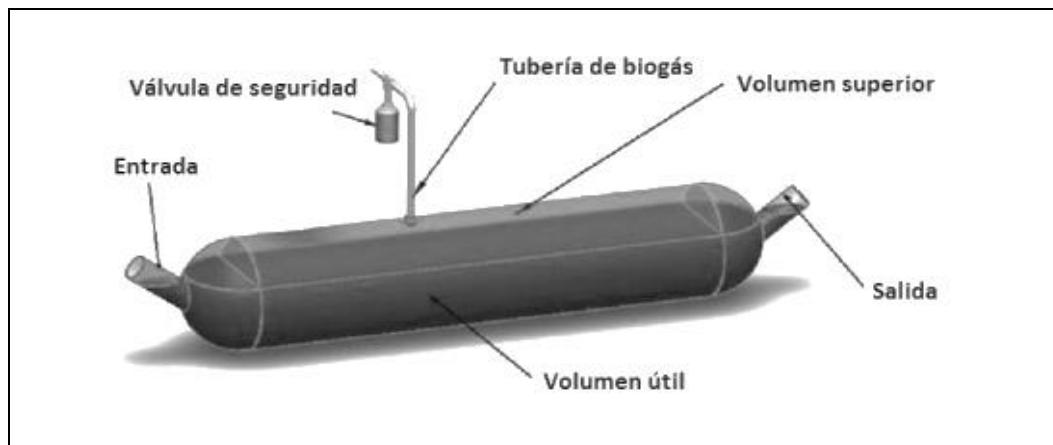
Fuente: Varnero (2011). *Manual de Biogás*.

7.3.5.3. Horizontal

Consiste en un reactor enterrado en una zanja, tiene la particularidad de que no es una estructura fija, sino que es una estructura flexible hecha de nylon, neopreno y polietileno, lo cual disminuye el costo de construcción. Se operan en régimen semicontinuo y se utilizan para volúmenes mayores a 15 m³

debido a la dificultad de construir un pozo para un digestor vertical convencional (Forget, 2011).

Figura 8. Biogestor Horizontal



Fuente: Ecocosas. *Qué es y cómo se hace un biogestor.* Consultado el 23 de septiembre de 2020. Recuperado de <https://ecocosas.com/energias-renovables/biogestor/>

7.3.5.4. Tipo Batch

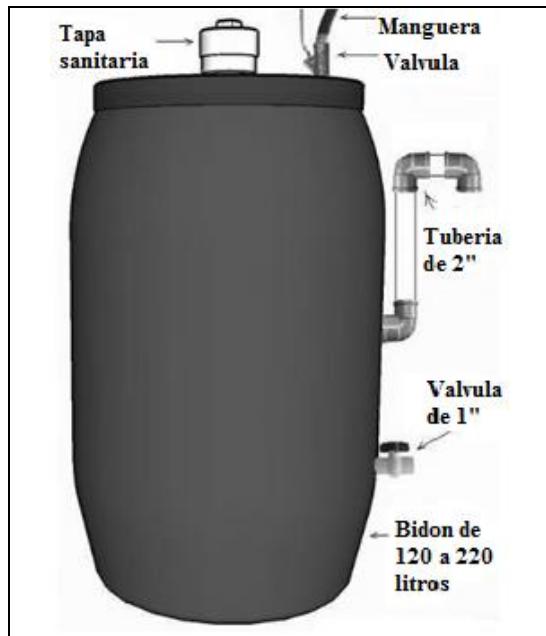
Consiste en un tanque hermético con una salida de gas en la parte superior; se utilizan varios tanques debido a su funcionamiento, mientras que unos se encuentran en la etapa de carga de residuos, los otros se encuentran en la etapa de producción de gas. Este sistema se utiliza en aplicaciones donde se tiene dificultad para la obtención o almacenamiento de la materia prima, así mismo cuando la materia es complicada de digerir metagénicamente.

Las ventajas que presenta este tipo son las siguientes:

- Menor volumen de agua
- Menor volumen de espacio
- No sufre cambios violentos de temperatura
- No requiere cuidado especial

- Puede construirse bajo es suelo

Figura 9. Biogestor tipo Batch



Fuente: Ecoinventos. *Cómo hacer un biogestor casero*. Consultado el 30 de agosto de 2020.

