



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN SOBRE LOS LINEAMIENTOS TÉCNICOS Y AMBIENTALES
PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO
DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS GENERADOS EN
LOS MUNICIPIOS DE SAN BENITO Y FLORES**

Paulo Sergio Gabriel Ochaeta Constanza

Asesorado por Msc. Ing. Maynor Godoy Arias

Guatemala, marzo de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN SOBRE LOS LINEAMIENTOS TÉCNICOS Y AMBIENTALES
PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO
DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS GENERADOS EN
LOS MUNICIPIOS DE SAN BENITO Y FLORES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

PAULO SERGIO GABRIEL OCHAETA CONSTANZA
ASESORADO POR MCS. ING. MAYNOR GODOY ARIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO

GUATEMALA, MARZO DE 2022

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 Martinez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Glenda Patricia García Soria
EXAMINADOR	Ing. Jorge Luis Pérez Riverra
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. Romero Neftali López Orozco
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

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 SOBRE LOS LINEAMIENTOS TÉCNICOS Y AMBIENTALES
PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO
DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SOLIDOS URBANOS GENERADOS EN
LOS MUNICIPIOS DE SAN BENITO Y FLORES**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 12 de enero de 2022.

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'P' followed by several loops and a final flourish.

Paulo Sergio Gabriel Ochaeta Constanza



EEPMI-PP-0027-2022

Guatemala, 12 de enero de 2022

Director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica
Presente.

Estimado Ing. Rivera

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN SOBRE LOS LINEAMIENTOS TÉCNICOS Y AMBIENTALES PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS GENERADOS EN LOS MUNICIPIOS DE SAN BENITO Y FLORES**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Gestión y uso eficiente de la energía - Recursos energéticos y su potencial**, presentado por el estudiante **Paulo Sergio Gabriel Ochaeta Constanza** carné número **200113536**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Energía Y Ambiente.


Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Mtro. Maynor Godoy Arias
Asesor(a)

Maynor Godoy Arias
Ingeniero Electricista
Cel. 12312


Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador(a) de Maestría




Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





EEP-EIME-0027-2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN SOBRE LOS LINEAMIENTOS TÉCNICOS Y AMBIENTALES PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS GENERADOS EN LOS MUNICIPIOS DE SAN BENITO Y FLORES**, presentado por el estudiante universitario **Paulo Sergio Gabriel Ochaeta Constanza**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

A handwritten signature in black ink, followed by a circular official stamp. The stamp contains the text: "UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA", "DIRECCIÓN ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA", and "FACULTAD DE INGENIERIA".


Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Director
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica


Guatemala, enero de 2022

LNG.DECANATO.OI.220.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN SOBRE LOS LINEAMIENTOS TÉCNICOS Y AMBIENTALES PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS GENERADOS EN LOS MUNICIPIOS DE SAN BENITO Y FLORES**, presentado por: **Paulo Sergio Gabriel Ochaeta Constanza**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova 

Decana

Guatemala, marzo de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por permitirme culminar una meta más en mi vida y por todas sus bendiciones.
Mis padres	José Ochaeta y María Constanza, por haberme dado la vida, por ser el apoyo y guía incondicional y ser un gran ejemplo para seguir.
Mis abuelos	Un abrazo hasta el cielo, gracias por cuidarme desde allá.
Mi esposa	Elena Cabrera, por su amor, compañía y apoyo durante el proceso.
Mis hijos	Athziri, Eithan e Ithzel Ochaeta, por ser mi motor, por llenar mi vida de mucho amor, espero esto pueda servirles como ejemplo.
Mis hermanos	Gerson y Gabriela Ochaeta, por siempre estar ahí.
Mis amigos	Los de siempre.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por permitirme la oportunidad y el orgullo de formar parte de tan grande institución.
Facultad de Ingeniería	Por abrirme las puertas de sus aulas y permitirme obtener el conocimiento que hoy poseo.
Escuela de postgrado	Por permitirme la oportunidad de culminar este proceso.
Profesores	Por compartir sus conocimientos y experiencias.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
2.1. Contexto general	9
2.2. Descripción del problema	9
2.3. Formulación del problema	10
2.3.1. Pregunta principal.....	10
2.3.2. Preguntas auxiliares	11
2.4. Delimitación del problema	11
3. JUSTIFICACIÓN	13
4. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	17
5. MARCO TEORICO.....	21
5.1. Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos	21
5.2. Elementos que componen la FORSU.....	22
5.3. Impacto de la FORSU en el medio ambiente	23

5.4.	Clasificación de la FORSU en San Benito y Flores según estudio de caracterización realizado en 2020	24
5.4.1.	Fuentes de generación de la FORSU	24
5.4.2.	Cantidades establecidas por tipo de fuente.....	26
5.4.3.	Balance final del estimado de la FORSU en ambos municipios	29
5.5.	Formas de aprovechamiento de la FORSU	30
5.5.1.	Procesos para transformación de la FORSU	30
5.5.1.1.	Biometanización	30
5.5.1.2.	Compostaje	31
5.5.2.	Uso de biodigestores.....	31
5.5.2.1.	Biodigestor	31
5.5.2.2.	Funcionamiento de un biodigestor	32
5.5.2.3.	Tipos de biodigestores	33
5.5.3.	Biogás	35
5.5.3.1.	Producción de biogás.....	36
5.5.3.1.1.	Hidrólisis y fermentación.....	36
5.5.3.1.2.	Acidogénica, acetogénica y deshidrogenación	36
5.5.3.1.3.	Metanogénica.....	37
5.5.4.	Aplicación del biogás.....	38
5.6.	Producción de energía eléctrica.....	38
5.6.1.	Energías renovables	39
5.7.	Métodos de generación con biogás	40
5.7.1.	Calderas y Turbinas de gas.....	40
5.7.2.	Microturbinas.....	41
5.7.3.	Motores de combustión interna	42
6.	PROPUESTA DEL ÍNDICE DE CONTENIDOS	43

7.	METODOLOGÍA.....	47
7.1.	Características del estudio	47
7.2.	Unidades de análisis	47
7.3.	Variables.....	48
7.4.	Fases del estudio	49
7.4.1.	Fase 1.....	49
7.4.2.	Fase 2.....	49
7.4.3.	Fase 3.....	49
7.4.4.	Fase 4.....	50
7.4.5.	Fase 5.....	50
8.	TECNICAS DE ANALISIS DE LA INFORMACIÓN	51
9.	CRONOGRAMA.....	53
10.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	55
11.	REFERENCIAS.....	57

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Generación de residuos por tipo de generador en San Benito.....	27
2.	Generación de residuos por tipo de generador en Flores	28
3.	Generación de residuos por tipo de generador en San Benito y Flores.....	29
4.	Cronograma de ejecución del trabajo de graduación	53

TABLAS

I.	Definición de variables	48
II.	Recursos necesarios para elaboración de la investigación.....	55

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CO₂	Dióxido de Carbono
°C	Grados centígrados
Kcal/Kg	Kilo calorías por kilogramo
kW	Kilo vatio
kWh	Kilo vatio por hora
CH₄	Metano
%	Porcentaje
TW	Tera vatios

GLOSARIO

Anaerobio	Ser vivo capaz de vivir sin oxígeno.
Biodigestor	Recipiente cerrado herméticamente, dentro del cual se produce la descomposición anaeróbica de materia orgánica.
Biofertilizantes	Fertilizante que contiene microorganismos vivos que mejoran el estatus nutricional de las plantas.
Biogás	Gas obtenido por la degradación anaerobia de residuos orgánicos mediante bacterias, que se puede utilizar como combustible.
Biometanización	Proceso biológico que, en ausencia de oxígeno y a lo largo de varias etapas en las que intervienen una población heterogénea de microorganismos, permite transformar la fracción más degradable de la materia orgánica en biogás.
Calderas	Aparato o equipo donde hierve el agua, cuyo vapor en tensión constituye la fuerza motriz de una máquina.
Caracterización	Determinación de las características que distinguen a los distintos tipos de residuos o desechos.

Cogeneración	Producción simultánea de calor y electricidad en una central termoeléctrica.
Compostaje	Elaboración de compost.
Compost	Humus obtenido artificialmente por descomposición bioquímica en caliente de residuos orgánicos.
Energía eléctrica	Se obtiene mediante el movimiento de cargas eléctricas (electrones) que se produce en el interior de materiales conductores.
Gas metano	Hidrocarburo gaseoso e incoloro, formado por un átomo de carbono y cuatro de hidrógeno, que se produce en las minas de carbón y en la descomposición de la materia orgánica.
Gasómetro	Aparato para medir el volumen de gas.
GEI	Gases de efecto invernadero.
Generación eléctrica	Transformación de cualquier tipo de energía como la química, mecánica, térmica, luminosa, en energía eléctrica mediante equipos especiales.
Lixiviado	Tipo de agua que pasa a través de los residuos depositados y que los extrae, disueltos o suspendidos, formando materiales a partir de ellos.

Motores de combustión Es un tipo de máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química de un combustible que arde dentro de la cámara de combustión.

Residuos urbanos son aquellos residuos, basura, desperdicio o desechos que se generan en los núcleos urbanos o en sus zonas de influencia.

Vertederos Lugar establecido para la disposición final de los desechos generados.

RESUMEN

Los residuos y desechos sólidos en la actualidad es uno de los problemas que genera alta preocupación a nivel mundial, el crecimiento demográfico trae consigo un incremento de este tipo de desechos en los poblados en desarrollo, la demanda de utensilios para el diario vivir se ha incrementado principalmente en aquellos de un solo uso, como utensilios para el empaque y consumo de alimentos. Estas amenazas al medio ambiente y a la salud pública, han obligado a los diferentes gobiernos a tomar medidas y acciones que permitan mitigar el problema.

Atendiendo esta problemática, en los municipios de San Benito y Flores, del departamento de Petén, se ha tomado la iniciativa por parte de las municipalidades y otras instituciones, para poder diseñar y luego implementar un modelo de gestión integral de residuos y desechos que puedan mitigar el aumento de vertederos no regulados. En el marco de las acciones para mitigar la problemática, se han realizado en estos municipios ejercicios de caracterización de los desechos y residuos generados, siendo el parteaguas para la realización de la planificación y posteriormente la implementación de programas de gestión integral de residuos y desechos sólidos en estos territorios.

El presente trabajo plantea alternativas para la utilización de los residuos urbanos orgánicos generados por la población de estos dos municipios, como, por ejemplo; la generación de energía eléctrica a partir de gas metano producto de la descomposición anaeróbica de los residuos orgánicos.

Esta investigación se llevará a cabo tomando en cuenta el estudio de caracterización realizado en ambos municipios, para poder obtener un dato de generación de residuos orgánicos diarios, para poder realizar comparaciones con diferentes textos, que nos permitan obtener un estimado de cuánto metano se podría obtener con la cantidad de desechos orgánicos que se generan. El análisis incluirá la recomendación del uso de biodigestores y la capacidad de producción de energía de acuerdo con la cantidad de residuos orgánicos generados.

OBJETIVOS

General

Determinar la capacidad de aprovechamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos generados en San Benito y Flores, para producir energía eléctrica

Específicos

1. Estimar la capacidad de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos para generar biogás como combustible, por medio de un proceso de descomposición anaeróbica.
2. Analizar la forma más eficiente para transformar la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos en combustible para generación de energía eléctrica.
3. Calcular la cantidad de energía eléctrica que se puede generar por la degradación de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos de origen vegetal o animal.

INTRODUCCIÓN

La generación de energía eléctrica es muy importante representando el abastecimiento a los sistemas para poder obtener desarrollo, disfrutar de entretenimiento, conservar alimentos y medicamentos, así como para realizar casi cualquier actividad por la gran cantidad de equipos y elementos eléctricos que existen. Entre las muchas formas que existen para generar Energía Eléctrica, está la que se produce con base en la utilización de biogás como combustible.

El biogás puede ser obtenido a partir de procesos de descomposición o de degradación natural de material orgánico, el cual se puede obtener de la generación de residuos urbanos en cualquier comunidad, ya que es un hecho de que la constante generación de estos se toma como un recurso que siempre está en crecimiento en relación directa con el aumento poblacional que se tiene en general, así como de las comodidades que cada vez más productos nuevos presentan.

La generación de residuos urbanos va en aumento directamente al crecimiento poblacional, por lo que, puede llegar a ser incontrolable o inmanejable si no se toman medidas al respecto. Por eso, en los municipios de San Benito y Flores de manera conjunta por el hecho geográfico de compartir población urbana, se ha tomado la decisión de realizar un estudio de caracterización de los residuos que se generan y saber la producción per cápita en la localidad.

A partir de la realización de esta caracterización, se debe de realizar la propuesta de diferentes formas de manejar los vertederos de maneras

adecuadas y eficientes, como la implementación de plantas de tratamiento de basura, reciclaje, reutilización, y en el caso de los desechos orgánicos, el potencial que estos puedan tener para ser transformados en combustible para alimentar generadores eléctricos.

En el presente trabajo se buscará determinar las características técnicas y ambientales que poseen los residuos orgánicos generados en los municipios de San Benito y Flores, para poder ser sometidos a procesos de degradación o descomposición anaeróbica y así ser transformados en combustible útil para poder abastecer el funcionamiento de uno o varios generadores eléctricos.

La descomposición de los residuos puede darse con la utilización de biodigestores, los cuales mediante procesos descomposición pueden generar biogás, y así poder filtrarlo y almacenarlo de tal manera que se pueda utilizar conforme las necesidades como combustible.

Esta propuesta es una innovación en el departamento de Petén, si bien la generación de energía utilizando biogás son técnicas o procedimientos que se llevan a cabo en otros lugares y que existen más investigaciones que hablan sobre el tema con similares objetivos, dentro de las propuestas para un manejo adecuado de residuos urbanos, no existe hasta el día de hoy un estudio que proponga los resultados buscados en este trabajo.

Al finalizar el trabajo se podrá tener una cuantificación teórica de la cantidad de energía eléctrica que se podrá generar diariamente, a partir de la utilización de los residuos generados en los municipios y las recomendaciones del caso para poder determinar la factibilidad de poder ejecutar un proyecto basado en esta investigación. Para obtener la cantidad de Energía Eléctrica que se puede generar, se realizará la cuantificación teórica de cuando Biogás se

podrá generar con el aporte diario de material orgánico que se genera en los municipios.

La realización de esta investigación es factible, debido a que las municipalidades de ambos municipios están tomando decisiones en cuanto a la mejora del tratamiento de los residuos urbanos generados, por lo que, con la realización del estudio de caracterización en ambos municipios, se ha tenido un avance significativo en busca de las opciones existentes que permitan poder aprovechar los residuos urbanos dependiendo de su origen, en los diferentes procesos que hay para cada tipo.

El desarrollo de la investigación se realizará iniciando con la referencia de antecedentes de estudios previos que tengan relación con la temática del trabajo, realizando consultas de artículos, tesis de maestría o doctorado y se tomarán en cuenta los estudios de caracterización de los residuos generados en los municipios de San Benito y Flores, pues de acá se partirá para el desarrollo de la investigación.

Seguidamente, se desarrolló el marco teórico, el cual servirá como base teórica de los procesos que se incluyen en el desarrollo del trabajo y apoyará el entendimiento de los pasos a seguir para llegar a los resultados esperados y a las conclusiones necesarias de la investigación.

Luego, se desarrollará la metodología de la investigación, en la cual se realiza la comparación de los datos obtenidos en los estudios de caracterización, para poder determinar el estimado de generación de residuos en ambos municipios, para luego hacer una comparativa de investigaciones previas con datos de generación de biogás a partir de utilizar como sustrato la fracción orgánica de los residuos urbanos. Al tener el dato de la cantidad posible de biogás

a generar, se realizará un estimado de la cantidad de energía eléctrica se puede generar utilizando el biogás como combustible, esto será desarrollado comparando datos de consumo de biogás por KW generado según el tipo de elemento utilizado.

Al finalizar la investigación se realizará una presentación e interpretación de resultados de forma gráfica para que se puedan responder las interrogantes de la investigación, y estos resultados puedan ser utilizados por quien corresponda para obtener un beneficio del aporte presentado.

1. ANTECEDENTES

En la actualidad, existen varias investigaciones y proyectos sobre cómo darles un nuevo uso a los residuos urbanos generados en las poblaciones, derivado de la preocupación de los gobiernos locales y nacionales, con el inconveniente que representa la basura en general, y la necesidad de poder evitar el incremento de vertederos controlados y clandestinos, y la contaminación que estos generan al ambiente, lo cual afecta directamente a las poblaciones.

De estas investigaciones se determinan diversas formas de reutilización o de optimización en un nuevo uso de los residuos, indicando estas que el porcentaje de residuos sólidos urbanos (RSU), a los que se les puede dar un nuevo uso asciende aproximadamente al 70 %. De las más importantes formas de reaprovechamiento, se tienen por ejemplo el reciclaje, la utilización del gas metano que es producido por la descomposición natural en los vertederos existentes, combustible para generar calor, transformación de material orgánico que puede ser utilizado para generar electricidad, entre otras.

Entre todas las opciones para mejoramiento del manejo final de los residuos generados por las poblaciones, el beneficio mayor obtenido es una mejoría en la calidad de vida para los habitantes de las poblaciones y del planeta en general. Realizar los procesos indicados representa disminuir, aunque sea en un mínimo porcentaje comparado a los países industrializados, la emisión de gases contaminantes para la atmósfera, los cuales dan lugar a un desmedido efecto invernadero, esto también ayuda a la disminución en la proliferación de plagas, la contaminación de cuerpos de agua, así como a los terrenos vecinos que pueden verse afectados grandemente.

García Solares (2019) en su tesis de maestría titulada *Potencial de biogás producido por la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos en Guatemala*, hace un análisis de diferentes bibliografías con la finalidad de poder determinar el potencial que tiene la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos generados en el país, para poder generar biogás con alto porcentaje de metano, a partir de degradación anaeróbica.

Se ha basado en datos históricos de producción de residuos en el país, para luego realizar cálculos de la cantidad de energía eléctrica que podrá ser generada en cada departamento, basándose en dos modos de producción como lo son Microturbinas y Motores de combustión.

Se determina el potencial total, potencial accesible y potencial disponible de biogás, calculando el mínimo y máximo de cada uno de ellos con dos coeficientes de producción. Con ello, se estima el volumen disponible para la producción del mismo de como mínimo tres mil millones de metros cúbicos para 2018. (García Solares, 2019. XIII).

Como resultado de la investigación, se determinó la cantidad de energía que se puede obtener y el número de productores de biogás podrían ser instalados en el departamento de Guatemala, llegando a la conclusión que pueden ser instaladas más de 3 mil plantas para la producción biogás, con una estimación aproximada de generación eléctrica de 30 MWh. A nivel nacional, se obtuvo el resultado de cual sería la cantidad de energía eléctrica que se podría generar utilizando los equipos como microturbinas y generadores de combustión interna, obteniendo un posible rango de generación que puede estar dentro de los 463 TW y 644 TW durante el año 2018.

En el artículo *Biodigestión anaerobia de residuos sólidos urbanos. Alternativa energética y fuente de trabajo*, López Martínez (2003) trata de dar una explicación como propuesta del uso de biodigestores para el tratamiento o aprovechamiento final de los residuos sólidos urbanos, ya que según diferentes estudios a nivel de Latinoamérica y del Caribe, se muestra que cerca de la mitad de estos residuos es de origen orgánico, por lo que podrían utilizarse para producir biogás y de este proceso poder generar material para mejoramiento de suelos.

En su artículo, López Martínez (2003) describe lo siguiente:

La solución ideal, que es la recuperación del 70 al 90 % de cada uno de los compuestos de los RSU, o "*reciclaje integral*". Se describe en el documento el proceso de digestión de los RSU en biodigestores, los cuales aceleran el proceso natural que sucede en rellenos sanitarios para obtener biogás como combustible, además de estabilizar los RSU que no son utilizados para su aprovechamiento posterior. La solución propuesta permite además retener el lixiviado y controlar algunas variables para acelerar la digestión. (p. 31).

Entre las conclusiones, el autor indica que para mejorar el proceso de descomposición anaeróbica, es importante poder controlar parámetros como la temperatura que debe estar por encima de los 55 °C, así como la humedad de la mezcla, la posibilidad de agregar mezcladores mecánicos y la adición de nutrientes al proceso.

Ya que la generación de desechos sólidos urbanos en general, va en crecimiento de la mano al crecimiento poblacional, es necesario utilizar diferentes maneras de manejar los mismos, y el uso de biodigestores para poder realizar el

proceso de descomposición de los residuos orgánicos será de gran ayuda siempre y cuando sean bien manejados y utilizados, ya que con este proceso se pueden obtener varios beneficios, con lo que los residuos que normalmente serían desechados, ahora se pueden convertir en un material aprovechable.