Recuperado de <https://ecoinventos.com/biogestor-casero/>

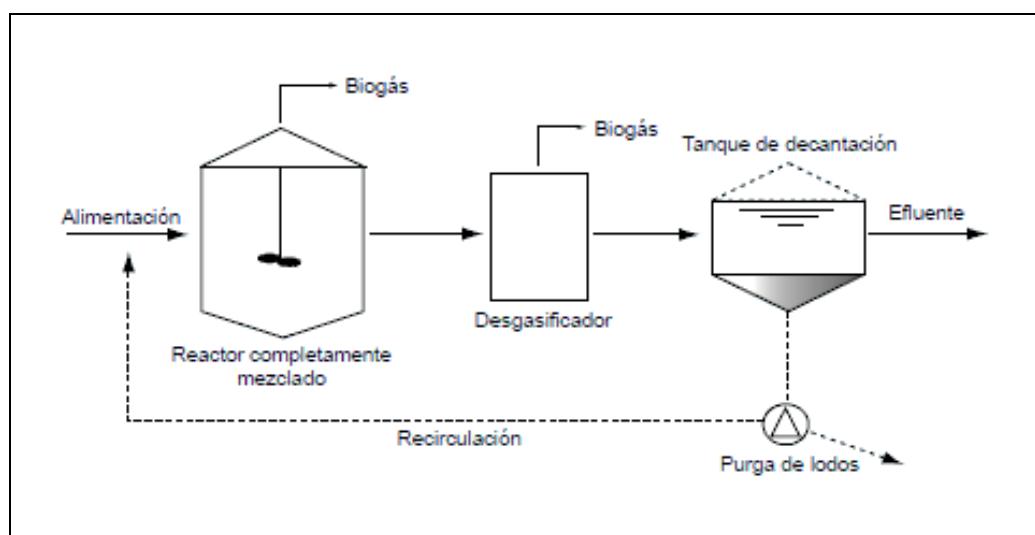
7.3.5.5. Reactor de Alta Velocidad

Son los más usados en la industria, similar al modelo hindú debido a que opera a presión constante, “consta de un sistema de agitación mecánica que permite que la materia que no ha sido digerida entre en contacto con las bacterias, ocasionando un tiempo de retención hidráulica más corto, de aproximadamente 2 semanas” (Bautista, 2010, p. 37).

7.3.5.6. Reactor de contacto

Se compone de un reactor anaeróbico convencional con agitador, donde se pone en contacto el residuo que alimenta el reactor con el residuo que existe dentro del mismo. Este proceso de agitación permite que los compuestos orgánicos se descompongan de manera más uniforme, al mismo tiempo permite reducir la retención hidráulica a un intervalo de 12 a 24 horas. “La eficiencia de todo el proceso está estrechamente ligada a los sedimentos que se generen en el tanque desgasificador antes de ingresar al tanque decantador para seguir con el proceso” (Varnero, 2011, p. 86).

Figura 10. Biogestor de contacto



Fuente: Varnero (2011). *Manual de Biogás*.

7.4. Biogás como fuente energética

El biogás es el principal producto generado de la digestión anaerobia dentro de los reactores, el gas está compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) y en menor medida hidrogeno (H_2), ácido

sulfídrico (H_2S) y nitrógeno (N_2). Su densidad es menor a la del aire y su llama puede alcanzar los 870 °C, Ortiz (2017) establece que “si su contenido de metano cae por debajo del 50 % del volumen producido, el gas deja de ser inflamable, por lo tanto su aplicación para fines energéticos se ven mermadas” (p. 11).

Tabla II. Características generales del Biogás

Valores	Características
	55 - 70% metano
Composición	30 - 45% dióxido de carbono
	Otros gases
Contenido energético	6.0 – 6.5 kwh/m ³
Temperatura de ignición	650 – 750 °C
Presión Crítica	74 – 88 atm
Densidad normal	1.2 kg/m ³
Olor	Huevo podrido en caso de que no haya sido desulfurado
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Equivalente de combustible	0.6 – 0.65 Litros de petróleo/m ³ de biogás

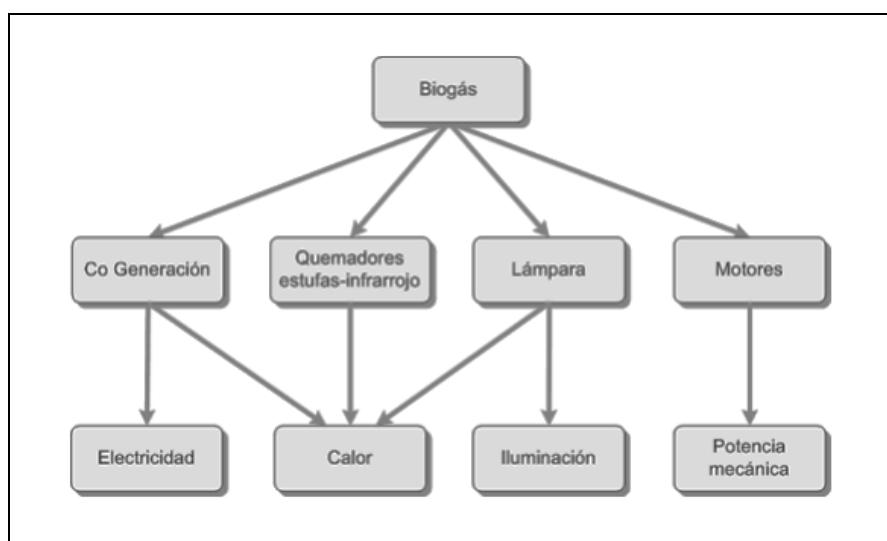
Fuente: Varnero (2011). *Manual de Biogás*.

7.4.1. Aplicaciones para el biogás

El biogás es el producto principal del proceso de digestión, a pesar de poseer un poder calorífico inferior a otros combustibles (metano, propano, gas natural, gasolina), presenta la ventaja de ser un producto renovable, por lo que es prácticamente infinito, aumentando su atractivo y considerándolo como fuente energética en áreas con poco o ningún acceso a la energía eléctrica.

Algunos ejemplos de su aplicación son la producción de calor, la generación de energía eléctrica, como combustible de vehículos o maquinaria y en algunos casos la quema del gas para la reducción de gases de efecto invernadero según políticas medioambientales.

Figura 11. **Aplicaciones del biogás**



Fuente: Bautista (2010). *Sistema de biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos (Estelí, Nicaragua).*

7.4.1.1. Generación de electricidad o calor

Algunos sistemas producen una combinación entre calor y electricidad, siendo la electricidad el producto principal y el calor remanente el producto secundario. “La combinación permite un aumento de eficiencia que no se conseguiría con medios convencionales” (Varnero, 2011, p. 56).