Se puede revisar la publicación de Arvizu, F. y Huacuz, J (2003) *Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad*, en donde se habla de la importancia de poder utilizar el gas metano producido en los vertederos de basura en México, ya que este es después del uso de los derivados del petróleo, uno de los factores que más contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), por lo que se propone el uso del gas metano generado por la descomposición natural de los residuos en los vertederos para poder generar energía eléctrica.

“El metano representa un poco más del 50 % de los gases que constituyen el biogás, lo que hace a éste un combustible con buenas características para ser usado en turbinas o máquinas de combustión interna que accionen generadores eléctricos” (Arvizu F. y Huacuz, 2003, p. 119)

Derivado de la gran cantidad de basura o residuos que se generan en todo el planeta, y la gran cantidad de vertederos que existen, la posibilidad de poder utilizar el gas metano generado en estos parece ser una buena oportunidad de explotación para poder tener fuentes de producción de energía eléctrica distribuida por el territorio nacional, lo cual podría aportar en la estabilidad de los sistemas de distribución que actualmente operan en el país.

Según la investigación *Energía de la basura* (2010), se observa un estudio técnico en el cual se muestran ensayos de la reutilización de los residuos sólidos generados en las urbes, como energéticos para la generación de energía térmica

por medio del proceso de termólisis, para lo cual se realizaron ensayos de caracterización de los residuos generados en el municipio de Facatativá en Colombia.

Según lo indican Perez, Valencia, Rubiano, Feo, y Cuellar (2010), “El poder calorífico inferior promedio (PCI) de los RSU se encuentra muy cerca del poder calorífico del carbón mineral, lo que los convierte en una fuente de energía atractiva” (p. 124).

De la investigación se puede concluir que el poder calorífico de los residuos sólidos urbanos posee un poder calorífico de 5506.6 Kcal/Kg. Por lo que tomando en cuenta el aumento poblacional, que va de la mano con el crecimiento de generación de los residuos, se concluye que los RSU forman parte de las fuentes de generación de energía térmica primaria. (Pérez et al., 2010).

En los informes realizados por Montoya (2020), *Estudio de caracterización de residuos sólidos del área central del municipio de San Benito, Petén* y *Estudio de catacterización de residuos y desechos sólidos en el municipio de Flores, Petén*, se realiza un muestreo para el estudio de la caracterización de la basura generada en los distintos tipos de generadores que existen en ambos municipios, para clasificarlos como residuos domiciliarios, y residuos no domiciliarios, en donde se toman en cuenta negocios, restaurantes, mercados, tiendas y cualquier otro tipo de actividad que genere residuos. Estos estudios son muy importantes de cara a la posibilidad de aprovechamiento de los residuos, ya que diversas investigaciones dictan un variado número de posibilidades para poder llevar a cabo esto.

Según lo que indica Montoya (2020), en este documento se encuentran dos tipos de clasificación generales: residuos aprovechables y residuos no aprovechables.

El área central del municipio de San Benito, Petén; genera 44.907 Ton/día de residuos sólidos municipales, residuos generados en viviendas domiciliarias y establecimientos comerciales. De los cuales, el 47.45 % corresponde a residuos orgánicos, el 6.19% a residuos sanitarios, el 8.40 % a papel/cartón, el 7.29 % a plástico, el 3.01 % a metal/aluminio, el 3.85 % a vidrio y el 23.81 % a desechos sólidos.

El área de la cuenca del Lago Petén Itzá en el municipio de Flores, Petén; genera 38.722 Ton/día de residuos sólidos municipales, residuos generados en viviendas domiciliarias y establecimientos comerciales. De los cuales, el 49.65 % corresponde a residuos orgánicos (restos de alimentos y jardín), el 0.35 % sobras de huesos, el 0.54 % a restos de madera y derivados, el 7.98 % a papel y cartón, el 8.2 % a plásticos y PET, el 4.37 % a metal y aluminio, el 4.07 % a vidrios, el 0.54 % a hule y cueros, el 2.44 % a peligrosos, el 2.96 % a especiales, el 6.7 % corresponde a desechos sanitarios, el 0.72 % de residuos son derivados de duroport, el 0.43 % a tetrapak y el 11.05 % a otros desechos sólidos. (Montoya, 2020, p. 14-15).

Estos estudios de caracterización de los residuos en los municipios del área central de Petén, surge de la preocupación de ciertos sectores por el crecimiento de los vertederos municipales y del foco de contaminación que estos representan, ya que a través del tiempo se han generado incendios que contaminan el aire y por la naturaleza de estos también contaminan suelos y afluentes de agua, lo cual es perjudicial para la salud de los pobladores. También

se busca como fin el poder tener la construcción de una planta de tratamiento para poder mitigar los efectos negativos que los residuos generan.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Contexto general

Al pasar de los años, la cantidad de basura generada por las actividades humanas de cualquier tipo ha ido en aumento, y esto provoca que la disposición final de los desechos sea un problema cada vez más importante para tomar en cuenta. Existen vertederos controlados y no controlados, por lo que una de las prioridades de las autoridades debería ser crear o reforzar el tratamiento final de los desechos generados por una población para así poder disminuir la contaminación ambiental generada por los desechos o residuos que se generan.

En relación con la gran cantidad de residuos que se genera diariamente, parte importante del problema en cuanto a la gestión de estos se debe a la cultura de desechar los residuos en cada uno de los tipos de generadores que existen, ya que el porcentaje de personas que realizan una separación de sus residuos es muy bajo, sumado a que luego no existe aún una planta de tratamiento que puede disponer y clasificar los distintos tipos de residuos que se generan.

2.2. Descripción del problema

En el área central de los municipios de San Benito y Flores, Petén, los cuales comparten población urbana, se utilizan dos vertederos municipales oficiales, y existen oficialmente dos empresas que se dedican a la recolección de los desechos en los dos municipios. En la actualidad la basura únicamente se recolecta, se lleva al vertedero y luego hay maquinaria en el lugar para mover todos los desechos, sin existir un aprovechamiento de los mismos, por lo que se

ha realizado un estudio sobre la caracterización y clasificación de los residuos en ambos municipios, con la finalidad de poder tener un aprovechamiento de los mismos, y evitar así la saturación desmedida del vertedero, y así generar inconvenientes a los terrenos vecinos y la contaminación en general que se presenta.

En este trabajo, se busca proponer o analizar los resultados obtenidos en los estudios realizados para cada uno de los dos municipios, para el aprovechamiento de los residuos sólidos biodegradables que se generan en ambos municipios, para así poder generar energía eléctrica de manera amigable con el ambiente, utilizando los métodos actuales de generación eléctrica.

Básicamente se busca analizar la mejor forma de utilizar los residuos orgánicos generados por la población para la obtención de biogás, para que este sirva de combustible para poder obtener energía eléctrica, la cual se podría utilizar para compensar los gastos de las entidades municipales y así poder disminuir costos y poder generar ingresos que puedan utilizarse para la mejora del municipio.

2.3. Formulación del problema

A continuación, se describen las preguntas que se formularon para el problema.

2.3.1. Pregunta principal

¿Es posible aprovechar la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos generados en los municipios de Flores y San Benito, Petén, para producir energía eléctrica?

2.3.2. Preguntas auxiliares

- ¿Cuál es la capacidad de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos para generar biogás como combustible, por medio de un proceso de descomposición anaeróbica?
- ¿Cuál es la forma más eficiente para transformar de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos en combustible para generación de energía eléctrica?
- ¿Qué cantidad de energía eléctrica se puede generar por la degradación de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos de origen vegetal o animal?

2.4. Delimitación del problema

La disposición final de los residuos y desechos sólidos es un problema presente en la mayoría de las municipalidades del país, ante esta situación las municipalidades de Flores y San Benito han iniciado con la implementación de programas que buscan la gestión integral de residuos y desechos sólidos, en este marco han realizado la caracterización de sus residuos urbanos con la finalidad de poder atacar el crecimiento de los vertederos y disminuir el impacto ambiental que estos generan.

De la realización de los estudios de caracterización, se ha identificado la problemática de los residuos orgánicos, por lo que se toma la decisión de proponer una potencial solución con la realización de este trabajo de investigación, en el cual se realizará un estimado del potencial de generación de energía eléctrica que se podría obtener del tratamiento correcto de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, para que el resultado de la

investigación pueda ayudar a tener opciones de aprovechamiento de los residuos generados y disminuir así el impacto negativo que estos producen.

El alcance de la propuesta es la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos producidos en los municipios de Flores y San Benito reflejados en las caracterizaciones municipales realizadas por Montoya (2020). Sin embargo, esta metodología puede ser replicada en otros municipios de Petén y/o Guatemala.

3. JUSTIFICACIÓN

La generación de residuos sólidos en las poblaciones urbanas crece proporcionalmente al crecimiento poblacional, por lo que es necesario contar con tratamientos eficientes de los mismos, para poder evitar el crecimiento desmedido de vertederos legales e ilegales en las poblaciones. Para poder evitar problemas presentes y futuros con la disposición final de los residuos, existen diferentes procedimientos que se pueden adoptar y volver eficiente el uso final de los residuos generados.

Con la implementación de diferentes tecnologías que existen actualmente, se puede tener una buena gestión y tratamiento de residuos, para poder tener un uso final aprovechable de los mismos, mediante por ejemplo la utilización de los residuos como recursos energéticos, tomando en cuenta el potencial que cada uno de ellos posee, para poder generar energía eléctrica y poder tener una buena gestión y uso eficiente de la energía que incluye el tratamiento final de los residuos.

En la investigación a realizar, se tendrá la cuantificación del potencial energético que poseen los residuos orgánicos generados dentro de los municipios de San Benito y Flores, Petén, por medio de la obtención de los lineamientos técnicos y ambientales que los mismos poseen, para poder obtener combustible que será el energético utilizado para poder generar energía eléctrica por medio de generadores diseñados para tal necesidad.

Con esto se podrá beneficiar directamente a la población en general de los municipios de San Benito y Flores, ya que esto supondría una reducción en

la cantidad de residuos en el vertedero, mediante el aprovechamiento energético de los mismos.

La aplicación de medidas para la mitigación del incremento de la disposición final de los residuos como la del uso de los residuos orgánicos para la generación de energía eléctrica, o la de reciclaje de residuos varios, de otras formas, evitan la contaminación de los suelos de los terrenos cercanos a los vertederos, así como la contaminación de los mantos freáticos, ya que ambos municipios se encuentran dentro del área de la cuenca del lago Petén Itzá. Con esto se tendrá un impacto positivo en la salud de la población, pues las fuentes de agua y el aire vitaran ser contaminados, y también se reducirá la emisión de GEI.

También se puede obtener un crecimiento de la matriz energética local, y lo que supondría un reforzamiento del sistema de distribución de energía eléctrica por medio de la estabilidad y que supondría la conexión de los generadores al sistema, con esto se puede reflejar una mejora en la calidad de servicio que la distribuidora presta a la población.

Al tratarse de un tema de generación eléctrica tomando como combustible los residuos sólidos generados por la población, mediante el proceso de descomposición anaeróbica, se relaciona la maestría en la parte ambiental con el tema del tratamiento de los residuos, y con la parte de energía, es posible relacionar el uso de los residuos como energético y la generación de energía eléctrica como tal.

Esta propuesta de investigación se enmarca en las siguientes líneas de investigación:

En el área ambiental, se relaciona con la Gestión y tratamiento de residuos: Tecnologías para el tratamiento y gestión de residuos. Esto debido a que se realiza el estudio para poder reducir el impacto que generan los vertederos de cualquier tipo al medio ambiente, utilizando biodigestores para llevar a cabo la descomposición anaeróbica de los residuos, y así poder generar biogás.

En el área energética, la maestría va en los lineamientos de la Gestión y uso eficiente de la energía: Recursos energéticos y su potencial. Ya que se busca poder llegar a determinar teóricamente la cantidad de biogás se puede obtener del procesamiento de los residuos orgánicos, y el potencial que este energético tiene para ser transformado en Energía Eléctrica.

4. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Esta propuesta busca identificar el potencial energético que tienen los residuos orgánicos generados en Flores y San Benito, para poder utilizar procesos de descomposición naturales, y así transformarlos en combustible para poder generar energía eléctrica, para así poder tener un mejor aprovechamiento de estos, y poder evitar que se sigan saturando los vertederos municipales y con esto disminuir la contaminación que la basura genera, y poder aplicar este en la región completa.

Como necesidad prioritaria se marca el poder llevar a cabo una planta de tratamiento acorde a las necesidades de la localidad, con lo que se reducirá el efecto negativo de los vertederos. Sin embargo, es necesario poder darle a la fracción de residuos reutilizables un aprovechamiento sustentable conforme a tratamientos acordes a cada tipo, por ejemplo, el reciclaje o en el caso de la investigación, la reutilización de los residuos orgánicos que podrán servir como materia prima en la producción de biogás, con lo cual se obtiene beneficios como energía eléctrica, biofertilizantes y calor.

Se usaran los datos estimados en los estudios de caracterización de los residuos sólidos realizados por Montoya (2020), proponiendo según el tipo de residuo, el potencial teórico que estos tienen para convertirse en biogás, ya que en la actualidad, no existe ningún estudio que pueda cuantificar el potencial que tienen los residuos orgánicos generados para poder ser reutilizados en el proceso de transformación a combustible para poder generar energía eléctrica específicamente para San Benito y Flores.

Con los resultados de la investigación se podrá dar una propuesta de alternativa a la disposición final de los residuos de los municipios, para así poder contribuir con la reducción de contaminación producto de la disposición final de la basura a cielo abierto y todo lo que esta provoca en términos de contaminación. Dicho esto, la investigación a realizar servirá como una guía para que el resto de los municipios e incluso otros departamentos puedan utilizarla y así poder poner en práctica lo incluido en esta, con lo que supondría llegar a un manejo más eficiente de los residuos dentro de los municipios, y se podrá hacer un estimado de la cantidad de generación de energía eléctrica que puede ser producida con el aprovechamiento de los residuos orgánicos.

La investigación tiene por objeto el reducir la producción de gases de efecto invernadero (GEI), utilizando de forma eficiente los desechos orgánicos urbanos que se generen y transformándolos en energía, reduciendo de esta forma la generación de GEI por los desechos orgánicos que actualmente no son tratados de forma adecuada.

Se determinará la cantidad neta de energía eléctrica que se puede generar a partir de la degradación de los residuos orgánicos de origen vegetal o animal en el área del estudio como combustible. Se utilizará como referencia los datos calculados de generación de desechos para los municipios de San Benito y Flores en estudios anteriores, y mediante análisis teóricos se estimará la cantidad de combustible que se podría generar en un proceso de descomposición de los residuos orgánicos, dependiendo de qué tipo sean.

Este proyecto presenta originalidad en su enfoque, propone un mecanismo sostenible de manejo de los residuos sólidos urbanos generados en los municipios, con una disposición final que mejore las condiciones ambientales de estos territorios.

La propuesta demuestra la pertinencia ante la problemática ambiental que generan la no gestión adecuada de residuos y desechos sólidos en el país, logrando con el planteamiento ayudar en la mitigación de un problema que va en crecimiento constante y que es crítico para la población en general, mediante la implementación de esta propuesta se reducirá el impacto negativo generado por los vertederos a cielo abierto, reduciendo así problemas de salud, contaminación de suelos y mantos acuíferos, así como de la emisión de gases de efecto invernadero.

Se tiene una validez técnica en el desarrollo de la maestría en Energía y Ambiente, ya que busca poner en práctica los conocimientos adquiridos y reforzados, utilizando las herramientas obtenidas en cada uno de los cursos del desarrollo del programa de maestría.

5. MARCO TEORICO

5.1. Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos

Incluidos en los residuos urbanos generados en cualquier población, existen diferentes tipos de residuos dependiendo de su origen, dentro de los cuales se enfocará la parte orgánica que los conforma, la cual está compuesta en su totalidad de residuos de origen biológico, los cuales son sometidos a una acción de descomposición natural y rápida.

Básicamente la fracción orgánica de los residuos está “compuesta por proteínas, aminoácidos, lípidos, hidratos de carbono, celulosa, lignina y ceniza” (Gómez Castaño, 2012, p. 13). Estos residuos al ser sometidos a procesos anaeróbicos, se llega a obtener Biogás como producto y los residuos pueden ser utilizados como enmienda para suelos en mal estado (Rodríguez Perdigón, 2014).

Se puede decir que la Fracción orgánica de los residuos es todo residuo de origen orgánico generado por distintas fuentes dentro de una urbe, entre los más comunes están los residuos de alimentos y residuos vegetales generados por actividades de jardinería y poda, por lo tanto, estos residuos son de generación constante, y por lo tanto es necesario tratarlos ya que, al ser depositados en un vertedero, la descomposición de estos genera contaminación al medio ambiente por medio de gases y otros elementos. Estos pueden ser tratados con procesos aeróbicos y anaeróbicos para fines distintos, ayudando a minimizar el impacto que generan.

5.2. Elementos que componen la FORSU

Según Rodríguez Perdigón (2014), en la tesis de maestría *Viabilidad Técnica para Producción de Biogás a partir de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos -FORSU*, realiza un listado de componentes de las cuales se integra la FORSU, en una caracterización de residuos generados en una población, dentro de los cuales tiene la siguiente composición:

- Residuos vegetales:
 - Cosechas
 - Podas
 - Malezas
 - Preparación de alimentos
 - Alimentos procesados
 - Empaques y/o envases en fibras vegetales
 - Fibras textiles de algodón
 - Papeles, servilletas y cartones
- Residuos animales
 - Excretas y orines de animales
 - Animales muertos
 - Restos de carnes utilizadas para alimento
- Residuos líquidos
 - Leche y derivados
 - Aceites y/o grasas animales
 - Café
 - Té
 - Alcoholes
 - Bebidas azucaradas (p. 32)

5.3. Impacto de la FORSU en el medio ambiente

Conforme pasa el tiempo, la generación de residuos en las ciudades crece de manera no lineal, ya que está ligado este aumento al crecimiento poblacional, y a las comodidades de utilizar productos nuevos, lo que provoca es que la cantidad de residuos sea mayor a las que se generaban hace unos años por el mismo producto. Lo que implica que sea necesario el involucramiento en el tratamiento de los residuos generados en las poblaciones de carácter urgente.

Dentro de los vertederos se tiene una fracción importante de residuos orgánicos producto del modo de vida y del desarrollo de la vida dentro de la población. De la fracción orgánica de los residuos llevada a los vertederos autorizados o no autorizados, se tiene la descomposición natural, lo que produce una cantidad de gases que afectan directamente a la atmósfera y son catalogados como gases de efecto invernadero, entre de dichos gases está en mayor parte el metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y en una mínima cantidad se producen óxidos de nitrógeno (N_2O). (Jantz y Ruggerio, 2021)

Cuando los residuos tienen contacto directo con el agua que cae por precipitaciones o algún otro motivo, a ésta se agregan sustancias que originalmente pertenecen a los residuos, lo cual lleva a la conversión de un fluido tóxico para el suelo y por filtración podría provocar la contaminación de reservorios de aguas, tal como lo explica Giraldo (2014) en su investigación *Tratamiento de lixiviados sanitarios*, “Para empezar, el agua que ha entrado en contacto con la basura recoge gran cantidad de las sustancias que originalmente estaban dentro del residuo, quedando de esa manera altamente contaminada. Esta agua se denomina lixiviado” (p. 44).

Se concluye entonces que los lixiviados tienen varios contaminantes tóxicos tales como altos niveles de materia orgánica, de nitrógeno y de fósforo, además de presencia considerable de patógenos y tóxicos como metales pesados y constituyentes orgánicos (Giraldo, 2014, p. 44).

Se puede decir que el impacto negativo provocado por una disposición última de los residuos de origen orgánico en los vertederos sin ser sometidos a procesos de tratamiento es perjudicial para el ambiente, lo cual lleva a poder incluir planes de manejo y de tratamiento de los residuos, para minimizar los efectos negativos que estos provocan.

5.4. Clasificación de la FORSU en San Benito y Flores según estudio de caracterización realizado en 2020

Por las necesidades surgidas con el crecimiento poblacional en las áreas centrales de los municipios de San Benito y Flores, del departamento de Petén, se presenta la necesidad de poder realizar un estudio de caracterización de los residuos, para poder implementar medidas que ayuden al control y manejo de estos. El estudio se realizó en coordinación de las 2 municipalidades y en la ejecución de las posibles soluciones se verá involucrada la Empresa Municipal de Agua de Petén, entidad que depende de las dos municipalidades y cuenta ya con la estructura necesaria de funcionamiento, con lo que bastará con implementar nuevos puestos para poder llevar a cabo proyectos futuros que deriven de este estudio de caracterización.

5.4.1. Fuentes de generación de la FORSU

Durante el estudio se tomaron básicamente 2 tipos de generadores de residuos, los cuales son viviendas domiciliarias y establecimientos destinados al

comercio, a los cuales en el estudio de caracterización se les ha llamado viviendas no domiciliarias. Básicamente el estudio divide o separa en tres grupos los residuos según su origen, siendo estos los aprovechables, los no aprovechables y los denominados rechazo, que no tienen ninguna opción de dar un nuevo valor.