Para la generación de electricidad se utilizan comúnmente motores de combustión interna de ignición por chispa adaptados para funcionar con gas, esto requiere de filtros desulfuradores y trampas de agua que limpian el biogás

antes de entrar a la máquina. Según Bautista (2010) “Para pequeñas centrales de generación se requieren aproximadamente 2.43m³ de gas para producir 3 kwh de electricidad” (p. 27).

7.4.1.2. Combustible de motores

En la actualidad existe una gran cantidad de vehículos y motores que utilizan gas como combustible, la mayoría de estos vehículos son agrícolas, montacargas o adaptaciones para utilizar gas debido a que es más fácil obtenerlo o generarlo en comparación a otros combustibles. “El biogás puede utilizarse debido a que presenta características similares al gas natural” (Varnero, 2011, p. 56).

Sin embargo, presenta desventajas que lo limitan:

- El biogás debe ser purificado antes de almacenarse en tanques de alta presión.
- La conversión de los motores es relativamente costosa y no es tan abundante la red de suministro de gas.
- Se requiere de una inversión elevada para el almacenamiento y generación de biogás para su uso en vehículos.

7.4.1.3. Antorchas de quema de gas

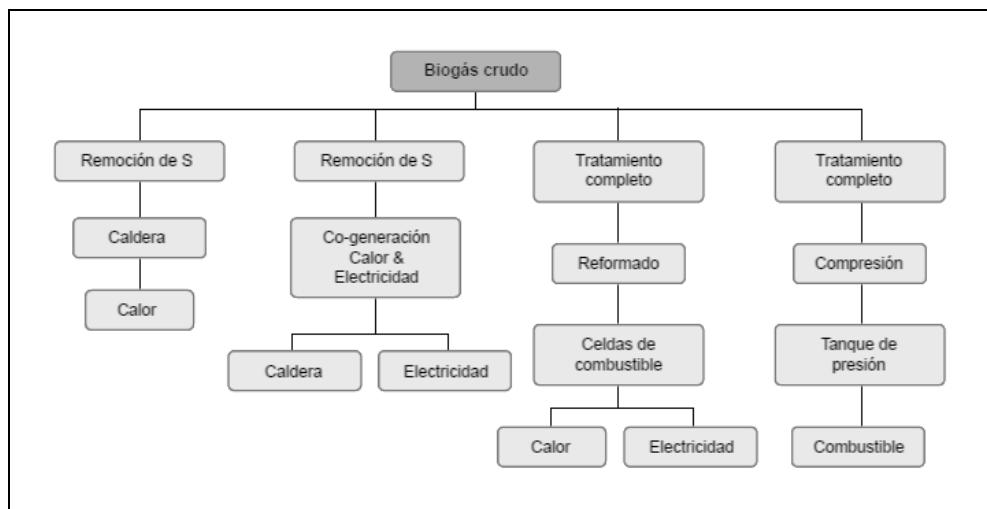
Las antorchas son elementos para la protección del medio ambiente debido a que los productos de la combustión son menos nocivos, reduciendo 21 veces el potencial de gas de efecto invernadero del biogás. Sin embargo, su uso exige un control de emisiones y en la mayoría de las plantas se utiliza como

componente de seguridad para quemar los gases excedentes (EMISON, 2014-2020).

7.4.2. Purificación y adaptaciones para aprovechamiento

El biogás generado en los digestores no es puro, contiene partículas de otros gases que afectan en su rendimiento y el tiempo de vida de los equipos, la purificación permite aumentar el poder calorífico del gas al remover partículas de agua y gases no inflamables, así como cumplir con requerimientos para equipos como calderas, motores, generadores y tuberías (Varnero, 2011).

Figura 12. Alternativas de purificación



Fuente: Varnero (2011). *Manual de Biogás*.

Según consideraciones de Varnero (2011: 57-64), entre las alternativas de filtrado y purificación del biogás encontramos las siguientes:

- Remoción de CO₂: el dióxido de carbono representa entre el 30% y 45% del biogás, con el fin de alcanzar un alto contenido de metano se

procede a separar el CO₂ para que el porcentaje de metano en el gas supere el 95%. Existen diversas tecnologías que permiten remover el CO₂, entre los que destacan diafragmas, adsorción y criogenización.

- Remoción de humedad (vapor de agua): el biogás en su mayoría sale del biodigestor saturado de vapor y humedad que obtiene por la temperatura y composición del residuo en su interior, debido a esto se colocan filtros y trampas de agua para reducir su contenido de humedad.
- Remoción de sulfuro de hidrógeno: el sulfuro es un elemento que debe de extraerse del gas debido a su alta capacidad para corroer metales, su forma de tratamiento es posible gracias a microorganismos, reacciones químicas con compuestos de hierro o filtrado con carbón activo.
- Remoción de oxígeno: no es requerido el filtrado del oxígeno en el biogás, aunque puede realizarse en casos especiales, utilizando filtros de carbón o diafragmas.

7.4.3. Usos del residuo o lodo de digestión

Los residuos o lodos del proceso de digestión son un subproducto de la digestión anaeróbica en los reactores, debido a las reacciones químicas esta materia es rica en elementos minerales, lo que lo convierte en un excelente fertilizante y según el tipo de reactor el lodo puede presentarse de 2 formas:

- Líquido: Generado en biodigestores continuos, presentan un bajo contenido de sólidos totales y presentan una dificultad en empaque y transporte debido a su presentación física.
- Sólido: Proviene de reactores semicontinuos y discontinuos, son los más usados como fertilizantes debido a su presentación similar a otros fertilizantes en el mercado, puede secarse para reducir el contenido de agua que presenta luego del proceso de digestión.

Los lodos de digestión o biofertilizantes representan un beneficio ambiental debido a que sus emisiones de GEI desde su producción hasta su utilización son menores en comparación a otros fertilizantes. “Debido a que son ricos en minerales y pueden obtenerse en grandes lotes, son usados para recuperar los suelos degradados, reduciendo el uso de fertilizantes químicos que son costosos y una fuente importante de emisiones de GEI” (Garra, Pequeño, de la Cruz, 2011, p. 8).

8. HIPÓTESIS

Debido a que la investigación es del tipo cuantitativo explicativo y que no formula un nuevo método para la obtención del biogás, la hipótesis no aplica en dicho caso.

9. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

HIPÓTESIS

RESUMEN DEL MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

1. ANTEDECENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Residuos sólidos y su gestión

2.1.1. Que son los residuos sólidos

2.1.2. Implicaciones medioambientales

2.1.3. Clasificación de los residuos sólidos

2.1.3.1. Según su origen

2.1.3.2. Según peligrosidad

2.1.3.3. Según composición

2.1.4. Gestión integral de residuos sólidos en Guatemala

2.1.4.1. Principios de la Política Integral de Residuos de Guatemala

2.2. Proceso de digestión

2.2.1. Composición de los residuos

2.2.2. Digestión aeróbica

- 2.2.3. Digestión anaeróbica
- 2.2.4. Principios de la fermentación anaeróbica
 - 2.2.4.1. Etapa de fermentación
 - 2.2.4.1.1. Hidrólisis
 - 2.2.4.1.2. Etapa Fermentativa
 - 2.2.4.1.3. Etapa Acetogénica
 - 2.2.4.1.4. Etapa Metanogénica
 - 2.2.4.2. Microorganismos Involucrados
 - 2.2.4.2.1. Bacterias que participan de la hidrólisis
 - 2.2.4.2.2. Bacterias que participan de la acidogénesis y acetogénesis
 - 2.2.4.2.3. Bacterias que participan de la metanogénesis
- 2.3. Reactores anaeróbicos
 - 2.3.1. Configuración de un reactor anaeróbico.
 - 2.3.1.1. Reactor Continuo
 - 2.3.1.2. Reactor Semicontinuo
 - 2.3.1.3. Reactor Discontinuo o de régimen estacionario
 - 2.3.2. Componentes de un digestor anaeróbico.
 - 2.3.2.1. Reactor
 - 2.3.2.2. Cúpula
 - 2.3.2.3. Válvulas de seguridad
 - 2.3.2.4. Medidor de gas
 - 2.3.2.5. Sistema de gas y quemador
 - 2.3.3. Tipos de reactores para medios rurales.
 - 2.3.3.1. Modelo Chino

- 2.3.3.2. Modelo Hindú
 - 2.3.3.3. Horizontal
 - 2.3.3.4. Tipo Batch
 - 2.3.3.5. Reactor de Alta Velocidad
 - 2.3.3.6. Reactor de contacto
- 2.4. Biogás como fuente energética
- 2.4.1. Composición del biogás
 - 2.4.2. Aplicaciones para el biogás
 - 2.4.2.1. Generación de electricidad o calor
 - 2.4.2.2. Combustible de motores
 - 2.4.2.3. Antorchas de quema de gas
 - 2.4.3. Purificación y adaptaciones para aprovechamiento
 - 2.4.4. Usos del residuo o lodo de digestión
3. CONSTRUCCIÓN DE REACTOR EXPERIMENTAL
4. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS
5. OBTENCIÓN DE DATOS
6. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS
7. ANALISIS DE COSTOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

10. METODOLOGÍA

10.1. Tipo de estudio

El presente estudio es del tipo cuantitativo descriptivo, debido a que se enfocará en las características, el potencial calorífico y el volumen de biogás generado, con la finalidad de clasificar al mercado “La Parroquia” como una fuente energética; realizando un ensayo a escala para efectuar las mediciones respectivas junto con el análisis de laboratorio.

10.1.1. Definición de variables

A continuación, se presentan las definiciones de las variables de estudio.

Tabla III. Definición de variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional
Peso de residuos orgánicos	Expresa la fuerza gravitacional que ejerce el planeta Tierra sobre los cuerpos en su superficie y cuya unidad en el sistema internacional es el kilogramo.	Se medirá el peso de los residuos orgánicos en Kilogramos (Kg) antes de entrar al reactor, se requerirá de una balanza semi-industrial.
pH	Según la RAE (2019-2020) es un índice que indica el grado de acidez o alcalinidad de una mezcla o solución.	Se medirá usando tiras reactivas y una escala de colores para corroborar la medida.
Poder calorífico	Según Botta (2018-2020) Cantidad de energía que desprende un material en la reacción de combustión, referida a la unidad de masa de combustible.	Se mide en kilowatt·hora por metro cúbico (kwh/m ³). Se determinará por medio de un ensayo de laboratorio.

Continuación tabla III.