Dentro de las viviendas domiciliarias se realizó un cálculo matemático utilizando la fórmula propuesta por el doctor Kunitoshi Sakurai:

$$n = \frac{\left(Z^2_{1-\frac{\alpha}{2}} \right) (N) (\sigma^2)}{(N - 1)(E^2) + \left(Z^2_{1-\frac{\alpha}{2}} \right) (\sigma^2)}$$

Donde:

n= número de viviendas a muestrear

N= total de viviendas en el área

$\left(Z^2_{1-\frac{\alpha}{2}} \right)$ = nivel de confianza 95 %

σ^2)= desviación estándar de la muestra

E= error permisible (1 % al 10 %)

Tomando en cuenta que la cantidad de viviendas en San Benito es de 11,166 y en Flores es de 8,509, se ha determinado una muestra total de 102 viviendas en San Benito, y 125 en Flores (divididas en 62 % urbano y 38 % rural).

Para determinar en número de viviendas no domiciliarias, se han tomado en cuenta los siguientes establecimientos, haciendo un cálculo similar al de las viviendas domiciliarias para obtener el número de muestras, teniendo como resultado en San Benito, para un total de 1407 establecimientos, se determina una muestra de 16 establecimientos, y se tomó un dato teórico para iglesias, bancos, escuelas, hospitales y barrido de calles, así como una muestra puntual

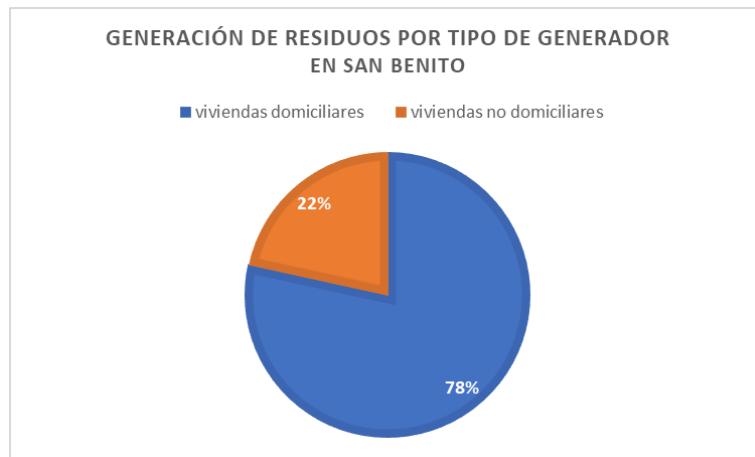
durante 3 días en el mercado municipal. Para el municipio de Flores, se tienen 2,345 establecimientos de los cuales se tomaron 68 muestras, y también 5 datos teóricos y 1 datos con muestras de 3 días para los 2 mercados municipales.

- Auto Lavados (car wash)
- Aceiteras
- Agro veterinarias
- Negocios de construcción
- Restaurantes y comedores
- Panadería
- Oficinas
- Farmacia
- Hotel
- Salón de Belleza
- Auto hotel
- Refresquerías
- Librería
- Iglesia
- Tiendas
- Escuelas
- Gasolineras
- Bancos
- Taller mecánico
- Hospitales y clínicas
- Mercados
- Barrido de calles

5.4.2. Cantidades establecidas por tipo de fuente

Según el estudio realizado por Montoya Cano (2020), *Estudio de caracterización de residuos sólidos del área central del municipio de San Benito, Petén*, en el municipio de San Benito, se tiene una generación de 35.22 Ton/día de residuos generados en viviendas domiciliarias. Mientras que para las viviendas no domiciliarias se tiene una generación diaria de 9.69 toneladas de residuos, por lo que, en total, en el municipio se están generando 44.91 toneladas diarias de residuos.

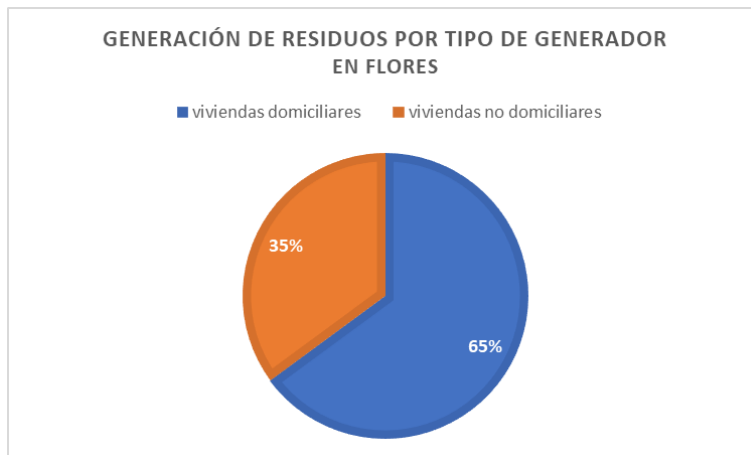
Figura 1. **Generación de residuos por tipo de generador en San Benito**



Fuente: elaboración propia.

Para el municipio de Flores, según indica Montoya Cano (2020), en el *Estudio de catacterización de residuos y desechos sólidos en el municipio de Flores, Petén*, se tiene una cantidad de residuos generada de 25.13 toneladas al día de residuos en las viviendas familiares, y en las viviendas no domiciliarias, se está generando la cantidad de 13.59 toneladas diarias de residuos, tanto en el área urbana como en el área rural. Con lo que se tiene un estimado de 38.72 toneladas de residuos generados en el municipio de Flores.

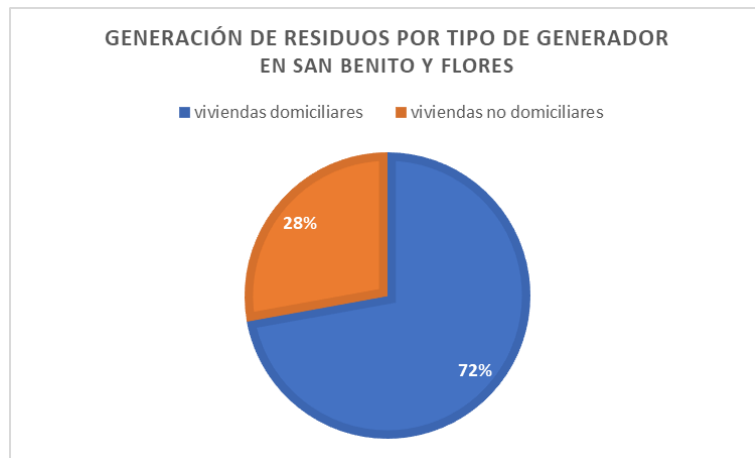
Figura 2. **Generación de residuos por tipo de generador en Flores**



Fuente: elaboración propia.

En resumen, en ambos municipios se tiene una generación de basura total de 60.35 toneladas diarias de residuos en viviendas domiciliarias, y en viviendas no domiciliarias se tienen 23.28 toneladas diarias de residuos generados. En total en el área central del departamento de Petén, se tiene un estimado de generación de residuos de 83.63 toneladas diarias.

Figura 3. **Generación de residuos por tipo de generador en San Benito y Flores**



Fuente: elaboración propia.

5.4.3. Balance final del estimado de la FORSU en ambos municipios

De los estudios realizados por Montoya Cano (2020), *Estudio de caracterización de residuos sólidos del área central del municipio de San Benito, Peté*) y *Estudio de catacterización de residuos y desechos sólidos en el municipio de Flores, Petén*, es posible determinar que el porcentaje de residuos de origen orgánico es mayor en la conformación de la FORSU, ya que el pocentaje arrojado por los estudios es mayor que la de cualquier otro tipo.

En el municipio de San Benito, se tiene que de la totalidad de los residuos un 58.52 % son residuos de origen orgánico, y en Flores el porcentaje de residuos de origen orgánico es de 55.86 % según el estudio realizado. Para el total de datos presentado, se tiene que un 57.09 % de los residuos orgánicos del total generado en ambos municipios.

5.5. Formas de aprovechamiento de la FORSU

Para poder dar un valor y aprovechar la fracción orgánica de los residuos, actualmente existen diferentes métodos. Dentro de estos métodos están la Biometanización y compostaje, que incluso son utilizados de manera artesanal.

5.5.1. Procesos para transformación de la FORSU

Dentro de los procesos de transformación de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, destacan la Biometanización y el compostaje, los que se diferencian en principio por llevarse a cabo el proceso en ausencia o en presencia de oxígeno.

5.5.1.1. Biometanización

El proceso de Biometanización es un proceso en el cual se descompone la materia orgánica sin tener presencia de oxígeno. Tal como indica en el libro *La investigación del grupo especializado de termodinámica de las reales sociedades españolas de física y química volumen 9,* "La Biometanización es una tecnología de degradación biológica de la materia orgánica en un medio anóxico (ausencia total de oxígeno), que produce biogás (mezcla de CO₂ y metano) aprovechable energéticamente" (Segade Zas, Ausín Neira, y Cabeza Gras, 2019, p. 22).

Según Gil (2018), en su tesis doctoral indica que "para poder llevar a cabo el proceso de Biometanización son necesarios unos requerimientos mínimos de nutrientes que se aportan al proceso, así como una adecuada proporción entre algunos de ellos, tales como carbono, nitrógeno y fósforo" (p. 91).

5.5.1.2. Compostaje

Según Bohórquez (2019):

El compostaje consiste en la transformación aerobia de la materia orgánica por parte de diferentes tipos de agentes microbianos como bacterias y hongos; razón por la que es indispensable mencionar los factores físicos, químicos y biológicos, que influyen sobre su metabolismo, con el objetivo de acelerar la descomposición de los residuos utilizados para la obtención de un producto estable de excelente calidad biológica y química. (p. 9).

5.5.2. Uso de biodigestores

Para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, una técnica común es el uso de biodigestores como elemento para poder transformar los residuos en biogás. Esta es una práctica que actualmente se está utilizando a distintos niveles, desde lo artesanal en casas o en fincas pequeñas, hasta en fincas productoras y en la industria es un tema que ya se está trabajando para poder obtener un total aprovechamiento de los recursos utilizados en los procesos. La transformación que sufre la materia orgánica en los biodigestores lo hace de manera anaeróbica.

5.5.2.1. Biodigestor

El biodigestor es un elemento que consta de un proceso para degradación de residuos o material orgánico en un ambiente sin la intervención de oxígeno, en donde se desarrollan microorganismos que ayudan con la transformación y producción de biogás.