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional
Sólidos totales	Materia sólida que está suspendida, disuelta, o asentada en un líquido y que permanecen luego de la evaporación y secado de una muestra.	Se miden en porcentaje (%). Se determinará su valor por medio de un ensayo de laboratorio.
Sólidos volátiles	Estimación de la cantidad de materia orgánica restante de una solución, luego de la ignición a 550°C eliminando el contenido de agua y gas carbónico.	Se miden en porcentaje (%). Se determinará su valor por medio de un ensayo de laboratorio.
Temperatura	“Magnitud física que expresa el grado o nivel de calor de los cuerpos o del ambiente” (RAE, 2099-2020).	Se medirá en centígrados (°C), utilizando un termómetro de alcohol con un rango de medición de -10°C a 100°C.
Volumen de Biogás	Magnitud física que indica el espacio ocupado en un sistema, en el caso de los gases el volumen del sistema pasa a ser el volumen del gas debido a las propiedades que estos presentan	Se mide en mililitros (ml). Se determinará por medio de una probeta graduada con un sello de agua para evitar fugas.
Volumen de residuos	Magnitud física que expresa la extensión de un cuerpo en tres dimensiones y cuya unidad en el sistema internacional es el metro cúbico (RAE, 2019-2020).	Se medirá en metros cúbicos (m ³). Se utilizará un recipiente de 5 galones de capacidad para el volumen de las muestras y los registros de recolección anual.

Fuente: elaboración propia.

10.2. Fases de estudio

El estudio se compone de diversas fases para su realización, las cuales se enumeran a continuación:

10.2.1. Fase 1. Exploración bibliográfica

En esta fase se procede a revisar la bibliografía relacionada al tema de estudio, así como sus distintos factores a tomar en consideración. Con dicha información se establecerán los parámetros a controlar en la reacción anaerobia, las propiedades del biogás, así como la estimación de la energía que puede obtenerse de los residuos, esto nos permitirá encontrar las aplicaciones más adecuadas con base en la cantidad que puede obtener.

También permitirá ampliar conceptos, definiciones y procesos que nos permitirá controlar de mejor manera la producción de gas y así garantizar la veracidad de los datos del experimento.

10.2.2. Fase 2. Recolección de datos

Se usará el historial de recolección de residuos sólidos del departamento de limpieza de la Municipalidad de Guatemala para estimar la producción de residuos orgánicos de forma mensual y anual. Para la recolección de los datos experimentales se tomarán en consideración los diferentes casos de estudio para la obtención de biogás de materia biodegradable, de la misma forma se evaluarán factores que repercutirán en la experimentación.

10.2.3. Fase 3. Obtención de materia prima

En esta etapa se procederá a la recolección de muestras de los residuos sólidos generados diariamente, recolectando 5 muestras en recipientes de 5 galones en el transcurso de una semana para determinar el porcentaje de residuos orgánicos y no orgánicos. Con base en los registros de recolección de residuos se estimará el volumen y el peso total de residuos de forma mensual y anual.

Tabla IV. Composición de muestras

Descripción	Muestra 1 [%]	Muestra 2 [%]	Muestra 3 [%]	Muestra 4 [%]	Muestra 5 [%]
Orgánicos					
Vidrio					
Metal					
Papel/Cartón					
Plástico					
Otros					

Fuente: elaboración propia.

Una porción de materia orgánica biodegradable de las muestras será enviada a laboratorio para obtener sus características químicas.

Tabla V. Composición química

Símbolos	Composición	Datos
pH	Acido [pH]	
Pr	Proteína [%]	
SV	Sólidos Volátiles [%]	
ST	Sólidos totales [%]	
H	Humedad [%]	
ρ	Densidad [kg/m^3]	

Fuente: elaboración propia, empleando datos de la Unidad de Análisis Instrumental de la

Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad San Carlos de Guatemala.

10.2.4. Fase 4. Determinación experimental

Luego de la recolección de datos históricos y la recolección de muestras de materia orgánica se procede a la etapa experimental, que conlleva la construcción del reactor experimental tipo discontinuo, la medición volumétrica experimental y los cálculos de producción de biogás. A continuación, se detallarán las etapas:

10.2.4.1. Construcción del reactor

El reactor experimental será del tipo discontinuo por sus características de espacio y funcionamiento a escala, conformado por un recipiente cilíndrico de plástico con capacidad de 40 galones, el cual contará con una válvula de salida de abono para la medición de pH en la mezcla, tapa superior con sellado hermético para alimentar el reactor y evitar fugas que afecten la calidad de gas. Cuenta con una válvula en la parte superior que permite la conexión del reactor con el medidor volumétrico.

La construcción del reactor se compone de las siguientes partes:

- Tanque hermético de plástico con capacidad de 40 galones
- Tubería de 3" para alimentación de carga diaria
- Válvula de $\frac{3}{4}$ " para remoción de lodos y toma de muestras de pH
- Válvula de paso para apertura y cierre de la salida del gas
- Manguera de conexión de 3/8" para etapa de medición de gas generado
- Probeta graduada con capacidad de 500ml para medición de gas
- Conector "T" para conexiones de gas
- Termómetro de alcohol graduado de 0 °C a 100 °C

Figura 13. Esquema de reactor



Fuente: Ecoinventos. *Cómo hacer un biodigestor casero*. Consultado el 30 de agosto de 2020.

Recuperado de <https://ecoinventos.com/biodigestor-casero/>

La mezcla de materia orgánica debe ser idealmente de 3 litros de agua por cada litro de materia orgánica, para la preparación se deberá de llenar al 75% de la capacidad del reactor con la mezcla, debiendo estar libre de grasas o químicos que pudieran afectar la formación de microrganismos, debe de tomarse en consideración a la hora de formar la mezcla que el reactor debe contener un 10% de agua antes de agregar la mezcla orgánica, esto para mejorar la etapa de hidrólisis (Varnero, 2011).

Debido a que se analizará el potencial de generación de biogás, es necesario obtener las características de la muestra para realizar la estimación a escala, por lo tanto, es necesaria la obtención de los siguientes datos:

Tabla VI. **Propiedades de la muestra del reactor**

Propiedades	Datos
Volumen residuos orgánicos	
Peso de materia orgánica	
Densidad	

Fuente: elaboración propia.

El volumen de trabajo y la carga diaria de la mezcla se estiman en la siguiente ecuación:

$$VT = CTR * 0.75$$

$$CD = VT / TR$$

Dónde:

- VT: Volumen de trabajo (Litros)
- CTR: Volumen total del reactor (Litros)
- TR: Tiempo de retención (Días)
- CD: Carga diaria (Litros)

10.2.4.2. Medición volumétrica

El volumen total de gas generado por la muestra de residuos es la principal variable a considerar en el experimento, junto con el valor de acidez (pH) que puede afectar a la generación de microorganismos y la temperatura que contribuirá con la velocidad de producción de metano. “El tiempo de retención hidráulica para la región centroamericana se recomienda entre 45 a 60 días” (Varnero, 2011, p. 41).

Se utilizara una probeta graduada con capacidad de 500ml para la medición del volumen de gas del reactor, por medio de un sello de agua que evitara el escape del gas dentro del recipiente y garantizara una medición real.

Figura 14. **Probeta para medición volumétrica**



Fuente: Proinca. Consultado el 15 de octubre de 2020. Recuperado de www.proinca.com.gt.

La siguiente tabla muestra los parámetros a controlar durante el proceso de retención de la mezcla orgánica.

Tabla VII. **Producción de biogás**

Día	Temperatura (°C)	pH	Volumen de gas (ml)
1			
2			
60			
Promedio			

Fuente: elaboración propia.

10.2.4.3. Cálculo de la producción de biogás

Posterior a las mediciones y a la etapa de retención, se procederá a calcular la producción estimada de metano y su máxima generación en el transcurso del experimento.

10.2.4.3.1. Producción de metano

La producción de metano es un parámetro que nos permite establecer la cantidad de metano generado de una muestra orgánica respecto al tiempo de retención a partir del proceso de fermentación (Alvarado, 2017). Se determina de la siguiente manera:

$$PCH_4 = \frac{VCH_4}{PM * T}$$

Donde:

- PCH_4 : producción de metano ($\text{cm}^3/\text{Kg} * \text{día}$)
- VCH_4 : Volumen de gas generado (cm^3)
- PM : Peso de materia disuelta en el reactor (Kg)
- T : tiempo de retención hidráulica (días)

10.2.4.3.2. Máxima producción de metano

“Este parámetro nos permite calcular el límite que puede llegar a producir la mezcla orgánica disuelta, debido a que dependerá de la naturaleza del material a usar y la cantidad de metano producido” (Alvarado, 2017, p. 26). Se calcula de la siguiente forma:

$$PCH_{MAX} = \frac{VCH_4}{SV}$$

Donde:

- SV: sólidos volátiles totales usados en el reactor (kg)
- PCH_{MAX}: máxima producción de metano (cm³/kg)

10.2.4.4. Medición de sustrato biofertilizante

Para el aprovechamiento de la materia de digestión se requiere de analizar químicamente la composición del biofertilizante resultante para determinar sus características y establecer tratamientos posteriores para su utilización como biofertilizante (Garra, Pequeño, de la Cruz, 2011).

Tabla VIII. Análisis químico del biofertilizante

Parámetros	Datos
pH	
Minerales	
Humedad	
N	
C	

Fuente: elaboración propia, empleando datos de la Unidad de Análisis Instrumental de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad San Carlos de Guatemala.

10.2.5. Fase 5. Evaluación del potencial energético del gas

Posteriormente a las mediciones de metano se procede al análisis del gas generado por medio de cromatografía de gases, la cual nos indicara la composición del gas producido (Gutiérrez y Droguet, 2002). La muestra de biogás nos indicara su composición y el poder calorífico del gas según el porcentaje de metano.

Tabla IX. Cromatografía de gases

Parámetros	%
CH ₄	
CO ₂	
CO	
N ₂	
O ₂	

Fuente: elaboración propia, empleando datos de la Unidad de Análisis Instrumental de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad San Carlos de Guatemala.

10.2.6. Fase 6. Análisis de resultados

Se procede a analizar por medio de estadística descriptiva los resultados obtenidos en el experimento y los análisis de laboratorio, determinando la producción neta de biogás de los residuos orgánicos acumulados y su potencial energético. Con base en la relación entre el volumen de residuos generados anualmente y las características de los residuos como fuente de biogás se estimará su potencial energético, la cantidad de energía almacenada en el biogás de forma mensual y anual.

A continuación, se presenta la producción mensual y anual de residuos orgánicos, volumen de biogás generado y el potencial energético estimado en dichos períodos:

Tabla X. Producción mensual

Volumen de residuos (m ³)	Peso de residuos (Kg)	Volumen de gas generado (m ³)	Sólidos totales (%)	Sólidos volátiles (%)	Energía mensual estimada (Kwh)

Fuente: elaboración propia

Tabla XI. Producción Anual

Volumen de residuos (m ³)	Peso de residuos (Kg)	Volumen de gas generado (m ³)	Sólidos totales (%)	Sólidos volátiles (%)	Energía anual estimada (Kwh)

Fuente: elaboración propia

10.2.7. Fase 7. Presentación y discusión de resultados

Por último, se presentarán los resultados y se discutirá respecto a ellos.