“Un BIODIGESTOR es un recinto cerrado herméticamente, donde crecen en anaerobiosis (sin oxígeno), microorganismos; protozoarios, hongos y bacterias, que degradan la materia orgánica disuelta en un medio acuoso; dando como resultado BIOGÁS” (García Páez, 2015, p. 9).

Dependiendo del tipo de material que se vaya a utilizar como sustrato, se pueden obtener diferentes cantidades de biogás, para lo cual será necesario también la identificación ideal del tipo de biodigestor a utilizar.

5.5.2.2. Funcionamiento de un biodigestor

El funcionamiento básico de un biodigestor consta de 4 partes primordiales, independientemente del tipo que se esté utilizando, se depende primero del área o mecanismo de entrada o alimentador del sustrato, un contenedor en donde se realiza la digestión, el espacio dentro del contenedor, para almacenamiento del gas mientras este es producido, el cual puede ser rígido como loza, o puede ser flexible como una bolsa o material elástico. Por último, está la salida o toma de gas, y la salida o caja de descarga del material biofertilizante, el cual servirá como abono.

En el *Manual de Biogás*, Varnero (2011), se explica lo siguiente:

Los principales componentes de un digestor anaeróbico lo constituyen un reactor o contenedor de las materias primas a digerir; un contenedor de gas, con los accesorios para salida de biogás, entrada o carga de materias orgánicas primas y salida o descarga de materias orgánicas estabilizadas. (p. 77).

En resumen, el funcionamiento de un biodigestor, es un depósito en donde se generaran reacciones biológicas entre varioss elementos, lo cual provocará la producción de biogás, separando el material en gas, líquido y lodos. Para lograr este proceso se debe tener un alimentador de materia prima y una salida de material líquido y lodos, los cuales se pueden utilizar como abono para plantas. En algunos casos en donde sea posible se agrega un movimiento al material orgánico mientras sufre la descomposición, para acelerar y mejorar los procesos. El gas generado se almacena en la parte superior del deposito, por lo que en algunos casos se utilizan techos moviles, los cuales se van aumentando el volumen del deposito en cuanto la cantidad de gas crece, y de este se toma la salida de gas para el consumo deseado.

5.5.2.3. Tipos de biodigestores

Básicamente existes 3 tipos de biodigestores, los cuales se diferencian por el tipo de alimentación (carga) que se tenga, y estos son: discontinuos, semicontinuos y continuos. (Castro, 2019).

Según datos recopilados del artículo de Castro (2019) *Biodigestor: para qué sirve, tipos, ventajas, desventajas* se puede indicar lo siguiente:

Discontinuos: también llamados Batch, estos biodigestores funcionan de manera que la carga de materia prima se realiza una sola vez hasta que finaliza el proceso de generación de biogás, el cual se acumula en un colector que flota dentro del biodigestor. Luego de finalizado el proceso se inicia nuevamente luego de una limpieza. Este tipo de biodigestores es ideal cuando la producción de la materia orgánica no es constante, por ejemplo, en la generación de residuos orgánicos residenciales, que no siempre se podrá generar la misma cantidad.

Semi continuos: en este tipo de biodigestor, se realiza la carga de material en plazos de tiempo determinados según la necesidad o la capacidad. En este tipo, debe existir una descarga de líquido equivalente a la cantidad que se está ingresando para iniciar el proceso de biodigestión. De los biodigestores semi continuos, existen tres tipos:

- De globo o salchicha: también llamado biodigestor chino, consiste en un tanque subterráneo construido con material firme, el cual tiene una cúpula como techo, lo que funciona como el espacio del almacenamiento del gas, y contiene un sistema de alimentación, y uno de descarga. La presión del biogás depende la producción que en este se genera.
- De domo flotante: este biodigestor funciona de manera similar al de globo, con la diferencia que éste contiene un gasómetro o tanque flotante, el cual este fabricado de fibra de vidrio con cubierta de plástico o de acero inoxidable. El gasómetro flota sobre la mezcla debido al gas acumulado, y la diferencia con el de globo es que la presión del gas es constante. Debido al movimiento del gasómetro, es necesario fabricar un eje o rieles de movimiento que eviten el roce de este con las paredes de concreto o ladrillo del biodigestor. Este digestor también es llamado hindú.
- Continuos: este tipo de biodigestor es el que mantiene una carga y descarga continua, es decir que constantemente se le está inyectando material orgánico para iniciar la biodigestión, y al mismo tiempo se está realizando la extracción de biofertilizante. Este es usado generalmente para usos industriales y las cantidades de biogás generado es alta, por lo que es necesario el uso de equipos complementarios para completar el proceso, por ejemplo, el uso de bombas en la carga y la descarga, así

como de filtros y procesos de compresión que efficientizan la distribución del biogás.

- También se puede mencionar biodigestores de origen artesanal o caseros, utilizados comúnmente en fincas pequeñas y en hogares que quieren aprovechar los residuos orgánicos que generan de las actividades comunes realizadas. Para los caseros se utilizan depósitos plásticos con tapaderas herméticas, y se conectan mangueras para ingresar los residuos, y válvulas para extraer tanto el gas generado como el fertilizante y lodos. En fincas donde existe producción animal, suele aprovecharse el residuo generado por los animales de crianza, para esto se utilizan bolsas largas en donde se deposita el material orgánico, y se conecta de igual manera elementos para distribuir el biogás para el uso final. En ambos casos se suele utilizar el gas para cocinar y como calor.

5.5.3. Biogás

El biogás es el resultado de un proceso anaeróbico, en donde microorganismos, bacterias, hongos, entre otros ayudan a descomponer materia orgánica, produciendo así biogás, el cual está formado mayormente por gas Metano en hasta un 70 %, Dióxido de Carbono hasta 50 %, y otros gases que no tienen tanto peso como lo son el hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, sulfuro de hidrogeno y ácido sulfhídrico (Machado, 2018).

El biogás es una mezcla de gases, considerado una fuente de energía renovable que se obtiene como resultado de la fermentación de materia orgánica con altas concentraciones de humedad, como lo son los desechos de animales, residuos vegetales, basuras domésticas, aguas residuales industriales o domésticas, entre otros; en condiciones

anaeróbicas mediante la digestión de un grupo de bacterias, que puede suceder en condiciones naturales o en dispositivos específicos como los reactores. (Machado, 2018, p. 1).

5.5.3.1. Producción de biogás

La producción de Biogás básicamente está conformada por tres fases, las cuales se van desarrollando en cadena, mediante la intervención de diversos organismos que ayudan en cada una de las fases. Estas fases son Hidrólisis, Acidogénesis y Metanogénesis.

5.5.3.1.1. Hidrólisis y fermentación

La materia orgánica es descompuesta por la acción de enzimas extracelulares (celulasa, amilasa, proteasa y lipasa) de un grupo de bacterias hidrolíticas anaerobias que hidrolizan las largas cadenas de moléculas solubles en agua, como las grasas, proteínas y carbohidratos, transformándolos en monómeros y compuestos simples solubles. Las bacterias involucradas en esta etapa son Bacterias hidrolíticas y fermentadoras. (García Páez, 2015, p. 27).

5.5.3.1.2. Acidogénica, acetogénica y deshidrogenación

Los alcoholes, ácidos grasos y compuestos aromáticos (compuestos intermedios) se degradan produciendo ácido acético, CO₂ e hidrógeno que son los sustratos de las bacterias metanogénicas. Las bacterias productoras de ácidos, involucradas en este paso, convierten los productos intermedios de las bacterias de fermentación en ácido Acético,

Hidrógeno y Dióxido de Carbono. Estas bacterias son facultativamente anaeróbicas y pueden crecer en condiciones ácidas. Para producir ácido acético necesitan oxígeno y carbono, para esto utilizan el oxígeno disuelto en la solución. Debido a esto, las bacterias productoras de ácido crean una condición anaeróbica que es fundamental para los microorganismos productores de metano. Además, reducen los compuestos de bajo peso molecular a alcoholes, ácidos orgánicos, aminoácidos, CO₂, SH₂ y trazas de CH₄.

Las bacterias involucradas en esta etapa son:

- Bacterias acetogénicas obligadas reductoras de protones de hidrógeno.
- Bacterias homoacetogénicas. (García Páez, 2015, p. 27).

5.5.3.1.3. Metanogénica

En esta etapa, gracias a la actividad de bacterias metanogénicas, se produce metano a partir de compuestos de bajo peso molecular, como el CO₂, el hidrógeno y el ácido acético obtenidos de la etapa anterior. La concentración de hidrógeno juega un papel fundamental en la regulación del flujo del carbono en la biodigestión.

En condiciones naturales, las bacterias que producen metano ocurren en la medida que se proporcionen condiciones anaerobias, por ejemplo, bajo en agua (como e n los sedimentos marinos), en los estómagos de rumiantes y en pantanos. Son obligatoriamente anaerobias y muy sensibles a cambios ambientales; pertenecen al grupo de las

arqueas, y se diferencian de las bacterias acidogénicas fundamentalmente por la estructura de su pared.

Las bacterias involucradas en esta etapa son Bacterias metanogénicas anaeróbicas obligadas. (García Páez, 2015, p. 27).

5.5.4. Aplicación del biogás

El Biogás puede ser utilizado o aprovechado de distintas maneras que nos ayudarán a realizar actividades y generar ahorros y mejorar eficiencias, así como reducir el consumo de productos que generar una afección al medio ambiente, por lo que el desarrollo continuo de esta actividad traerá muchos beneficios desde la residencial, hasta lo industrial.

Según García (2015) en el *Manual de Biogás*, lista un grupo de actividades en las que se puede involucrar el uso del biogás.

- Para cocinar
- Calefacción
- Iluminación
- Motores de combustión interna
- Refrigeración
- Generadores de Electricidad

5.6. Producción de energía eléctrica

La producción de electricidad se puede mencionar como la transformación de algún tipo de energía en movimiento mecánico, que, a su vez, es transmitido a través de distintos mecanismos a un movimiento de un campo magnético, el

cual por la variación que mantiene y las propiedades de materiales, así como la disposición de estos, producirán energía eléctrica, la cual, luego hay que transformar para poder darle el uso final.

Actualmente las matrices energéticas en general siguen dependiendo de los combustibles fósiles para poder cubrir la demanda de cada país. Actualmente el uso de energías provenientes de energéticos renovables están dando un paso para poder reducir cuanto antes el uso de combustibles fósiles, y así ayudar al decrecimiento en la generación de gases de efecto invernadero en cada país.