11. TÉCNICAS DE ANÁLISIS

La información obtenida del muestreo y la experimentación será clasificada y analizada para su interpretación. Se empleará el software Microsoft Excel 2010 debido a que provee las herramientas para la clasificación y posterior análisis de la información obtenida.

Para ello se utilizarán las siguientes herramientas:

- Tabla de composición de residuos
- Tabla de composición química de residuos orgánicos
- Tabla de propiedades de la muestra del reactor
- Diagrama de producción de biogás
- Diagrama de análisis químico del biofertilizante
- Tabla de cromatografía de gases
- Tabla de producción energética mensual
- Tabla de producción energética anual
- Curva de temperatura, pH y biogás versus tiempo

Las herramientas estadísticas por utilizar para analizar la información serán las siguientes:

- Histograma de generación de desechos en La Parroquia
- Diagrama de máxima y mínima productividad de metano
- Diagrama de producción promedio de biogás
- Diagrama de dispersión de temperatura y pH versus el tiempo.
- Gráfico de energía estimada en producción de biogás

- Tabla comparativa de volumen de biogás y cantidad de sustrato por kilogramo de desechos orgánicos

12. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Tabla XII. Cronograma de actividades

Fuente: elaboración propia.

13. FACTIBILIDAD DE ESTUDIO

El presente trabajo de investigación se realizará con el propio peculio del estudiante, teniendo en cuenta los siguientes recursos:

Tabla XIII. Recursos necesarios para la investigación

Recursos	Costos
Construcción de reactor semicontinuo	Q 819.00
Silicón en spay para sellado de fugas	Q 56.00
Filtro separador de humedad	Q 154.00
Materiales de oficina	Q 60.00
Movilización	Q 50.00
Tiras medidoras de pH	Q 280.00
Probeta graduada 500ml 500:5	Q 70.00
Termómetro de alcohol -10°C~100°C	Q 70.00
Prueba de análisis de gases	Q 1,000.00
Análisis químico de biofertilizante	Q 650.00
Análisis químico de muestras orgánicas	Q 300.00
Asesor	Q 2,500.00
Total	Q 6,009.00

Fuente: elaboración propia

Los recursos aportados por el estudiante se consideran suficientes para cubrir los costos de la investigación, por lo que se considera factible la realización del estudio.

14. REFERENCIAS

1. Acosta, Y. y Abreu, M. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 39(1), 35-48.
2. Alvarado, C. (2017). *Potencial de producción de biogás de los residuos orgánicos biodegradables de la Terminal zona 4* (Tesis de Maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
3. Barillas, S. (2017). *Diseño de un prototipo bioenergético, empleando residuos sólidos orgánicos de la Universidad de San Carlos de Guatemala* (Tesis de Maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
4. Bautista, A. (2010). *Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos:(Estelí, Nicaragua)* (Tesis de Licenciatura). Universidad Carlos III de Madrid, España.
5. Botta, N. (25 de Mayo, 2018). Poder Calorífico [Mensaje en un blog]. Recuperado de www.redproteger.com.ar/poder_calorifico.htm
6. Carrasco, J. (2015). *Evaluación técnica y económica de una planta de biogás para autoabastecimiento energético: Una estrategia para diferentes contextos* (Tesis de Licenciatura). Universidad de Chile, Chile.

7. Corrales, L., Romero, D., Macías, J. y Vargas, A. (febrero, 2015). *Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta*. Nova, 13(24), 55-82.
8. EMISON. (14 de noviembre, 2014). *La función de la antorcha quemadora de biogás en la estación depuradora de aguas residuales* [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/>
9. Forget, A. (16 de junio, 2011). *Manual de diseño y de difusión de biodigestores familiares, con enfoque en biodigestores tubulares*. Lima, Perú. [Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://www.astridforget.com/wp-content/uploads/2015/>
10. Franco, A. (2019). *Caracterización de los residuos sólidos domiciliarios, en la cabecera municipal de San Pedro Sacatepéquez, del departamento de Guatemala* (Tesis de Licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
11. García, G. (marzo, 2016). Situación actual de la gestión integrada de los residuos sólidos en el municipio de Cobán, Alta Verapaz, Guatemala, CA. *Revista Naturaleza, Sociedad y Ambiente*, 3(1), 59-75.
12. Garra, A., Pequeño, M. y de la Cruz, S. (2011). El uso de biofertilizantes en el cultivo del frijol: una alternativa para la agricultura sostenible en Sagua la Grande. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, (159).

13. González, B. (01 de junio, 2019). Los desechos sólidos en la Ciudad de Guatemala [mensaje de un blog]. Recuperado de <http://investigacionparatodos.usac.edu.gt/art%C3%ADculos-principales/item/25-desechos-s%C3%B3lidos>
14. Gutiérrez, M., y Droguet, M. (julio, 2002). La cromatografía de gases y la espectrometría de masas: identificación de compuestos causantes de mal olor. *Boletín Intexter*, 1(122), 35-41.
15. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2017). *Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos*. Guatemala: Autor.
16. Montenegro, K., Rojas, A., Cabeza, I. y Hernández, M. (julio, 2016). Potencial de biogás de los residuos agroindustriales generados en el departamento de Cundinamarca. *Revista Ion*, 29 (2), 23-37. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-100X2016000200023&script=sci_abstract&tlang=pt
17. Ortiz, N. (2017). *Potencial técnico para la producción de biogás, generado a partir de residuos orgánicos producidos en la comuna de Independencia* (Tesis de Maestría). Universidad de Chile, Chile.
18. Real Academia Española (2019). *Diccionario de la lengua española* (23^a edición). Madrid: Autor. Recuperado de <https://dle.rae.es>
19. Recytrans (2013). *Gestión de residuos*. Valencia: Autor. Recuperado de: <https://www.recytrans.com/gestion-de-residuos/>

20. Rondón, E., Szantó, M., Pacheco, J., Contreras, E. y Gálvez, A. (2016). *Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios*. Santiago de Chile, Chile: CEPAL. Recuperado de <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/40407>
21. Rosa, R. (2015). *Producción de biogás en sustrato sólido mediante la digestión anaerobia de pulpa de café*. Xalapa, México: Universidad Veracruzana. Recuperado de <https://cdigital.uv.mx/handle/123456789/41980>
22. Sanabria, O., Sánchez, A. y Rodas, Y. (2018). *Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia a partir de aprovechamiento de sustratos orgánicos (pasto y aserrín), en la ciudad de Estelí en el año 2017* (Tesis de Maestría), Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua.
23. Sánchez, A., y García, V. (diciembre, 2014). Evaluación de la pre-factibilidad de un sistema de generación eléctrica a partir de biogás con estiércol de ganado vacuno o porcino en Cundinamarca. *Tekhnê*, 11(2), 37-50.
24. Varnero, M. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile, Chile: MINENERGIA. Recuperado de https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/manual_de_biogas.pdf

15. APÉNDICES

Apéndice 1. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Matriz de coherencia investigativa

PROBLEMA	OBJETIVOS	VARIABLES	METODOLOGIA	PLAN DE ACCION
<i>Pregunta principal:</i> ¿Cuál es el potencial energético del mercado "La Parroquia", ubicado en la Ciudad de Guatemala?	<i>Objetivo general:</i> Calcular el potencial energético del mercado "La Parroquia", ubicado en la Ciudad de Guatemala	Características del gas generado de residuos orgánicos	Ensayo a escala. Obtención de materia para la experimentación.	Exploración bibliográfica (4 días) Utilizar un biodigestor para la generación de gas, así como para la toma de mediciones de las condiciones del reactor. (60 días)
Preguntas auxiliares: 1. ¿Cuántos residuos son biodegradables del total generado de forma diaria?	Objetivos específicos: 1. Identificar la cantidad de residuos biodegradables que se producen diariamente.	<ul style="list-style-type: none"> • Volumen de residuos orgánicos diarios (m^3) • Porcentaje de residuos biodegradables (%) • Peso de los desechos orgánicos diarios (Ton) 	Clasificación de desechos orgánicos e inorgánicos Análisis químico de los desechos orgánicos	Obtener datos de los tipos de residuos que se generan en el mercado "La Parroquia" y la proporción de residuos orgánicos vegetales (5 días) Envío de muestras al laboratorio y espera de resultados (7 días)

Continuación apéndice 2.

PROBLEMA	OBJETIVOS	VARIABLES	METODOLOGÍA	PLAN DE ACCIÓN
2. ¿Cuánto biogás se puede producir por tonelada de residuos?	2. Estimar la producción de biogás por tonelada de residuos biodegradables.	<ul style="list-style-type: none"> • Volumen de biogás (m^3) • Sólidos totales (%) • Sólidos volátiles (%) • pH • Temperatura ($^{\circ}C$) • Tiempo de retención hidráulica (Días) 	<p>Medición diaria de gas generado</p> <p>Estimación de gas generado mensual y anual de los desechos generados.</p> <p>Análisis químico de las características del biofertilizante producido</p> <p>Mediciones en el sustrato y el digestor</p>	<p>Obtención del volumen total de gas generado en el tiempo de retención de residuos (60 días)</p> <p>Toma de muestras del sustrato y el digestor (60 días)</p> <p>Envío de muestra de fertilizante al laboratorio y espera de resultados (7 días)</p> <p>Hacer una estimación de cuanto gas puede generar de forma mensual y anual con base en los resultados obtenidos del biodigestor (2 días)</p>
3. ¿Cuál es la cantidad de energía que se puede generar mensual y anualmente?	3. Calcular la energía presente en el biogás de forma mensual y anual.	<ul style="list-style-type: none"> • Poder calorífico (Kwh/m^3) • Composición del biogás generado (%) 	<p>Exploración bibliográfica</p> <p>Medición del poder calorífico del biogás</p> <p>Cromatografía del gas resultante.</p>	<p>Exploración bibliográfica (5 días)</p> <p>Envío de muestra de gas generado al laboratorio y espera de resultados (7 días)</p> <p>Hacer una estimación de la cantidad de energía que puede generar de forma mensual y anual el gas obtenido del biodigestor (2 días)</p>
4. ¿De qué forma puede aprovecharse el biogás?	4. Clasificar las formas en que puede aprovecharse el biogás generado.	<ul style="list-style-type: none"> • Listado de aplicaciones para el gas generado 	<p>Ánálisis de resultados de muestreo y pruebas de laboratorio</p>	<p>Hacer el análisis, los resultados y las conclusiones de las pruebas de laboratorio y muestras obtenidas en el experimento (4 días)</p>

Fuente: elaboración propia.