5.6.1. Energías renovables

Las energías renovables son todas aquellas en donde la fuente o el combustible de operación o de producción es proporcionado por la naturaleza y es de carácter ilimitado. Tal como lo indican Spiegel y Cifuentes (2014), en el artículo Definición e Información de Energías Renovables, “Se denomina Energía Renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen o por ser capaces de regenerarse por medios naturales” (p. 2).

Se clasifican en Convencionales y No Convencionales. “Dentro de las primeras se considera a las grandes centrales hidroeléctricas; mientras que dentro de las segundas se ubica a las generadoras eólicas, solares fotovoltaicos, solares térmicas, geotérmicas, mareomotrices, de biomasa y las pequeñas hidroeléctricas” (Spiegel y Cifuentes, 2014, p. 2).

5.7. Métodos de generación con biogás

Incluida dentro de la variedad de métodos para obtener energía eléctrica por medio de biomasa, es posible indicar que una de estas prácticas es la utilización de material orgánico como materia prima en la generación de biogás como combustible a utilizarse en la variedad de equipos que ayudan o forman parte principal en la obtención de energía eléctrica. Dentro de estos se puede mencionar el uso de calderas que utilizan biogás para alimentar los quemadores, el uso de equipos electrógenos y también se podrán utilizar turbinas que funcionen con biogás.

En la tesis doctoral Diseño de Plantas Renovables de Servicios Auxiliares (Pérez, 2020) indica que “Después de ser purificado, el biogás puede enviarse a una caldera de biogás o a una turbina de biogás que, de manera similar al gas de síntesis, es seguida por un sistema de recuperadores de calor” (p. 18).

5.7.1. Calderas y Turbinas de gas

Básicamente el uso de calderas de biogás es una forma de ahorro para las industrias que implementen este tipo de combustible en los quemadores, ya que el biogás sustituirá a los combustibles fósiles como el carbón o el bunker, teniendo un impacto positivo en las finanzas de la empresa. Para poder contar con la estabilización del suministro a los quemadores, suele combinarse con biomasa para tener asegurada una producción de vapor necesaria.

En su trabajo, Gil Martínez (2017) indica lo siguiente “Las turbinas de gas son turbomáquinas que, de un modo general, pertenecen al grupo de máquinas térmicas generadoras y cuya franja de operación va desde pequeñas potencias

(30 KW para las microturbinas) hasta 500 MW para los últimos desarrollos” (p. 19).

Una de las alternativas que permite utilizar las turbinas de gas de manera que se obtengan buenos rendimientos es su utilización en ciclos combinados en lugar de utilizarlas en ciclos abiertos, de este modo el rendimiento global de la instalación es superior al de la turbina de gas operando en solitario. (Gil Martínez, 2017, p. 19)

5.7.2. Microturbinas

En su tesis de maestría, Gil Martínez (2017) titulada *Propuesta de recuperación del biogás de la EDAR de la fábrica de Heineken de Valencia*, indica lo siguiente:

Las microturbinas son sistemas de cogeneración (obtención de electricidad y calor), adecuados para pequeñas potencias (30 a 200 kW) que pueden utilizar biogás como combustible, ya que las turbinas propiamente dichas no son muy utilizadas para la obtención energética de biogás (trabajan con potencias superiores de 500 kW a 30 MW). (p. 20).

Una de las ventajas que se pueden indicar de las microturbinas, es que pueden operan con un biogás con contenido de metano del 35 %, lo que es menor que en un motor de combustión, sin embargo, el rendimiento de generación eléctrica que se puede obtener está alrededor del 15 al 30 %. De lo anterior se puede decir que las microturbinas son una alternativa efectiva cuando se tienen vertederos en sus etapas finales de explotación, y a los inicios de estos (Gil Martínez, 2017, p. 20).

5.7.3. Motores de combustión interna

El uso de motores es la forma más utilizada de utilización de biogás, sin embargo, estos se deben o pueden usar cuando la generación de biogás es en cantidades grandes (industriales). En este proceso la energía calorífica capturada de los escapes de los motores puede también ser utilizada para diferentes procesos, incluso en la biodigestión de la materia orgánica en el proceso de obtención del biogás.

Para la utilización de estos motores, es necesario realizar una purificación del biogás, para optimizar la operación, y el porcentaje de metano del biogás debe estar por encima del 40 %. El rendimiento energético de estos sistemas puede llegar a ser de un 90 %, ya que la eficiencia eléctrica de estos está en el orden del 35 al 42 %, y el resto es aprovechable en energía calorífica. Por último, se indica que estas configuraciones de uso del biogás son más ecológicas que los usados con combustibles fósiles (Gil Martínez, 2017, p. 21).

6. PROPUESTA DEL ÍNDICE DE CONTENIDOS

INDICE GENERAL

INDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SIMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Contexto General

Descripción del problema

Formulación del problema

Delimitación del problema

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes

2. MARCO TEORICO

2.1. Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos

2.2. Elementos que componen la FORSU

2.3. Impacto de la FORSU en el Medio Ambiente

2.4. Clasificación de la FORSU en San Benito y Flores según estudio de caracterización realizado en 2020

2.4.1. Fuentes de generación de la FORSU

2.4.2. Cantidades establecidas por tipo de fuente

2.4.3. Balance final del estimado de la FORSU en ambos municipios

2.5. Formas de aprovechamiento de la FORSU

- 2.5.1. Procesos para transformación de la FORSU
 - 2.5.1.1. Biometanización
 - 2.5.1.2. Compostaje
- 2.5.2. Uso de biodigestores
 - 2.5.2.1. Biodigestor
 - 2.5.2.2. Funcionamiento de un Biodigestor
 - 2.5.2.3. Tipos de biodigestores
- 2.5.3. Biogás
 - 2.5.3.1. Producción de biogás
 - 2.5.3.1.1. Hidrólisis y Fermentación
 - 2.5.3.1.2. Acidogénica, acetogénica y deshidrogenación:
 - 2.5.3.1.3. Metanogénica
 - 2.5.3.1.4. Aplicación del Biogás
- 2.6. Generación de Energía Eléctrica
 - 2.6.1. Energías renovables
- 2.7. Métodos de generación con biogás
 - 2.7.1. Calderas y Turbinas de gas
 - 2.7.2. Microturbinas
 - 2.7.3. Motores de combustión interna
- 3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACION
 - 3.1. Revisión y análisis del estudio de caracterización
 - 3.1.1. Cantidades de residuos orgánicos generados en San Benito y Flores
 - 3.2. Revisión bibliográfica de investigaciones previas
 - 3.2.1. Potencial de los residuos para generar biogás
 - 3.2.2. Estimación de la cantidad de biogás a producir según la generación diaria de residuos
 - 3.2.3. Estimación de producción de Energía Eléctrica

3.2.3.1. Utilización de microturbinas

3.2.3.2. Utilización de motores de combustión interna

4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

APENDICES

ANEXOS

7. METODOLOGÍA

7.1. Características del estudio

El diseño adoptado será no experimental, pues la información que se utilizará en la investigación será obtenida de estudios previos, y únicamente se utilizarán estos datos para realizar comparaciones teóricas de las características técnicas y ambientales de los residuos orgánicos y el comportamiento de los residuos en el proceso de descomposición anaeróbica a la que serán sometidos.

El enfoque del estudio es cualitativo, ya que no se generarán nuevos datos de estudio, ya que se utilizarán datos generados en un estudio previo de caracterización de residuos residenciales y no residenciales en los municipios de San Benito y Flores, para luego realizar una comparativa con los datos teóricos obtenidos con anterioridad, para llegar a las conclusiones necesarias.

El alcance es descriptivo, dado que únicamente se realizará un análisis de datos experimentales o teóricos previos en busca de poder realizar una comparación de los datos del estudio de caracterización, con lo cual se podrá determinar la cuantificación teórica de la cantidad de biogás que se podrá generar de los datos obtenidos en la caracterización.

7.2. Unidades de análisis

Las unidades de análisis para la investigación, en principio serán los resultados obtenidos en el estudio de caracterización de residuos de los municipios de San Benito y Flores, de los cuales se utilizarán los resultados para

poder hacer una comparativa de la cantidad de residuos orgánicos generados, con datos teóricos obtenidos de bibliografías varias en donde se han realizado estudios de las características de los residuos orgánicos sometidos a procesos de descomposición.

7.3. Variables

Tabla I. **Definición de Variables**

Variable	Definición teórica	Definición Operativa
Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos	Se entiende por fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) a la parte de los RSU constituida por residuos de origen orgánico, como restos de alimentos y cocina, estiércol, poda de árboles, barrido de calles, ramas, paja y plantas.	Se revisará el estudio de caracterización de residuos, para poder obtener la cantidad de residuos que se genera diariamente en la población, y así poder comparar con datos teóricos de generación de biogás.
Generación de energía eléctrica	En general, la generación de energía eléctrica consiste en transformar alguna clase de energía (química, cinética, térmica, lumínica, nuclear, solar entre otras), en energía eléctrica.	Se realizará la comparativa teórica de cantidad consumida de biogás por cada Kwh generado.

Fuente: elaboración propia.

7.4. Fases del estudio

Se describirán a continuación las cinco fases del estudio.

7.4.1. Fase 1

Como primera fase se realizará la revisión y análisis de los resultados obtenidos en el estudio de caracterización previo. De estos datos se obtendrá la cantidad de residuos orgánicos generados por tipo de vivienda, cantidad diaria de generación, que nos serán útiles para poder realizar la comparación teórica de la capacidad de los residuos orgánicos para generar biogás.

7.4.2. Fase 2

La fase 2 consistirá en hacer una comparativa de los datos teóricos de generación de biogás a partir de residuos orgánicos, según su tipo, y con esto se podrá realizar una cuantificación de la capacidad de los residuos generados en San Benito y Flores, para poder generar biogás.

7.4.3. Fase 3

La fase 3 consiste en realizar una revisión de bibliografía que pueda determinar cuál es el tipo de biodigestor que más eficiencia podría generar para la producción de biogás, según la cantidad de material biológico producto de los residuos generados se puedan obtener diariamente.

7.4.4. Fase 4

En esta fase se realizará una comparación teórica de los datos obtenidos del potencial de generación de biogás con los datos teóricos de consumo de los diferentes tipos de aprovechamiento del biogás como combustible para generar energía eléctrica, y con esto se podrá obtener un estimado de producción de energía eléctrica por día.

7.4.5. Fase 5

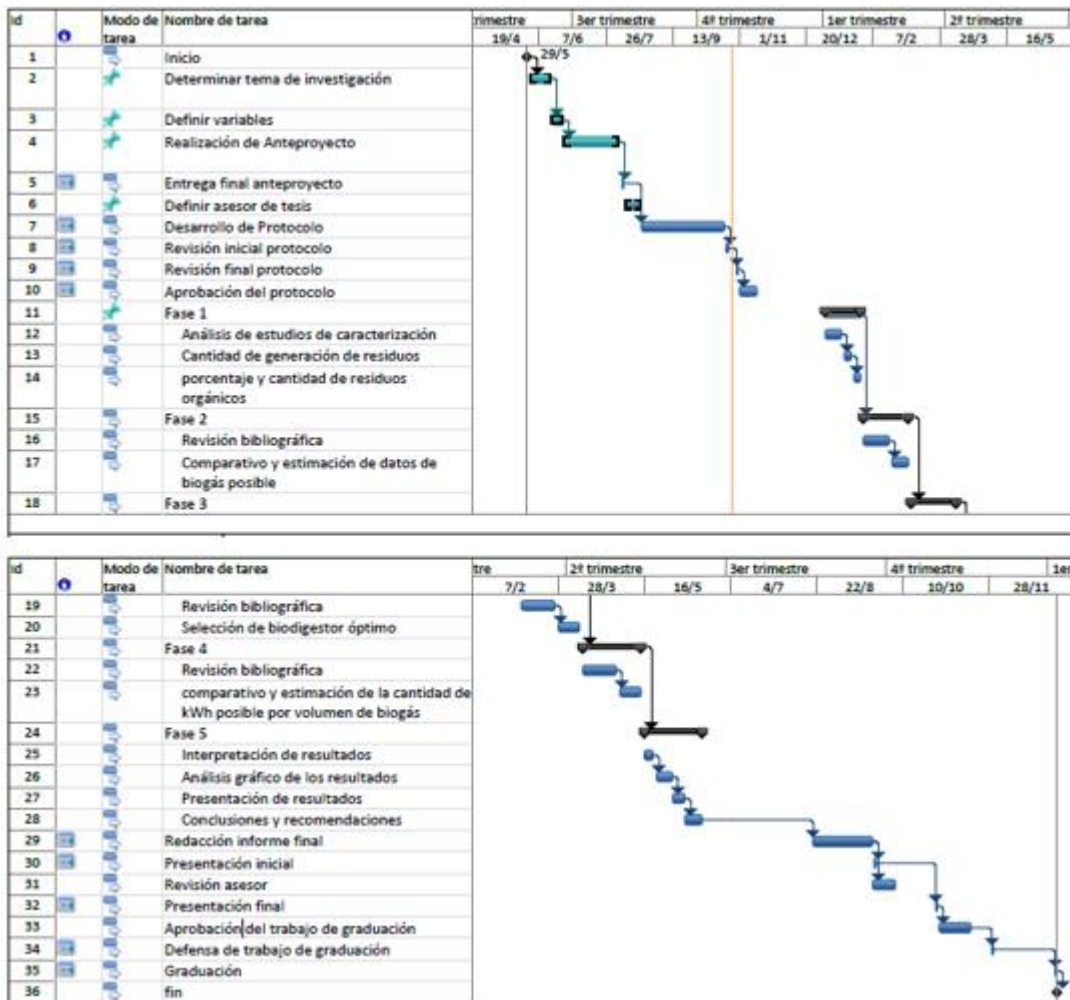
En esta última fase se realizará un análisis general de los resultados obtenidos en la investigación, y del cual se obtienen las conclusiones y recomendaciones sobre la investigación.

8. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

En este estudio no se utilizarán técnicas de análisis de la información. Únicamente se realizarán comparaciones teóricas con base en los datos obtenidos de cantidad de residuos generados en cada municipio, en donde se determinará por datos teóricos, cuanto biogás se puede producir según la generación diaria de residuos orgánicos, y luego estos datos se compararán con los datos teóricos de consumo de biogás para generar KWh según el equipo que se proponga para la generación eléctrica.

9. CRONOGRAMA

Figura 4. Cronograma de ejecución del trabajo de graduación



Fuente: elaboración propia.

10. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Para la realización del trabajo de investigación, se cuenta actualmente con todos los recursos necesarios para poder llevar a cabo cada una de las fases, y se realizará con recursos propios del estudiante de maestría.

El recurso humano que será necesario para la realización de la investigación es el estudiante de maestría, el asesor de tesis y personal implicado en el estudio de caracterización de residuos se fuera necesario.

Los recursos financieros serán aportados 100 % por el estudiante, por lo que no es necesario el trámite de financiamiento externo. Estos se muestran a continuación:

Tabla II. **Recursos necesarios para elaboración de la investigación**

Recurso	Descripción	Precio unitario	Cantidad	Costo
Humano	Estudiante	Q. 1,000.00	6 meses	Q. 6,000.00
	Asesor	Q. 2,500.00	Unitario	Q. 2,500.00
Tecnológico	Computador portátil	Q. 150.00	Energía	Q. 300.00
		Q. 800.00	Depreciación	Q. 1,600.00
	Impresora	Q. 100.00	Tinta y depreciación	Q. 100.00
Acceso a la información	Conexión a internet	Q. 250.00	Plan Mensual	Q. 2,250.00
Infraestructura y servicios	Iluminación	Q. 15.00	Uso de iluminación	Q. 15.00
	Mobiliario	Q. 300.00	Depreciación	Q. 300.00
	Papel	Q. 50.00	Resma de papel	Q. 50.00
			Total	Q. 13,115.00

Fuente: elaboración propia.

El acceso a la información y los permisos están disponibles por parte de las municipalidades de San Benito y Flores, así como del encargado de la realización de los estudios de caracterización y con el visto bueno de personal del MARN involucrado en los temas ambientales en el departamento.

El estudiante se hará cargo de los recursos tecnológicos, como computador e impresora y únicamente se tomará como gasto la depreciación de los equipos. En el tema infraestructura, se utilizarán las instalaciones propias del estudiante, así como áreas de las municipalidades si es requerido en su momento. Se contará con conexión continua a internet para el desarrollo de la investigación, cuyo costo estará a cargo del estudiante.

11. REFERENCIAS

1. Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad (octubre-diciembre, 2003). *Aplicaciones tecnológicas*, IIE (4), 118-123.
2. Bohórquez, W. (2019). *El proceso del compostaje (primera edición ed.)*. Bogotá, Colombia: Ediciones Unisalle. Recuperado de <https://ciencia.lasalle.edu.co/libros/72>
3. Castro, M. (08 de agosto de 2019). Biodigestor: para qué sirve, tipos, ventajas, desventajas [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.lifeder.com/biodigestor/>
4. Dirección de Sustentabilidad, Medio Ambiente y Cambio Climático (2015). *Manual de Biogás. Conceptos básicos. Beneficios de su producción y la aplicación de sus sub-productos*. Plan de Bioeconomía. Buenos Aires: García Páez, Virginia.
5. García, J. (2019). *Potencial de biogás producido por la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos en Guatemala* (tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/13325/1/Juan%20Pablo%20Garc%C3%ADa%20Solares.pdf>

6. Gil, J. (2017). *Propuesta de recuperación del biogás de la EDAR de la fábrica de Heineken de Valencia* (tesis de maestría). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10251/90712>
7. Gil, A. (2018). *Tratamiento de residuos orgánicos industriales y hortofrutícolas mediante biometanización* (tesis doctoral). Universidad de Córdoba, España. Recuperado de <https://helvia.uco.es/bitstream/handle/10396/17556/2018000001850.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
8. Giraldo, E. (Junio, 2014). *Tratamiento de Lixiviados Sanitarios: Avances recientes*. *Revista de Ingeniería* (14), 44-55. Recuperado de <https://ojsrevistaing.uniandes.edu.co/ojs/index.php/revista/article/view/538>
9. Gómez, J. (2012). *Análisis de variables para determinar la viabilidad técnica y económica de la obtención de harina de lombriz a partir de residuos orgánicos* (Tesis de maestría). Universidad EAN, Bogotá. Recuperado de <https://repository.ean.edu.co/bitstream/handle/10882/2589/GomezJenny2012.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
10. Jantz, M., y Ruggerio, C. (Abril-junio, 2021). *Tratamiento de los residuos sólidos orgánicos domésticos como estrategia para la mitigación del impacto ambiental negativo de la gestión de residuos en áreas urbanas*. *Ambiente en Diálogo* (2), 1-26. Recuperado de <http://ojs.opds.gba.gov.ar/index.php/aed/index>

11. López, G. (Septiembre, 2003). *Biodigestión Anaerobica de residuos sólidos urbanos. Alternativa energética y fuente de trabajo*. Tecnura 7(13), 31-43. Recuperado de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/issue/view/537>
12. Machado, M. (Enero, 2018). *Una alternativa numérica en la solución de un sistema que modela la producción de biogás*. Revista Mexicana de Métodos Numéricos (2). Obtenido de https://www.scipedia.com/public/Machado_2017a
13. Municipalidad de Flores (2020). *Estudio de caracterización de residuos sólidos del área central del municipio de Flores, Petén*. Petén: Montoya Cano, Carlos Trinidad.
14. Municipalidad de San Benito (2020). *Estudio de catacterización de residuos y desechos sólidos en el municipio de San Benito, Petén*. Petén: Montoya Cano, Carlos Trinidad.
15. Perez, M., Valencia, J., Rubiano, J., Feo, D., y Cuellar, E. (2010). *Energía de la basura*. Tecnura 14(26), 118-125. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257019810012>
16. Pérez, S. (2020). *Diseño de plantas renovables de servicios auxiliares*. (tesis de doctorado). Tecnológico Nacional de México Instituto Tecnológico de Celaya, Celaya, México. Recuperado de <http://51.143.95.221/handle/TecNM/461>

17. Rodríguez, L. (2014). *Viabilidad técnica para producción de biogás a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos – FORSU* (tesis de maestría). Universidad EAN, Bogotá. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10882/1560>
18. Segade, L., Ausín, D., y Cabeza, Ó. (2019). *La investigación del grupo especializado de termodinámica de las reales sociedades españolas de física y química (Vol. 9)*. Coruña, España: Universidade da Coruña. Recuperado de <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497350>
19. Spiegeler, C., y Cifuentes, J. (2016). *Definición e información de energías renovables* (tesis de maestría). Escuela de Estudios de Postgrado USAC, Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/4455>
20. Varnero, M. (2011). *Manual del Biogás. Ministerio de Energía, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility*. Santiago de Chile: Proyecto CHI/00/G32 "Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables.