



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

**DISEÑO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE  
GENERADORES DISTRIBUIDOS RENOVABLES UTILIZANDO LA FRACCIÓN ORGÁNICA  
DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE UN MERCADO MUNICIPAL**

**Victoria Alejandra Chinchilla Reyes**

Asesorado por Msc. Ing. Edgar Yanuario Laj Hun

Guatemala, abril 2022



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE  
GENERADORES DISTRIBUIDOS RENOVABLES UTILIZANDO LA FRACCIÓN ORGÁNICA  
DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE UN MERCADO MUNICIPAL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**VICTORIA ALEJANDRA CHINCHILLA REYES**  
ASESORADO POR MSC. ING. EDGAR YANUARIO LAJ HUN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, ABRIL 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**

DECANO	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Carlos Alberto Navarro Fuentes
EXAMINADOR	Ing. Endor Steve Ortiz del Cid
EXAMINADOR	Ing. Herbert Samuel Figueroa Avendaño
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez



## **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 FACTIBILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE GENERADORES DISTRIBUIDOS RENOVABLES UTILIZANDO LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE UN MERCADO MUNICIPAL**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 07 de noviembre de 2021.

**Victoria Alejandra Chinchilla Reyes**





**EEPFI-PP-0066-2022**

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 FACTIBILIDAD TÉCNICA ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE GENERADORES DISTRIBUIDOS RENOVABLES UTILIZANDO LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE UN MERCADO MUNICIPAL**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Todas las áreas - Nuevas tecnologías para generación y transmisión de energía eléctrica**, presentado por la estudiante **Victoria Alejandra Chinchilla Reyes** carné número **201314570**, 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 Gestion De Mercados Electricos Regulados.

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. Edgar Yanuario Laj Hun  
Asesor(a)  
*Edgar Yanuario Laj Hun*  
Ingeniero Electricista  
Col.11475

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



*[Signature]*

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







EEP-EIME-0066-2022

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 FACTIBILIDAD TÉCNICA ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE GENERADORES DISTRIBUIDOS RENOVABLES UTILIZANDO LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE UN MERCADO MUNICIPAL**, presentado por el estudiante universitario **Victoria Alejandra Chinchilla Reyes**, 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

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

Guatemala, enero de 2022



LNG.DECANATO.OI.261.2022

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 FACTIBILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE GENERADORES DISTRIBUIDOS RENOVABLES UTILIZANDO LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE UN MERCADO MUNICIPAL**, presentado por: **Victoria Alejandra Chinchilla Reyes**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada  
Decana



Guatemala, abril de 2022

AACE/gaoc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por haberme brindado la vida, sabiduría y oportunidades para lograr los anhelos de mi corazón demostrándome su amor incondicional.
- Mis padres** Por el amor, inspiración, enseñanza y apoyo en mi desarrollo personal y académico. Este logro no solo es mío, también es suyo.
- Mi hermano** Ricardo Antonio Chinchilla Reyes por tu amistad, apoyo y complicidad durante mi vida.
- Mis abuelas** Marne Sandoval (q. e. p. d.), Concepción García (q. e. p. d.) y María Elena López, por siempre celebrar mis logros, sus oraciones y el amor incomparable. Sus consejos vivirán en mí siempre.
- Familia en general** Que me han apoyado e inspirado en cada paso de mi vida.



## AGRADECIMIENTOS A:

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser el <i>alma mater</i> que me permitió tener acceso a conocimientos.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por proporcionarme los conocimientos y herramienta para el cumplimiento de mis sueños y que me han permitido realizar este trabajo de graduación.
<b>Mis amigos</b>	A todos los que me han acompañado en mi crecimiento personal y académico.
<b>Mi orientador</b>	Msc. Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo, por ese impacto creado en sus clases, por su amistad y apoyo incondicional en mi desarrollo académico.
<b>Mi consultor</b>	Msc. Ing. Carlos Alberto Fernando Navarro Fuentes, por ser mi mentor, por sus consejos de vida, por apoyarme en mis ideales y sus aportes en mi trabajo de graduación.
<b>Mi asesor</b>	Msc. Ing. Edgar Yanuario Laj Hun, por su apoyo en el desarrollo de esta investigación.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN .....	XI
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	5
3.1. Descripción del problema a falta de control de la FORSU.....	6
3.2. Formulación del problema .....	6
3.3. Delimitación del problema para implementar proyecto de bioenergía.....	7
4. JUSTIFICACIÓN .....	9
5. OBJETIVOS .....	11
5.1. General.....	11
5.2. Específicos .....	11
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN .....	13
7. MARCO TEÓRICO.....	15
7.1. Manejo y aprovechamiento de RSU .....	15

7.1.1.	Gestión de RSU en América Latina y el Caribe.....	16
7.1.1.1.	Consecuencias del mal manejo de desechos.....	17
7.1.1.2.	Aplicaciones de RSU.....	19
7.1.2.	Gestión de RSU en Guatemala .....	21
7.1.2.1.	Estrategias para el manejo y aprovechamiento de residuos sólidos ..	24
7.1.2.2.	Aprovechamiento de los RSU .....	27
7.1.2.3.	FORSU en el Mercado Concepción, Villa Nueva, Guatemala.....	28
7.2.	Características, tecnologías y gestión de bioenergía .....	29
7.2.1.	Características de la biomasa y la bioenergía.....	30
7.2.2.	Producción de energía a partir de la FORSU .....	34
7.2.3.	Tipos de biodigestores para obtención de biogás ...	37
7.2.3.1.	Biodigestores de flujo continuo.....	37
7.2.3.2.	Biodigestores de flujo discontinuo .....	38
7.2.3.3.	Biodigestores semicontinuos.....	39
7.2.4.	Modelos de biodigestores.....	40
7.2.4.1.	Biodigestor tipo chino o cúpula fija .....	41
7.2.4.2.	Biodigestor tipo hindú o campana flotante.....	42
7.2.4.3.	Biodigestor tipo taiwanés o estructura flexible .....	42
7.2.5.	GDR en Guatemala.....	44
7.2.5.1.	Regulaciones, normas y leyes.....	45
7.2.5.2.	Capacidad instalada de GDR en Guatemala.....	46
7.3.	Factibilidad en proyectos de bioenergía.....	47
7.3.1.	Factibilidad técnica.....	48

7.3.2.	Factibilidad económica financiera.....	49
7.3.3.	Variables de un proyecto de generación eléctrica ..	50
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	53
9.	METODOLOGÍA.....	57
9.1.	Características del estudio .....	57
9.2.	Unidades de análisis .....	57
9.3.	Variables.....	58
9.4.	Fases del estudio .....	60
9.4.1.	Fase 1.....	60
9.4.2.	Fase 2.....	61
9.4.3.	Fase 3.....	64
9.4.4.	Fase 4.....	65
9.4.5.	Fase 5.....	66
9.4.6.	Resultados esperados .....	67
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN .....	69
11.	CRONOGRAMA.....	71
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	73
13.	REFERENCIAS.....	75
14.	APÉNDICES.....	83



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1. Pirámide de la jerarquía de gestión de residuos .....	35
2. Procesos de la bioenergía .....	36
3. Diagrama de flujo biodigestor de flujo continuo .....	38
4. Diagrama de flujo biodigestor de flujo discontinuo .....	39
5. Diagrama de flujo biodigestor semi-continuo .....	40
6. Biodigestor tipo chino .....	41
7. Biodigestor tipo hindú .....	43
8. Biodigestor tipo taiwanés .....	44
9. Variables independientes y dependientes del tamaño .....	50
10. Variables independientes y dependientes de localización .....	51
11. Variables interdependientes de ingeniería del proyecto .....	52
12. Cronograma .....	71

### TABLAS

I. Esquema de solución .....	14
II. Fuentes para la obtención de la FORSU .....	31
III. Evolución de opciones de transformación de materias primas .....	36
IV. Categorías de mediciones de variables .....	58
V. Definiciones de variables .....	59
VI. Encuesta para los inquilinos del mercado Concepción .....	63
VII. Recursos necesarios para el desarrollo de la investigación .....	73



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>tCO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono total
<b>kWh</b>	Kilo vatios-hora
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metano
<b>m<sup>3</sup></b>	Metros cúbicos
<b>Q</b>	Quetzales
<b>ton</b>	Toneladas



## GLOSARIO

<b>Afluente</b>	Carga de entrada de sustratos de biomasa-aguas residuales.
<b>AMM</b>	Administrador del Mercado Mayorista (Guatemala).
<b>Biodigestor</b>	Contenedor cerrado hermético e impermeable.
<b>Biogás</b>	Mezcla gaseosa producida por la descomposición de materia orgánica en condiciones anaeróbicas.
<b>Biol</b>	Abono orgánico que aporta nutrientes resultantes de anaeróbica de la biomasa.
<b>Biomasa</b>	Materia orgánica, de origen vegetal o animal, que puede ser utilizada como fuente de energía.
<b>Biorreactor</b>	Recipiente o sistema que mantiene un ambiente biológicamente activo.
<b>CNEE</b>	Comisión Nacional de Energía Eléctrica (Guatemala).
<b>Digestato</b>	Material que queda después de la digestión anaeróbica de una materia prima biodegradable, tal como: lodos de aguas residuales, lodos de aguas

residuales, desechos de alimentos, desechos animales u otros productos de desecho orgánicos.

<b>EA</b>	Energías Alternativas.
<b>FORSU</b>	Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.
<b>Gasómetro</b>	Aparato diseñado para medir volúmenes de gases.
<b>GDR</b>	Generador Distribuido Renovable.
<b>GEI</b>	Gases efecto invernadero.
<b>GIRS</b>	Gestión integral de residuos sólidos.
<b>INE</b>	Instituto Nacional de Estadística (Guatemala).
<b>MARN</b>	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (Guatemala).
<b>ODS</b>	Objetivos de Desarrollo Sostenible.
<b>RSU</b>	Residuo Sólido Urbano.

## RESUMEN

Una ineficiente gestión, una falta de tratamiento y poco interés en el aprovechamiento de los residuos y desechos sólidos causan un impacto ambiental irreparable en los suelos, aire y cuerpos acuáticos además de comprometer la calidad de vida de los ciudadanos al paso del tiempo.

La presente propuesta busca brindar una alternativa para reutilización de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) de los mercados municipales, para delimitar el trabajo de investigación se utilizó información de la muestra de la FORSU del mercado Concepción, Villa Nueva, Guatemala.

Se analizará el aspecto técnico modelando escenarios y comparaciones de los tipos de biodigestores estimando el nivel de producción de biogás recuperado de la FORSU vinculándolo con el nivel de generación eléctrica que se puede obtener. Se analizará el aspecto económico considerando el costo de instalación, operación y mantenimiento del biodigestor, además de calcular el VAN relacionando las variables de los escenarios de costos de producción de energía eléctrica y los escenarios de precios de venta de la energía según el comportamiento del mercado eléctrico nacional.

Se espera demostrar que la bioenergía es un campo sin explorar, pero viable para la implementación de proyectos innovadores y generación de la energía eléctrica. Siendo así un aporte para futuras referencias en las iniciativas originadas por el reglamento para la gestión de los residuos y desechos comunes del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.



# 1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de graduación se encuentra bajo las líneas de Nuevas Tecnologías para Generación y Transmisión de Energía Eléctrica, específicamente en el Análisis e Impactos de la Innovación Tecnológica. El estudio de factibilidad para la implementación de proyectos de energía con recursos renovables, se encuadran dentro de los objetivos de la Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados.

La importancia del presente tema a desarrollar es exponer una alternativa para la generación de energía eléctrica que impacta positivamente diversos sectores. A nivel departamental se fortalecerían las gestiones de residuos y desechos, se recuperarían áreas de los basureros clandestinos, mejorarían los cuerpos acuáticos contaminados por lixiviados, sería una estrategia para la electrificación rural y se haría más robusta la matriz energética nacional.

Este análisis de factibilidad en los aspectos técnicos daría un panorama de las características y componentes necesarios bajo condiciones establecidas, sobre cómo desarrollar el proyecto. En los aspectos económicos aportaría a las interrogantes de las inversiones en el sector eléctrico para explorar la bioenergía incentivando la economía del país, impulsando innovación al sector eléctrico e impulsando el empleo en zonas metropolitanas y rurales.

En base a lo anterior se pretende evaluar el potencial energético útil de la muestra del mercado Concepción, determinar la tecnología en la que se tenga un mayor aprovechamiento, estimar la inversión inicial y la recuperación económica; para concluir la factibilidad del proyecto finalmente se enlistará la

información de interés previa a la implementación del proyecto para que las entidades público y privadas consideren la instalación de estos proyectos en el territorio nacional.

En el primer capítulo se aborda el manejo y aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe como antecedentes de la necesidad y aplicaciones de éxito. Además de abordar el panorama del mercado Concepción como sitio para la recuperación y aprovechamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos.

En el segundo capítulo se conocen las características, tecnologías y gestión de bioenergía para el tratamiento y producción de biogás utilizado en la planta de generación eléctrica. Se propone que la instalación sea como un Generador Distribuido Renovable por las facilidades, incentivos y beneficios que brinda para introducirlo al mercado eléctrico nacional.

En el tercer capítulo se presentan consideraciones para la factibilidad técnica y económica de los proyectos de bioenergía para garantizar que la inversión sea la adecuada. Se abordan aspectos técnicos como: la vida útil de proyecto, aspectos constructivos, requerimientos de mantenimiento, eficiencias de conversión de energía, entre otros. Se abordan aspectos económicos como: costos de operación, crecimiento poblacional, valor actual neto, costos de generación, entre otros.

Se desea obtener el potencial de energía generado para estimar el alcance y vida útil del proyecto aportando una noción del futuro que se puede tener a nivel nacional. En caso de no ser suficiente, se darán alternativas para el aprovechamiento de estos recursos.

## 2. ANTECEDENTES

Para tener un panorama general de las condiciones de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en Guatemala, se toma en cuenta el estudio de dos casos representativos de basureros clandestinos, donde Flores (2018) recomienda implementar un programa de concientización sobre los efectos negativos del mal manejo de residuos y desechos sólidos, además sugiere que la municipalidad de Villa Nueva, implemente y ejecute un adecuado modelo de gestión, para la erradicación de basureros clandestinos planteado en su investigación.

En el vertedero ubicado en el km 22, Carretera al Pacífico, Villa Nueva, Guatemala, según datos presentados por Girón (2017) recibe alrededor de 3,902 vehículos mensuales y 153 diarios de los cuales se tiene un ingreso de 909 toneladas diarias de residuos y desechos sólidos municipales, considerando un 79.38 % de los residuos con un potencial comercial aprovechable.

Una de las opciones para reducir el impacto ambiental generado por los RSU y una de las estrategias para la implementación de energías renovables, es justamente la recuperación de energía de los residuos siendo este un sistema de gestión que permite un uso adecuado y sostenible de los residuos que no pueden ser eficientemente reciclados o reutilizados. Para poder aprovechar la FORSU, Flores (2018) en base a la modelación propuesta recomienda que estos no se contaminen con otros tipos de desechos.

Considerando lo anterior, es de interés el porcentaje de la FORSU del mercado Concepción en Villa Nueva, Guatemala, donde Aldana (2021) con un nivel de confianza del 95 % realizó un estudio centrado en el área de frutas y

verduras y concluyó que el 97 % (1,110 kg) de los 1,144 kg de residuos generados a diario es materia orgánica, lo que confirmaría la factibilidad para tomar este lugar como abastecimiento de materia prima para la presente investigación.

En Guatemala se tiene la posibilidad de instalar Generadores Distribuidos Renovables (GDR) cuya característica es que su tecnología esta basada en la utilización de fuentes de energía renovable, además de tener una capacidad instalada igual o menor a cinco megavatios (5 MW) (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2014). Según García (2019) con el análisis de la producción de potencia utilizando la FORSU, sugiere que se tome en cuenta varios tipos de tecnologías para la producción de energía eléctrica, a partir de biogás, según las condiciones locales y el proyecto se desarrolle de la mejor manera posible.

En el territorio nacional se tienen instaladas varias plantas generadoras de energía eléctrica donde se utiliza como materia prima la biomasa, lo descrito por Rodríguez (2017) es que se adopta ésta tecnología como un aprovechamiento para abastecer sus propias instalaciones, para vender la potencia excedente y para contribuir en la generación de energía renovable. Apoyando la idea de que un GDR tiene una factibilidad técnica a base de biomasa, siendo esta una de las alternativas para el aprovechamiento de la FORSU como se considerará en esta investigación.

### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El presente trabajo de graduación nació con el interés de contar con una alternativa innovadora en el área de generación contribuyendo a la reducción del impacto ambiental, por lo que al englobarlos el resultado sería utilizar la FORSU para la producción de energía eléctrica.

En la actualidad no se cuenta con el cumplimiento de un plan de manejo de desechos sólidos urbanos, lo que trae como consecuencia los basureros clandestinos, vertederos superando sus capacidades, lixiviados que afectan drásticamente los suelos y los recursos hídricos, además de estar produciendo metano, que es uno de los gases más contaminantes para el medio ambiente, por lo que se está desperdiciando este recurso. Los basureros clandestinos se han tratado de reducir y erradicar, en ocasiones se han tenido éxito, pero esos desechos siguen sin ser aprovechados. Esto es uno de los factores determinantes siendo la materia prima de la tecnología que se seleccione.

Considerando lo anterior, se pretende aprovechar al máximo la FORSU del mercado Concepción, donde una investigación actual realizada por Aldana (2021) demuestra que un 97 % de sus desechos diarios contienen potencial energético. Esto es lo ideal siendo desechos que no están contaminados con otros residuos teniendo así un mayor aprovechamiento energético.

Verificando la factibilidad para la generación de energía eléctrica utilizando la FORSU, según los resultados de esta investigación, idealmente se podría crear una iniciativa a nivel de municipalidades en el territorio nacional para la electrificación rural, proyectos de autoproducción, el aprovechamiento de

residuos y la reducción de basureros clandestinos, siendo ésta la línea de vida del proyecto.

### **3.1. Descripción del problema a falta de control de la FORSU**

Falta de control en la disposición final de los RSU, que lleva a efectos dañinos en la tierra, ambiente y recursos hídricos. Por lo que un aprovechamiento de estos disminuiría sus efectos negativos volviéndose de utilidad para un servicio de bien común, como lo es la energía eléctrica. Teniendo como resultados planes de expansión para la electrificación rural, proyectos de autoproducción, robustecer la matriz energética nacional y brindando energía renovable por medio de la reutilización.

### **3.2. Formulación del problema**

En el presente apartado se exponen las interrogantes que derivan del problema del desaprovechamiento de la FORSU y si esta podría ser aprovechada para la generación de energía eléctrica, aprovechando este recurso.

Pregunta central

- ¿Es factible técnica y económicamente el aprovechamiento de la FORSU del mercado Concepción de Villa Nueva para la generación de energía eléctrica?

Preguntas auxiliares

Para responder a esta interrogante se deberán contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿La FORSU será suficiente para la producción de biogás aprovechable para la generación de energía eléctrica?
- ¿Qué tecnología será la idónea para la generación de energía eléctrica utilizando la FORSU?
- ¿Qué aspectos técnicos deberán de considerarse para determinar la factibilidad de instalación del proyecto?
- ¿Qué análisis económico deberá de considerarse para determinar la factibilidad de inversión del proyecto?
- ¿Qué información e incentivos serían necesarios para que las instituciones públicas y privadas implementen proyectos similares en el territorio nacional?

### **3.3. Delimitación del problema para implementar proyecto de bioenergía**

El Ministerio de Energías y Minas (2018) en la Política energética 2019-2050 indica que, dentro de las energías renovables, la bioenergía es la mayor fuente de energía y suministra a nivel mundial el 10 % de energía, esto fortalece los ejes transversales de acción planteados por el MEM para el 2050. En la política mencionada se aborda el concepto de Desarrollo Sostenible, el cual se basa en una sociedad y gestión de los recursos renovables sostenibles. Esta investigación se elabora con interés en fortalecer uno de sus objetivos que indica la necesidad de crear participación sectorial promoviendo el diálogo y la identificación de las necesidades características de cada sector energético.

Se plantea una estrategia en la utilización de la FORSU de un área de frutas y verduras del y convertirlo en energía eléctrica. Por la falta de tiempo y recursos, no se especificará un área de construcción e instalación, y la investigación solo

se centrará en la FORSU, donde se queda pendiente resolver la problemática de los desechos que no se reducen, reciclan ni reúsan.

## 4. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de graduación se encuentra bajo las líneas de Nuevas Tecnologías para Generación y Transmisión de Energía Eléctrica, específicamente en el Análisis e Impactos de la Innovación Tecnológica. El estudio de factibilidad para la implementación de proyectos de energía con recursos renovables, se encuadran dentro de los objetivos de la Maestría en Gestión de Mercados Eléctricos Regulados.

Según el Decreto No. 52-2003 del Congreso de la República de Guatemala, Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable, dentro de uno de sus considerandos se establece:

Que Guatemala cuenta con recursos naturales renovables suficientes en cantidad y calidad, y que su aprovechamiento otorgará al país una mayor independencia en la compra de los combustibles fósiles, facilitando con ello el suministro de energía económica a favor del consumidor final, de la población guatemalteca y de la región centroamericana en general, minimizando así una fuga irreversible de divisas por concepto de compra de estos combustibles no disponibles localmente (Congreso de la República de Guatemala, 2003, p. 1).

La importancia del presente tema a desarrollar se debe a que es una alternativa para la generación de energía eléctrica que impacta positivamente diversos sectores. A nivel municipal se fortalecerían las gestiones reguladas de los RSU, reducción y aprovechamiento de áreas de los basureros clandestinos,

recuperación de cuerpos acuáticos contaminados por lixiviados y estrategia para aumentar el índice de electrificación rural.

A nivel económico contestar esta interrogante incentivaría inversiones en el sector eléctrico paralelamente impulsando el empleo en zonas metropolitanas y rurales. A nivel ambiental se detectaría una reducción de emisiones de metano producidos sin algún aprovechamiento, saneamiento de suelos, disminución de plagas por olores provenientes de los vertederos no controlados. A nivel social con estos proyectos se aportaría con programas para el desarrollo de las comunidades aledañas al lugar de instalación de la planta generadora.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. General**

Determinar la factibilidad técnica y económica de la implementación de un generador eléctrico aprovechando la FORSU del mercado Concepción en Villa Nueva, Guatemala.

### **5.2. Específicos**

- Evaluar la capacidad de potencial energético útil referente a la FORSU del Mercado Concepción en Villa Nueva, Guatemala.
- Determinar la tecnología idónea para la generación de energía eléctrica y aprovechar la FORSU.
- Realizar un análisis técnico para determinar la factibilidad de instalación del proyecto.
- Elaborar un análisis económico para determinar la factibilidad de inversión del proyecto.
- Enlistar la información básica e incentivos mínimos necesarios para la implementación del proyecto a nivel nacional.



## **6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN**

La necesidad del aprovechamiento de los residuos y desechos sólidos se debe a los efectos negativos provocados a nivel ambiental y los efectos a la salud de los ciudadanos. Se tienen daños en la atmosfera, tierras y cuerpos acuáticos por una mala Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS) llegando a repercutir en la salud disminuyendo la calidad de vida de los ciudadanos. Por ello a lo largo de los últimos años se han impulsado proyectos con beneficios multisectoriales en los que se abarcan varias acciones que den soluciones relevantes.

A través del diseño técnico del proyecto de bioenergía se pretende estimar si la FORSU del mercado Concepción será suficiente para una producción de energía creando así un GDR en la que dependiendo de las condiciones científicas planteadas y comparaciones se presentará el tipo de biodigestor ideal para el aprovechamiento de biogás. Se estimará el nivel de potencia instalada que podría tener el proyecto y los componentes constructivos y operativos. Se presentará un análisis económico conociendo la inversión inicial y complementar el análisis con su vida útil y costos de mantenimiento. Tomando en cuenta la disponibilidad de los materiales, personal capacitado y elementos para su mantenimiento.

En este trabajo de graduación se harán recomendaciones para mejorar la calidad de la energía que se pueda producir, así como alternativas de los productos obtenidos del proyecto. Como alternativas primero se sondeará con encuestas el apoyo de los inquilinos del mercado Concepción en la implementación del proyecto para autoconsumo trayendo beneficios económicos a los implicados y segundo la información, estudios e incentivos necesarios para que las instituciones públicas y privadas impulsen e instalen este tipo de

proyectos. Se espera que con este breve análisis se puedan cumplir los objetivos propuestos en los planes nacionales en los ámbitos energéticos y ambientales.

Tabla I. **Esquema de solución**

<b>No.</b>	<b>Trabajo a cubrir</b>	<b>Metodología</b>	<b>Tiempo estimado</b>
1	Analizar la muestra de la FORSU para la obtención de biogás y utilizarlo para la generación de energía eléctrica	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Modelamiento de los escenarios propuestos sobre la relación entre la carga de FORSU y la generación de biogás.</li> <li>2. Modelamiento de los escenarios propuestos sobre la relación entre la generación de biogás y la capacidad de generación eléctrica.</li> </ol>	3 semanas
2	Identificar y analizar el biodigestor ideal para la máxima recuperación de la FORSU	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tablas comparativas de las características técnicas de los biodigestores</li> <li>2. Asesoramiento de experto en instalación de biodigestores</li> <li>3. Analizar las ventajas y desventajas del tipo de biodigestor</li> </ol>	3 semanas
3	Análisis técnico para la instalación del proyecto	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Disponibilidad de equipo y componentes para la instalación del proyecto</li> <li>2. Disponibilidad de personal capacitado</li> <li>3. Complejidad del mantenimiento</li> <li>4. Vida útil de los componentes</li> </ol>	4 semanas
4	Análisis económico para la inversión del proyecto	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Análisis del VAN para predecir las ganancias o pérdidas sobre la inversión del proyecto.</li> <li>2. Análisis de Costo de oportunidad como indicativo de los beneficios de la inversión.</li> </ol>	4 semanas

Fuente: elaboración propia, utilizando software Microsoft Excel.

## **7. MARCO TEÓRICO**

A continuación, se abordan temas relevantes para el desarrollo del trabajo de graduación. Entre estos se abordará la logística y regulaciones de las gestiones de los RSU. Se presenta el tema de la bioenergía y como está ligada a la materia prima y condiciones que se tengan para el desarrollo del proyecto. Finalmente, con los puntos a considerar para determinar la factibilidad del proyecto.

### **7.1. Manejo y aprovechamiento de RSU**

América Latina y el Caribe se enfrentan a diversas necesidades básicas que deben cubrir, entre ellas la gestión de residuos sólidos que pasa a segundo plano a comparación con las problemáticas sociales, políticas y económicas, teniendo así un presupuesto limitado lo que afecta el desarrollo de los planes presentados en cada país.

Para tener avances es necesario que las entidades públicas, inversionistas extranjeros y continua educación a la ciudadanía vayan de la mano para impulsar la planeación de proyectos de ingeniería en el tema del aprovechamiento de los residuos como lo exponen Sáez y Urdaneta (2014, p. 133).

Sin financiamiento para esta gestión trae como consecuencias falta de estudios ambientales, deficientes procesos de recolección, obsoletos métodos de tratamiento, dudas sobre la factibilidad de aprovechamiento e impactos negativos en la disposición final de residuos sólidos. Según André y Cerdá (2006) para plantear soluciones de gestión se debe cuantificar y analizar la composición de

los residuos. Esta problemática se debe de abordar por el efecto en cadena que genera en temas sociales y ambientales (p. 73).

### **7.1.1. Gestión de RSU en América Latina y el Caribe**

A nivel regional, Sáez y Urdaneta (2014) indican que se tiene la necesidad de definir la situación actual de las grandes ciudades de América Latina y el Caribe por los efectos negativos en la salud de los ciudadanos y el impacto ambiental a consecuencia de los altos volúmenes de residuos por su inadecuado manejo. Esto solo podría mejorar con estrategias y acciones sobre la gestión de residuos sólidos (p. 121).

El estudio realizado por Posso (2004) identifica una transición interesante por las motivaciones por Energías Alternativas (EA), entre estas la independencia energética de los combustibles fósiles, disponer de fuentes energéticas seguras y mitigar los efectos nocivos ambientales. Estos escenarios dan pautas para plantear estrategias multisectoriales (p. 150).

Estas motivaciones no son las únicas que surgen como factores para el desarrollo de estrategias, Sáez y Urdaneta (citado en Ojeda y Quintero, 2014) también contemplan los cambios en patrones de consumo por generaciones, la concentración de población en ciertas zonas marginales, el crecimiento demográfico y el desarrollo improductivo del sector industrial aumentan la problemática (p. 122).

Aunque estos efectos no se ven a corto plazo, las motivaciones deberían de ser suficientes para los analistas en cuanto a tomar decisiones en el presente para solventarlos en el futuro, siendo conscientes de que el manejo de los residuos sólidos urbanos es una de las problemáticas más difíciles de resolver a

nivel regional, no solo por su gestión sino también por las políticas, normativas y cobertura de servicios a nivel territorial siendo una solución inmediata los rellenos sanitarios como se expone en el “Informe de la Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe” (BID, AIDIS, y OPS, 2010)

El informe elaborado por BID *et al.* (2010) sugiere que no solo se debe buscar un servicio financieramente sostenible, sino que también velar por los factores sociales y ambientales (p. 153). Ante este escenario el tratamiento de los residuos no se practica, porque desde los sitios de recolección se realiza un transporte directo hasta los lugares de disposición final siendo este un patrón detectado por Sáez y Urdaneta (citado en Silgado, 2014) en América Latina y el Caribe (p. 129).

Dentro de esto se puede trabajar con la implementación de tecnologías para la reutilización de residuos, ya que Moya, Aldás, López, y Kaparaju (citado en PTT Trang, HQ Dong, DQ Toan, NTX Hanh y NT Thu, 2017) indican que la mayor proporción de desechos son orgánicos en los países menos desarrollados comparados con los países más desarrollados (p. 287). Esto es un indicativo de que la presente investigación no solo podría ser aplicada a Guatemala, sino que también a nivel regional como una solución factible.

#### **7.1.1.1. Consecuencias del mal manejo de desechos**

La degradación del ecosistema mundial se refleja en: variaciones del sistema climático, reducción de la capacidad protectora de la capa de ozono y contaminación atmosférica por lluvias ácidas. Posso (2004) presenta una serie de evidencias que dan la necesidad de minimizar las actividades que aceleran

estos daños, entre estos está el consumo de combustibles fósiles, dando así la investigación e implementación de otras fuentes de energía (p. 148).

Sáez y Urdaneta (2014) hacen énfasis en que estos cambios necesarios se deben hacer desde el interés de las instituciones públicas, las investigaciones científicas, las inversiones y la educación poblacional, América Latina y el Caribe debe poner en sus planes de desarrollo el tema del aprovechamiento de los residuos (p. 121).

Uno de los sectores afectados es la salud poblacional, donde las principales situaciones son: enfermedades bacterianas y parasitarias, riesgo de lesiones e infecciones y padecimientos en el sistema respiratorio (Sáez y Urdaneta, citado en Contreras, 2014). Se ha estimado que se tiene una diferencia creciente entre la producción de residuos sólidos, para los países desarrollados está entre 3.2 a 4.5 % y para los países en vía de desarrollo entre 2 a 3 % (Sáez y Urdaneta, citado en Dong y col, 2014).

Como inicio para erradicar estas consecuencias se han regulado leyes para la implementación de sistemas de tratamiento de residuos sólidos, pero según Sáez y Urdaneta (citado en OPS; Peralta y col; Noguera, 2014) en América Latina y el Caribe no se ha llevado a una buena práctica.

Posso (2004) nota que actualmente se está en una búsqueda por un desarrollo en el aprovechamiento de los residuos sólidos implementado en energías que sean factibles técnica y económicamente, dándose un desarrollo importante en varios países como los EE. UU. y en la Unión Europea, mientras que en América Latina su progreso es inicial, sólo se ve un avance significativo en Brasil y México (p. 148).

### 7.1.1.2. Aplicaciones de RSU

En Latinoamérica la legislación ambiental es fundamental para poder diseñar planes de gestión de residuos sólidos y así cumplir con los objetivos planteados por las organizaciones internacionales (Sáez y Urdaneta, 2014). Las normativas actuales en materia de disposición final de residuos sólidos definen las características técnicas para su diseño, implementación y desarrollo siendo más exigentes prohibiendo los vertederos a cielo abierto afrontando a los responsables a aplicar una solución adecuada (BID *et al.*, 2010).

La generación y gestión de los RSU ocasiona una especie de “efecto externo en cascada” (André y Cerdá, citado en Zoboli, 2006). André y Cerdá (2006) concluyen en que estos son el resultado de una transformación en la cadena de consumo, iniciando desde la extracción de materias primas, procesamiento, consumo local y finalmente su eliminación (p. 87).

A nivel mundial en los últimos treinta años Posso (2004) ve una tendencia hacia el desarrollo de estrategias para la disminución del consumo de combustibles contaminantes y agotables como lo son los combustibles fósiles, dando paso a las EA como una solución a largo plazo (p. 154). Entre estas Moya *et al.* (2017) mencionan que las Tecnologías de Conversión de Residuos en Energía se clasifican como tecnologías de procesamiento bioquímico o procesamiento termoquímico tomando cierta relevancia en temas de una sostenible gestión de residuos (p. 287).

El escenario preliminar para cada gestión con el fin de disminuir el volumen de residuos y los costos de tratamiento, lo exponen André y Cerdá (2006) en su análisis, la *reducción* es la mejor estrategia, pero tiene un limitado alcance por los costos elevados que requiere además de los cambios de hábitos que se

deberían de aportar de parte de la ciudadanía. El *reciclaje* y el *compostaje* tienen limitantes por los residuos que no se pueden recuperar haciendo costoso y poco rentable su aprovechamiento por las clasificaciones y condiciones para una operación adecuada. La *incineración* es una de las estrategias en la que el volumen de residuos se reduce hasta las cenizas, pero se tiene que operar con cautela por las implicaciones ambientales que encierra. Finalmente, los vertederos representan un costo de operación elevada y un impacto ambiental considerable, pero entre todos es el que se emplea sin limitaciones (pp. 75-77). Ante este contexto, no es posible limitar la gestión de residuos sólidos a sólo una estrategia o descartar alguna en las planificaciones, la solución factible requiere de la combinación de gestiones disponibles y aplicables para cada país.

Uno de los llamamientos mundiales los presenta la ONU (2018) con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que abarca el fin de la pobreza, proteger al planeta y que las personas vivan en paz y prosperidad para el 2030, haciendo hincapié en que el desarrollo debe equilibrar la sostenibilidad ambiental, económica y social. Para poder cumplir con estos objetivos se necesita de propuestas innovadoras, conocimientos multidisciplinarios, tecnologías de vanguardia, aportaciones financieras de toda la sociedad y alianzas reforzadas (p. 7).

Respecto a esta línea de investigación, lo que plantea “La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible” (2018), se toma el ODS 7, energía asequible y no contaminante. Este abarca problemáticas como: falta de acceso a energía eléctrica, emisiones de gases de efecto invernadero por la generación de energía eléctrica, baja eficiencia en el consumo de electricidad, uso de combustibles contaminantes e insalubres para cocinar (pp. 37-38). Para estimular el desarrollo humano y contrarrestar los daños en el medio ambiente, se debe incrementar la infraestructura en los países en desarrollo y revolucionar las

tecnologías de energía limpia. La ONU (2018) incentiva a la inversión en fuentes de energía limpia para mejorar la productividad energética (p. 38).

Uno de los beneficios económicos de estas gestiones serán los bonos de carbono que se sustentan con el diseño de tratamiento de los residuos. Este crea un efecto domino trayendo cambios positivos en el monitoreo de los gases de efecto invernadero, mitigando los daños en suelos y cuerpos de agua por los lixiviados (BID *et al.*, 2010). Además, que se puede ligar esta gestión a las centrales generadoras de energía eléctrica basadas en el aprovechamiento de recursos sólidos, dando no solo benéficos ambientales y económicos, sino también sociales.

En los grandes vertederos es mayor la generación de biogás y su recolección es más eficiente, lo que da una alta rentabilidad en los bonos de carbono por su bajo costo. Asimismo, se logra alcanzar un control eficiente en la operación y mantenimiento de los rellenos sanitarios permitiendo la clausura de los vertederos a cielo abierto (BID *et al.*, 2010). Finalmente se demuestra que solo mediante el interés y apoyo de las entidades públicas y la participación activa de los ciudadanos se llegara a un desarrollo multisectorial.

### **7.1.2. Gestión de RSU en Guatemala**

Guatemala se afronta varias necesidades básicas, entre ellas un adecuado manejo de residuos sólidos, aunque se han realizado propuestas por parte de las entidades públicas, la falta de apoyo, interés y retroalimentación de la ciudadanía ha estancado la evolución de estas acciones. Además, una falta de regulación hace poco sustentables las propuestas y por ello estos proyectos no perduran, por ejemplo: iniciativas de reforestación, planes para la reducción de basureros clandestinos, limpieza de cuerpos acuáticos y reutilización de desechos.

Dentro de las problemáticas a señalar están los vertederos a cielo abierto y los basureros clandestinos. Según las investigaciones de la BID *et al.* (2010) determinan que los vertederos a cielo abierto es el método más utilizado para la disposición final de los residuos, teniendo Guatemala un 15.4 % de los desechos en rellenos sanitarios y 9.6 % en vertederos, siendo el 25 % de los residuos sin tratamiento previo (pp. 132-133).

Respecto a la problemática de los basureros clandestinos, se presenta el estudio “Estadística de vertederos de basura sin control a nivel nacional” (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2017) en el que indicaba que a la fecha existían 2,240 basureros entre municipales, privados y clandestinos en todo el país, donde el 99 % no contaban con un instrumento ambiental, lo que equivale a 2,212 basureros sin un registro de impactos o riesgos ambientales, siendo clasificados como ilegales aunque sean municipales.

El libro “*What a Waste 2.0: Una instantánea global de la gestión de residuos sólidos hasta 2050*” (Kaza, Yao, Bhada, y Van, 2018) nos alerta que si no se toman medidas correctivas sobre la gestión de residuos sólidos para el 2050 se tendrá un aumento de 2.600 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>. Kaza *et al.* (2018) estiman que el 20 % del presupuesto de las municipalidades se destina para la gestión de residuos sólidos, sin embargo, las del 90 % de los desechos de los países en desarrollo aún se depositan en vertederos o se incineran a cielo abierto (p. xii).

En agosto del 2020 el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) aportó al trabajo de las entidades públicas, para la erradicación de 300 vertederos ilegales a nivel nacional, que conllevó aproximadamente 18 meses. Dentro de los departamentos beneficiados están: Petén, Sacatepéquez y Jutiapa. En el monitoreo hubo seis departamentos donde los vertederos clandestinos no se

hallaron, en ese período, siendo Alta Verapaz, Izabal, Chiquimula, Quetzaltenango, Retalhuleu y Huehuetenango (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2021).

Ante esta problemática el MARN en agosto del 2021 emitió el Acuerdo Gubernativo 164-2021: “Reglamento para la gestión integral de los residuos y desechos sólidos comunes” (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2021), regulando la gestión de residuos sólidos abarcando la recolección, traslado, tratamiento y disposición final de los residuos y desechos sólidos, siendo esta la regulación aprobada más reciente en Guatemala que establece normas sanitarias y ambientales. Todo esto con el propósito de mitigar los daños ambientales, reducir la contaminación y mejorar la salud de la ciudadanía. Para el cumplimiento de las disposiciones del reglamento el MARN (2021) promoverá sistema de información por medio de campañas educativas a los ciudadanos, impulsará programas de responsabilidad empresarial y coordinará vigilancias sanitarias y ambientales (p. 22).

La implementación de este reglamento es preciso para el desarrollo de tecnologías como la propuesta en esta investigación, ya que se tiene contemplada la clasificación primaria entre orgánico e inorgánico, dando un aporte para la preservación de la FORSU. Además, darán la apertura a la infraestructura e instalación de obras con la ayuda de una autorización sanitaria conforme a las normas del Ministerio de Salud y una autorización ambiental, conforme a la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente. El Acuerdo Gubernativo 164-2021 (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2021) menciona que la economía circular se pueda agilizar con alianzas entre el sector público y privado impulsando negocios fundamentados en desarrollo sustentable (p. 20). Este reglamento es el inicio de un cambio necesario en Guatemala en el

que se busca promover e impactar los hábitos y acciones de la ciudadanía dando resultados para un mejor futuro.

#### **7.1.2.1. Estrategias para el manejo y aprovechamiento de residuos sólidos**

Guatemala a pesar de que no tiene muchos proyectos de éxito, legislación y normativas sobre la gestión de desechos sólidos y presenta una carencia de incentivos para proyectos de desarrollo municipal y ambiental, si posee documentación que demuestra el interés por crear un cambio que proviene de diversos actores institucionales. Se plantearán como estrategias ya que cada documento tiene objetivos diversos, pero siempre tratando de resolver la misma problemática sobre la degradación del medio ambiente y la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos.

La “Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos” (2015) es creada por el Acuerdo Gubernativo No. 281-2015, donde se busca promover un desarrollo sostenible con la implementación de mejoras en la producción, consumo y manejo de los residuos sólidos de forma integral y analítica para un impacto social, económico y ambiental (p. 15). Además dentro de algunos de sus objetivos y alcances se tienen: coordinar permanentemente las actividades de los sectores y actores involucrados; promover un normativo para la efectiva gestión integral de los residuos sólidos; implementar un sistema de información ambiental para posibilitar diagnósticos y predicciones; brindar fuentes de empleo por medio de la GIRS de forma sostenible; favorecer instrumentos económicos destinados a mejorar las condiciones de los métodos de la GIRS; poner en marcha acciones para minimizar los peligros a los ciudadanos y conservar al medio ambiente; y finalmente sensibilizar a los ciudadanos para un consumo responsable y cambio de hábitos (pp. 29-32).

El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales con los aportes del Departamento para el Manejo de los Residuos y los Desechos Sólidos presentaron: “Guía Práctica para la Formulación de Planes Municipales para la Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos” (2016) la cual tiene como objetivos: Promover la gestión integral de residuos y desechos sólidos por medio de la creación y aplicación de planes para las municipalidades o mancomunados (p. 9). Los datos de la composición de los residuos sólidos con potencial para método de reciclaje están comprendidos por el 71 %, contenido por 53 % de materia orgánica, 9 % polímeros, 6 % papel y cartón, 2 % vidrio y 1 % latas. Los 29 % de residuos restantes están valorizados para algún tratamiento energético (p. 7). Considerando que en el 2016 aún no se contaban con el Acuerdo Gubernativo No. 164-2021 (2021) que da una clasificación detallada de los residuos y desechos sólidos comunes que se generen (pp. 4-5).

La Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia de la República de Guatemala (SEGEPLAN) realiza un informe ejecutivo llamado “Ranking de la gestión municipal 2013” (2015) en el que exponen cinco indicadores en relación a los procesos de desarrollo socioeconómicos de la población para determinar el índice de servicios públicos municipales, estos son:

- Cobertura del servicio de distribución de agua potable.
- Calidad del servicio de agua potable.
- Disposición y tratamiento de aguas residuales.
- Cobertura y calidad de la GIRS.
- Gestión de servicios municipales.

Donde concluyen que 245 municipalidades están en “baja” categoría. Lo que implica que el 73 % de estas no realizan una adecuada GIRS (pp. 46-47).

Demostrando que los avances actuales son necesarios para realizar cambios de raíz y afrontar los problemas del futuro con tecnología y herramientas fiables.

El Departamento para el Manejo de los Residuos y los Desechos Sólidos del MARN en el 2018 presenta una: “Guía para elaborar Estudios de Caracterización de Residuos Sólidos Comunes” (2018) la cual tiene como objetivo contribuir con la toma de decisiones en gestión de residuos desechos sólidos estableciendo criterios para los estudios de caracterización de residuos sólidos urbanos (p. 7). Una falta de estandarización y metodologías aplicables a la realidad del país, nos orillan a utilizar la integración de procesos metodológicos validadas en campo a través experiencias (p. 6). Lo que hace esta guía algo general que con su aplicación se ira adaptando a la realidad nacional. Lo relevante de la guía se tiene la clasifican según el tipo de residuo, contemplando: orgánico, papel y cartón, plástico, vidrio, material ferroso, material no ferroso, varios (caucho, cuero, tierra, etc.), desechos sanitarios, peligrosos y especiales. Luego se procede a pesar para poder obtener el porcentaje por día de cada residuo (pp. 16-17).

Dentro de las Memoria de Labores 2020 de la Municipalidad de Guatemala, se elabora el informe: “Dirección De Gestión Y Manejo De Residuos Y Desechos Sólidos” (2020) el cual tiene como objetivos: contribuir en el bienestar de los ciudadanos promoviendo el desarrollo de un ambiente verde, limpio y sostenible, además de impulsar el reciclaje, reutilización y contar con una gestión de manejo de los desechos sólidos adecuada (p. 5).

Ante la sobrepoblación registrada en la Ciudad de Guatemala, la disposición multisectorial del vertedero de la zona 3 abarcando la Ciudad de Guatemala y 14 municipios y la disposición multisectorial del vertedero de la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA) en el kilómetro

22 de la carretera al Pacífico abarcando 4 municipios, la Administración Municipal en el 2017 emite el Acuerdo COM-15-2017 donde se crea la Dirección de Gestión y Manejo de Residuos y Desechos Sólidos con el propósito de desarrollar la calidad ambiental por medio del desarrollo de un sistema técnico y eficiente sobre el manejo, gestión y disposición final de los desechos sólidos (Municipalidad de Guatemala, 2020).

La Municipalidad de Guatemala (2020) indica que se generan aproximadamente 3,000 toneladas diarias de basura entre la ciudad de Guatemala y las municipalidades aledañas. En el 2003 se tenían parámetros de caracterización de los residuos sólidos que llegaban al vertedero de la zona 3, pero no se contempla la parte orgánica. En octubre del 2020 harían una nueva caracterización, pero se suspendió por la pandemia de coronavirus COVID-19 (p. 7). Un aporte para la implementación y desarrollo de proyectos de reutilización y reciclaje son los datos de los recursos aprovechables (p. 10).

#### **7.1.2.2. Aprovechamiento de los RSU**

A sabiendas que se generan 3,000 toneladas diarias de residuos y desechos, se presentan dos casos de éxito en los que se aprovecha el potencial energético de los RSU para la generación de energía eléctrica (Municipalidad de Guatemala, 2020).

La empresa Industrias de Biogás (Inbio) entra en operación en el 2011 generando energía eléctrica (1 MW) aprovechando los residuos orgánicos captando el metano proveniente del vertedero de la zona 3 de la capital. El proyecto Gas Metano Gabiosa de la empresa Gas Biológico, S. A., genera energía eléctrica (1 MW) con los residuos del cultivo de palma africana instalada en La Gomera, Escuintla (Bolaños, 2015).

En el reporte “Los cincuenta vertederos más grandes del mundo” (D-Waste, y otros, 2014) Guatemala tiene uno de los primeros 10 basureros más grandes de América Latina y el Caribe, referente al vertedero de la zona 3. Entre las estimaciones se tiene que cubre un área de 19.3 hectáreas, habilitado desde 1966 donde actualmente recibe alrededor de 300,000 toneladas de residuos y desechos sólidos al año. Se tiene un riesgo de enfermedades para las personas que viven en el asentamiento situado a 500 m de distancia, además de un riesgo de daños ecológicos al parque Ecológico Jacarandas de Cayalá que se encuentra a 4 km del vertedero (p. 68). Demostrando así que Guatemala tiene una problemática en la GIRS y se deben ejecutar y mejorar las estrategias planteadas.

#### **7.1.2.3. FORSU en el Mercado Concepción, Villa Nueva, Guatemala**

Para mantener un equilibrio sostenible se debe trabajar en el área social, económico y ambiental. Diversos sectores se deben involucrar para una GIRS buscando una mejora a la problemática y una reducción a los impactos multisectoriales que esta provoca. Centrados en el aprovechamiento de la FORSU se debe tener estudios ambientales previos que soporten las decisiones para el planteamiento de una estrategia.

Para un análisis de RSU, la caracterización de estos es una tarea con alto nivel de complejidad por lo que el estudio se centrara en el área de frutas y verduras del mercado Concepción, Villa Nueva, Guatemala delimitando a la FORSU. El sector de frutas y verduras del mercado Concepción, Villa Nueva, Guatemala, Aldana (2021) analiza el sitio que está conformado por 143 locales, que diariamente generan 1,144 kilogramos de residuos aproximadamente, de

estos el 97 % (1,110 kilogramos) es materia orgánica según los datos recabados (p. 71).

Para poder delimitar y considerar las características de la FORSU, García (2019) nos indica que esta representa restos de alimentos y que su separación de otros desechos mejora notablemente la calidad y cantidad de gas producido cuando se está planeando reutilizarlos (p. 50). Luego del análisis de las características químicas del material Aldana (2021) concluye que se puede producir 178 kilogramos de suelo fértil si se usan la FORSU para su aprovechamiento como compostaje en un sistema aeróbico controlado (p. 96). Demostrando así que la FORSU estudiados tiene potencial para poder ser tratados para su aprovechamiento en la generación de energía eléctrica.

## **7.2. Características, tecnologías y gestión de bioenergía**

Los proyectos de bioenergía son de ciclo cerrado de carbono que se refiere a la reducción del CO<sub>2</sub> que es enviado a la atmósfera, ya que se absorbe una parte de este durante el crecimiento de las plantas que se utilizaron anteriormente para producirlo. Se presentan las características que tiene la biomasa que sería la materia prima de estos proyectos y la bioenergía que sería la aplicación de tecnologías para el aprovechamiento de los residuos y desechos sólidos. En Guatemala se tienen pequeñas centrales generadoras de energía eléctrica donde su aporte está basado en energías renovables y gozan de incentivos, se presentarán sus lineamientos básicos como propuesta para el aprovechamiento de la FORSU del mercado Concepción de Villa Nueva.

### **7.2.1. Características de la biomasa y la bioenergía**

Islas y Martínez (2010) definen que la bioenergía se refiere al aprovechamiento de la energía útil que se contiene en la biomasa acumulada por la fotosíntesis haciéndolo un recurso energético universal. Para su aprovechamiento se cuentan con procesos como la combustión, la digestión, la descomposición, hidrólisis y fermentación a combustibles líquidos o gaseosos (p. 30).

Se desglosa la caracterización de las materias primas que conforman la biomasa según sus fuentes de obtención y su construcción física resumidas en la tabla II. Conociendo de donde se puede obtener bioenergía es posible adentrarse a los métodos, procesos y modelos para la generación de energía eléctrica Rodríguez (2014).

Tabla II. **Fuentes para la obtención de la FORSU**

<b>Construcción física</b>	<b>Fuente de obtención</b>
Desechos vegetales.	Cosecha; Podas; Pos-cosecha; Preparación de alimentos frescos; Alimentos procesados y cocidos; Empaques de fibras vegetales; Fibras textiles de algodón; Papeles; Servilletas; Cartones; entre otros.
Residuos corporales de animales, tejido óseo, órganos de animales, sangre, contenido estomacal y sobras de alimentos vegetales.	Bovinos; Equinos; Porcinos; Aves de corral y domésticas; Mamíferos; Reptiles; Moluscos; Caninos; Felinos; Insectos; entre otros.
Residuos líquidos.	Leche y sus derivados; Aceite y grasas animales; Aceite y grasas vegetales comestibles; Café; Té; Cerveza, Vinos y demás alcoholes; Refrescos y bebidas azucaradas; entre otros.
Residuos de tierra y lodos.	

Fuente: elaboración propia con información tomada de Rodríguez (2014), utilizando software Microsoft Excel.

Para poder plantear una estrategia para el aprovechamiento de la biomasa, se presentan dos grupos de parámetros que se deben estudiar y monitorear, Rodríguez (2014) menciona:

- Parámetros ambientales: pH, alcalinidad, nutrientes, concentración de toxina y potencial redox.
- Parámetros operacionales: temperatura, agitación relacionada con la transferencia de energía, tiempo de reacción de los microorganismos y velocidad de introducción de carga orgánica (pp. 30-31).

Los tipos de bioenergía Islas y Martínez (2010) los agrupan en:

- Biocombustibles: residuos orgánicos, residuos forestales, residuos agrícolas, carbón vegetal y otros sólidos.
- Biocarburantes: alcohol (bioetanol); aceites vegetales proveniente de caña de azúcar, maíz, betabel, colza, soya y palma de aceite; y residuos de aceite de cocina convertidos en biodiesel.
- Biogás o metano: obtenido por la fermentación de residuos sólidos orgánicos y de desechos de animales (p. 32).

La bioenergía puede contribuir de manera importante a sustituir el consumo de combustibles fósiles, disminuir efectos negativos en el medio ambiente y activar de la economía en un país; da lugar a la siguiente generación de procesos energéticos útiles para los seres humanos, los cuales se obtienen sometiendo a la biomasa a procesos de transformación desarrollados. Islas y Martínez (2010) ven que dentro de las ventajas se tiene: misma capacidad de producción de energía comparado con los combustibles fósiles a menos emisiones de gases de efecto invernadero, capacidad de almacenamiento y aportes económicos mayores (pp. 30-32). Teniendo a la bioenergía como una estrategia, se deben conocer las características de una buena GIRS y así determinar las tecnologías para el diseño e implementación de proyectos multisectoriales aportando valor a los objetivos ambientales, sociales y económicos.

Dentro de las características de la GIRS, André y Cerdá (2006) presentan sus fases de desarrollo, siendo:

- Pre- recogida: consiste en almacenar, manipular, clasificar y entregar los residuos listos para su recogida y traslado. Siendo de gran importancia por la clasificación por tipo de residuo agilizando su reciclaje y reutilización.

- Recogida y transporte: al tener los residuos clasificados, se trasladan a los puntos de tratamiento especializados o a plantas de transferencia con el fin de reducir los recorridos de transporte.
- Tratamiento: sistemas de desarrollo instalados para el aprovechar y alargar la vida útil de los residuos. Los sistemas más empleados son: vertedero controlado con normativas, incineración con estudios ambientales, reciclado de diversos tipos de materiales y compostaje de uso doméstico y comercial (pp. 73-74).

Para la recuperación de Energía de los Residuos, Moya *et al.* (2017) exponen que este es un sistema de gestión para la disposición de los residuos sólidos urbanos que permite un uso adecuado y sostenible de los residuos que no pueden ser eficientemente reciclados o reutilizados. Esto es importante ya que en su conferencia hacen la salvedad de que se espera que la tasa de generación de residuos y desechos sólidos en todo el mundo aumentará a 2,200 millones de toneladas para el 2025 (p. 286).

Respecto al desarrollo industrial, Fazenda y Tavares (2016), en su artículo científico mencionan el modelo de producción provocado por la Revolución Industrial que está basado en el uso intensivo de la energía fósil, en la sobre explotación de los recursos naturales, el uso del agua, el aire y el suelo para el depósito de residuos, siendo estas causas principales de la degradación ambiental actual (p. 2). Se deben plantear estrategias para mantener y aumentar la producción de productos y eficientizar los servicios con el menor impacto ambiental posible.

### **7.2.2. Producción de energía a partir de la FORSU**

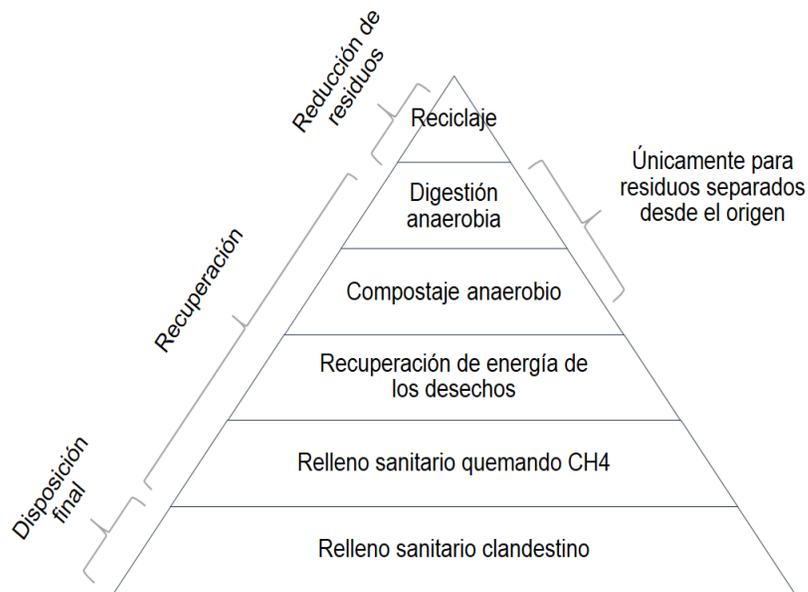
En la conferencia de Fernández y Zamorano (2017), abordan que la elección de la tecnología para la generación eléctrica va ligada a condicionantes económicos, sociales, ambientales y territoriales. Las tecnologías se clasifican en cuatro categorías: termoquímicas, químicas, bioquímicas y mecánicas. Esto determina la inversión, la función operativa, los planes de mantenimiento y la vida útil del proyecto.

En la sección de recuperación, la digestión anaerobia y el compostaje aerobio son las tecnologías deseables para un balance entre reducción de residuos y un bajo impacto ambiental, aunque estas solo son posibles si se usa la FORSU separada desde el origen. También se tienen otras tecnologías para aprovechamiento de los RSU como: la incineración directa, la gasificación y combustión (Moratorio, Rocco, y Castelli, 2012, p. 116). El orden de preferencia para el desarrollo de estos métodos se ilustra gráficamente mediante la pirámide de la Jerarquía de Gestión de Residuos que se muestra en la figura 1.

Para el diseño de todo proyecto de generación de energía eléctrica, no solo se tiene que determinar su adaptación a las condiciones del mercado del país, a la legislación y condiciones de recursos a utilizar, también es importante saber la madurez de esta que está asociada con la evolución de tecnologías, mantenimiento, personal capacitado y vida útil del proyecto. Esta evolución será predominante en la estabilidad económica que puede aportar el proyecto a los inversionistas. Se presenta en la tabla III. la relación entre la materia prima y las características para la obtención de energía basadas en las ventajas, madurez y limitaciones.

Según los métodos de recuperación se puede dividir en tres grupos: conversión bioquímica, conversión termoquímica y conversión física. Escobar *et al.* (2015), muestran que estos grupos tienen asociados procesos, derivados y aplicaciones (pp. 127-128). El siguiente diagrama es un resumen de las rutas de conversión siendo información recopilada de diversas fuentes mostrada en la figura 2. Por la delimitación de la investigación, nos centraremos solo en métodos de la conversión bioquímica para el aprovechamiento de la FORSU.

Figura 1. **Pirámide de la jerarquía de gestión de residuos**



Fuente: elaboración propia con información tomada de Moratorio citado en Themelis (2012), utilizando software Microsoft PowerPoint.

Tabla III. **Evolución de opciones de transformación de materias primas**

<b>Materia prima</b>	<b>Ventaja</b>	<b>Desarrollo de tecnología asociada</b>	<b>Limitaciones</b>
Primera generación: cultivos vegetales	Excelente contenido energético	Relativamente madura (refinerías de bioetanol)	Requiere tierra cultivable tropical
Segunda generación: cultivos energéticos (para obtención de energía. Alcohólicos, Oleaginosos y Lignocelulósicos)	No compite con las industrias de alimentos	Relativamente no madura	Tecnología de tratamiento laboriosa y costosa
Tercera generación: microalgas	No utiliza insumos agrícolas ni tierras	No madura	Bajo rendimiento de los portadores de energía
Otros: RSU	Sin costo asociado con la materia prima	Madura (digestión anaeróbica)	Tamaño de la materia prima inconsistente

Fuente: elaboración propia con información tomada de Escobar, Rúa, Silva, Venturini, y Mambeli, citado en K. Srirangan, L. Akawi, M. Moo-Young e C. P. Chou (2015), utilizando software Microsoft Excel.

Figura 2. **Procesos de la bioenergía**



Fuente: elaboración propia con información tomada de Escobar et al. citado en S. N. Naik, V. V. Goud, P. K. Rout e A. K. Dalai, (2015), utilizando software Microsoft PowerPoint.

### **7.2.3. Tipos de biodigestores para obtención de biogás**

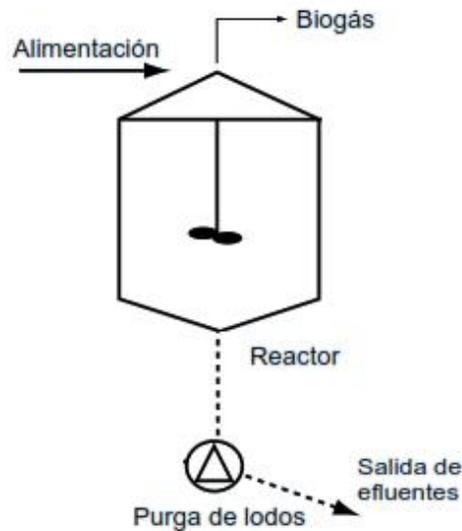
Un biodigestor es un depósito cerrado en el que se introducen los residuos y desechos orgánicos mezclados con agua produciendo fermentación por microorganismos (MINENERGIA, PNUD, FAO, y GEF, citado en Lagrange, 2011). Las características del digestor para que opere óptimamente deben tener las siguientes características: ser hermético limitando la entrada de aire; ser térmicamente aislado limitando los cambios bruscos de temperatura; contar con una válvula de seguridad contralando la presión; tener medios de carga y descarga de residuos líquidos y sólidos; y lograr un mantenimiento accesible.

Para ahondar en la producción de energía eléctrica a partir de la FORSU, con la delimitación del aprovechamiento del biogás es necesario conocer los diversos tipos de biodigestores enfocados en la utilización de energía bioquímica y el flujo de la carga de materia prima. Rodríguez (2014) presenta tres modos de operación: Flujo Continuo, Flujo Descontinuo y Semicontinuo (p. 34).

#### **7.2.3.1. Biodigestores de flujo continuo**

Los biodigestores de flujo continuo tienen un proceso ininterrumpido en el suministro de materia prima que se carga y el flujo de descarga siendo uniforme el tiempo de producción de biogás. Para el tratamiento de aguas negras son principalmente utilizados teniendo aplicaciones industriales por su gran capacidad. En temas de mantenimiento se debe programar la limpieza cada 6 o 12 meses por los lodos y sólidos asentados en el fondo del biorreactor. Estos aún tienen una vida útil y son reutilizados como biofertilizante y para recuperación de suelos (MINENERGIA *et al.*, 2011).

Figura 3. **Diagrama de flujo biodigestor de flujo continuo**



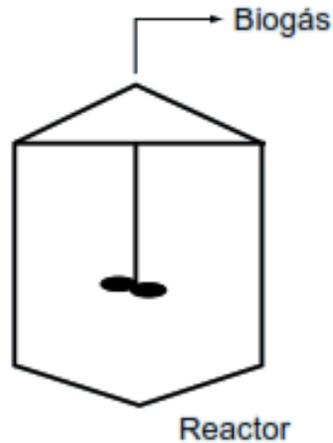
Fuente: elaboración propia con información de MINENERGIA et al. (2011), utilizando software Microsoft PowerPoint.

### 7.2.3.2. **Biodigestores de flujo discontinuo**

Los biodigestores de flujo discontinuo tienen un proceso interrumpido en el suministro de materia prima siendo una sola carga y luego entrando a un régimen estacionario de fermentación. Cuando ya se tiene una disminución de la materia prima y un nivel de rendimiento de biogás bajo, se procede a vaciar los biorreactores completamente y se cargan de nuevo dando inicio a un nuevo proceso de fermentación (MINENERGIA *et al.*, 2011).

La carga en digestores discontinuos debe estar entre un 40 a 60 % de materia prima basado en procesos experimentales para asegurar un buen funcionamiento del proceso, para asegurar una adecuada etapa de estabilización los biodigestores deben ser arrancados frecuentemente pudiendo así incrementar la producción de biogás (MINENERGIA *et al.*, 2011).

Figura 4. **Diagrama de flujo biodigestor de flujo discontinuo**

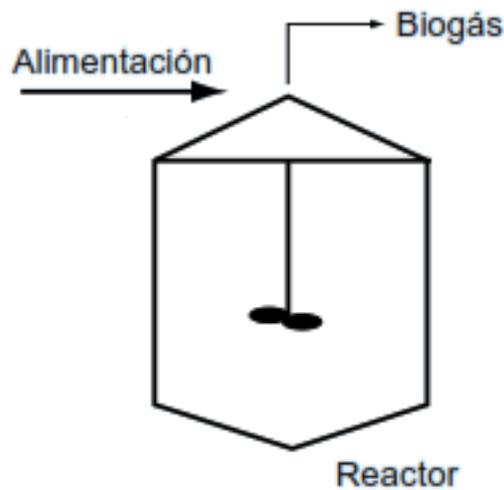


Fuente: elaboración propia con información de MINENERGIA et al. (2011), utilizando software Microsoft PowerPoint.

### 7.2.3.3. **Biodigestores semicontinuos**

Los biodigestores de flujo semicontinuo tienen un proceso pausado en el suministro de materia prima siendo una sola carga al inicio, luego entrando a un régimen estacionario de fermentación, a cierto tiempo transcurrido se carga de nuevo materia prima calculada en función del volumen total del digestor. Para el aprovechamiento de este tipo se instala en áreas rurales teniendo aplicaciones domesticas por su versátil tiempo de carga y capacidad. La carga en digestores semicontinuos no debe tener más de un 8 a 12 % de materia prima basado en procesos experimentales para asegurar un buen funcionamiento del proceso (MINENERGIA *et al.*, 2011).

Figura 5. **Diagrama de flujo biodigestor semicontinuo**



Fuente: elaboración propia con información de MINENERGIA et al. (2011), utilizando software Microsoft PowerPoint.

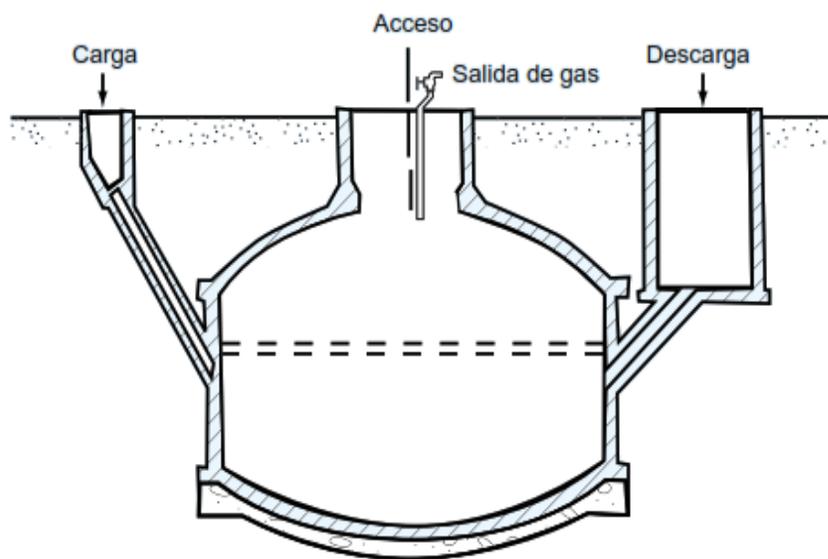
#### **7.2.4. Modelos de biodigestores**

El método de aprovechamiento, el tipo de biodigestor para la obtención de biogás y el modelo del biodigestor serán parte del diseño preliminar para determinar la factibilidad del proyecto. Para tomar una decisión técnica se deben conocer estos modelos junto con sus componentes y características. Para una planta de biogás el “Manual de biogás” (2011) menciona los componentes generales que se instalan para su funcionamiento: reactor, entrada del afluente, salida del afluente, extracción de lodos, sistema de gas, válvulas de seguridad, separador de sedimentos, medidores de gas, medidores y reguladores de presión, almacenador de gas, quemador de gases sobrantes, muestreador, entre otros. (pp. 79-83). Además, presenta varios modelos de biodigestores: modelo chino, modelo indiano, biodigestores horizontales, digestor batch, entre otros. (p. 34). A continuación, solo se mencionarán algunos.

#### 7.2.4.1. Biodigestor tipo chino o cúpula fija

Los biodigestores tipo Chino tienen un sistema cerrado bajo el nivel de la tierra donde herméticamente contiene el biogás, en el artículo publicado por Barrera, Odales, Carabeo, Alba, y Hermida (2020) indican que su construcción es complicada y laboriosa por los materiales sellantes que requiere la cámara de fermentación (p. 306). El biodigestor tiene una sola unidad Rodríguez (2014) señala que se combina la cámara de fermentación y la cámara de desplazamiento usada para la descarga del lodo (p. 38). El peso de la carga de materia prima y su movimiento determina la presión del biogás, cuando se aumenta la presión se tiene una descarga en el tubo de salida alcanzando presiones de hasta 100 cm H<sub>2</sub>O. (MINENERGIA *et al.*, 2011).

Figura 6. Biodigestor tipo chino



Fuente: MINENERGIA et al. (2011). *Diagrama de construcción.*

#### **7.2.4.2. Biodigestor tipo hindú o campana flotante**

Los biodigestores tipo hindú tienen una facilidad operativa, Barrera *et al.* (2020) explican que estos proporcionan gas a una presión constante y según el posicionamiento de la campana será el volumen del gas almacenado (p. 308). Su infraestructura contiene un pozo profundo y un tambor flotante que se eleva por la presión del biogás que se va generando en el proceso de fermentación, teniendo una presión hidrostática por la diferencia de alturas entre la entrada y la salida del sistema (Rodríguez L., 2014). Para su mantenimiento es recomendable programarlo cada año para alargar su vida útil que está en el rango de 8 a 12 años (Barrera *et al.*, 2020).

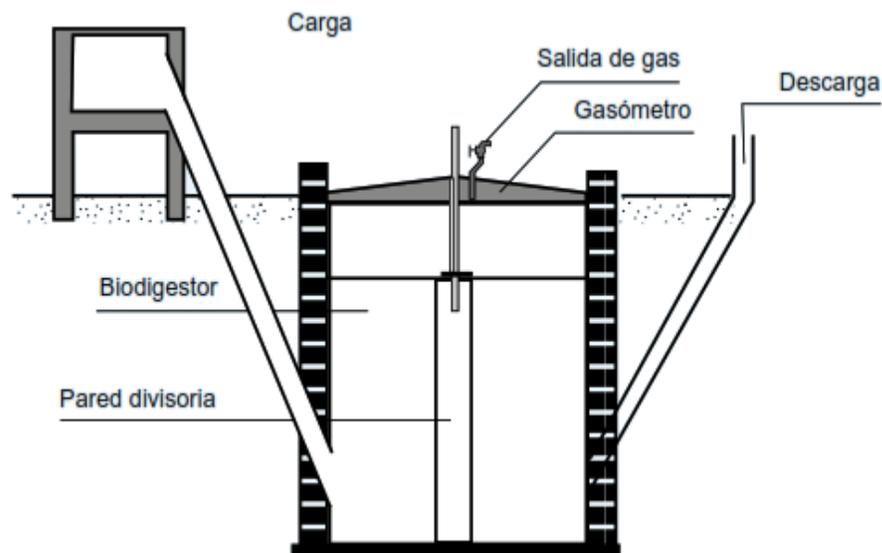
#### **7.2.4.3. Biodigestor tipo taiwanés o estructura flexible**

Los biodigestores tipo taiwanés tienen una facilidad constructiva y operativa. Los materiales a utilizar evitan los trabajos con ladrillos y metal además de la baja profundidad en la que debe ser instalado, Rodríguez (2014) refiere que aproximadamente la zanja es ligeramente más profunda que el radio del digestor (p. 41).

Su funcionamiento es sencillo, la materia prima llega por la tubería de entrada y ocupa la parte inferior del biorreactor mientras que el resto del volumen de la bolsa contendrá el biogás generado durante la operación. Una vez fermentada la materia prima en el biorreactor, el digestato brota por la tubería de salida (Barrera *et al.*, citado en NZILA, Charles, Jo DEWULF, Henri SPANJERS, David TUIGONG, Henry KIRIAMITI a Herman VAN LANGENHOVE 2020).

Aunque su construcción es sencilla el biorreactor es considerado frágil y susceptible a daños mecánicos y a cambios ambientales abruptos considerando su vida útil entre 2 y 5 años. Para poder llegar a una adecuada producción de biogás es necesario que el sistema esté instalado en un ambiente de altas temperaturas sin dejar de lado la fragilidad del biorreactor, teniendo así un programa de monitoreo y mantenimiento recurrente. Aun así, Barrera *et al.* (2020) recalcan que la construcción de estos biodigestores es considerada más fácil a comparación de los biodigestores de tipo chino e hindú (p. 310).

Figura 7. **Biodigestor tipo hindú**

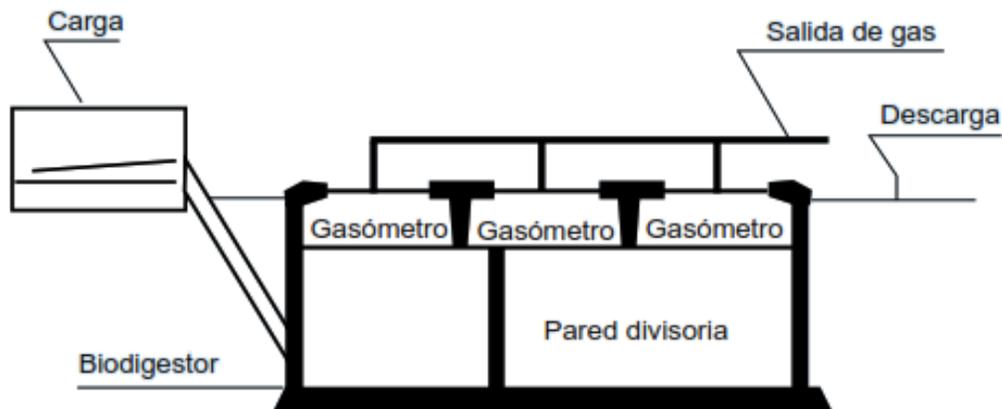


Fuente: MINENERGIA et al. (2011). *Diagrama de construcción.*

Este sistema cuenta con una válvula de seguridad que burbujea, indicando que el biodigestor está lleno (Rodríguez L. , 2014). Se tiene un rango de volúmenes de operación, estimado entre los 5 y 20 m, siendo limitada su operación a una baja disponibilidad de materia prima, aun así, estos

biodigestores pueden generar entre 0,3 y 0,8 m<sup>3</sup> de biogás por m<sup>3</sup> de biodigestor al día. (Barrera *et al.*, citado en NZILA *et al.*, 2020).

Figura 8. **Biodigestor tipo taiwanés**



Fuente: MINENERGIA et al. (2011). *Diagrama de construcción.*

### 7.2.5. GDR en Guatemala

Con el propósito de promover las energías renovables en la matriz energética de Guatemala; robustecer el Sistema Nacional Interconectado; contrarrestar los aumentos de precios de combustibles fósiles y sus derivados; y apoyar las inversiones estratégicas, se llega al concepto de Generador Distribuido Renovable, según el Acuerdo Gubernativo Número 256-97 emite el “Reglamento De La Ley General De Electricidad República De Guatemala” (1997) donde el Artículo 1 define un GDR como: una persona individual o jurídica titular o poseedora de una central generadora de energía eléctrica que aprovecha los recursos renovables como la biomasa, eólica, geotérmica, hidráulica y solar que se conecta a instalaciones de distribución con una potencia que no exceda de 5 MW y son considerados Participantes del Mercado Mayorista (p. 22).

Esta modalidad de participación en el Mercado Mayorista es atractiva por los incentivos económicos, aportes ambientales y contribución social que conlleva. Estos proyectos no solo inyectan energía al SNI sino que también aportan energía eléctrica directamente al funcionamiento del proyecto que lo implemente.

#### **7.2.5.1. Regulaciones, normas y leyes**

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica siendo el ente regulador del Subsector Eléctrico de Guatemala, tiene la facultad de emitir las normas técnicas, el 25 de agosto de 2014 con la Resolución CNEE-227-2014 resuelve manifestar la “*Norma Técnica De Generación Distribuida Renovable Y Usuarios Autoproductores Con Excedentes De Energía*” (2014) con la finalidad de establecer disposiciones generales para la habilitación, implementación y desarrollo de estos generadores de energía eléctrica.

En base a las consideraciones con los que fue creada la NTDGR (2014), se abarca:

- Disposiciones generales de las obligaciones que se les atribuye.
- Autorización ambiental y análisis de la capacidad de conexión.
- Operación dentro del SNI y control de la calidad de energía.
- Comercialización basada en contratos y condiciones de pago de peaje.
- Disposiciones finales de las sanciones, derogatorias y vigencias. (pp. 2-3)

Dada la situación de Guatemala en temas de electrificación rural, la Constitución Política de la República de Guatemala (1993) en el artículo 129 declara de urgencia nacional la participación activa de entidades públicas y privadas para el desarrollo de planes mitigando la problemática (p. 28). Además

de una falta de energía eléctrica en ciertas regiones del país, se busca robustecer el SNI y aumentar las exportaciones de energía por medio de incentivos fiscales, económicos y administrativos descritos en la “Ley De Incentivos Para El Desarrollo De Proyectos De Energía Renovable” (2003) que corresponde al Decreto Numero 52-2003 emitido por El Congreso De La Republica De Guatemala en el 2003 haciendo participe al Ministerio de Energía y Minas; las Municipalidades; el Instituto Nacional de Electrificación; Empresas mixtas; y personas individuales y jurídicas que realicen proyectos de energía con recursos energéticos renovables (p. 95). Para tener una regulación en la calificación y aplicación de los incentivos en el 2005 se emite el “Reglamento De La Ley De Incentivos Para El Desarrollo De Proyectos De Energía Renovable”.

#### **7.2.5.2. Capacidad instalada de GDR en Guatemala**

El Sector Eléctrico de un país aporta al crecimiento económico al tener tecnología innovadora y transformación constante en condiciones de eficiencia, disponibilidad y capacidad. Un país con regulaciones, incentivos y recursos atrae inversiones en proyectos de energía eléctrica.

Dentro de las fuentes de energía con recursos renovables que están consideradas en la NTGDR (2014) son: Biomasa donde se aprovecha la materia orgánica y biodegradable, incluyendo biogás; Eólica producida por el viento; Geotérmica impulsada por el calor natural de la tierra excluidos los hidrocarburos; Hidráulica producida por el agua; Solar obtenida de la radiación solar; y otras que determine el Ministerio de Energía y Minas (p. 7). La operación de proyectos GDR para el año 2020 representa 119.9 MW de potencia hídrica; 13.0 MW potencia solar; 5.9 MW potencia con biogás; y 5 MW potencia con biomasa (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2021).

La matriz de generación de energía eléctrica para julio del 2021 consta de 69.6 % de energía renovable y 30.4 % de energía no renovable (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2021). Según el informe de capacidad instalada en el sistema eléctrico nacional diciembre de 2020 del AMM se tiene 136.68 MW de potencia hídrica; 12.50 MW potencia sola; 20.821 MW potencia con biogás y biomasa; y 4 MW potencia con gas natural (Administrador del Mercado Mayorista, 2021).

### **7.3. Factibilidad en proyectos de bioenergía**

En la etapa de formulación de un proyecto, identificar las variables y las características es necesario para determinar la viabilidad permitiendo así establecer los riesgos económicos y la posibilidad de expansión del negocio ya existente. Chicaiza (2020) en su conferencia menciona que los proyectos de bioenergía son relevantes de estudio por la reducción y eliminación de desechos de los vertederos y la producción de energía eléctrica. Orientado a la investigación, se debe considerar la generación de residuos, este crecimiento se basa principalmente en: crecimiento de la población y crecimiento del PIB (p. 4).

Dados los cambios en la economía, ambiente, sociedad y tecnologías, de pueden crear escenarios para una comparativa y una selección según criterios importantes para cada proyecto. Una de las metodologías plateadas para un sistema de generación eléctrica se basa en utilizar será la de recopilación de datos técnico-económicos del sistema eléctrico actual y futuro que consiste en la recopilación de datos, evaluación de situaciones, análisis de curvas de operación, formulación de escenarios, obtención de costos y selección de propuesta. (Fiscal, 2007).

Otra metodología utilizada por Montaña, Corona y Montelongo, (2009), para el desarrollo de proyectos de aprovechamiento de biogás es el planteamiento y análisis de 10 etapas abarcando los aspectos técnicos, económicos, sociales, ambientales, legales y políticos; integrando finalmente los factores relevantes para determinar la viabilidad del proyecto (pp. 11-12).

### **7.3.1. Factibilidad técnica**

En base a la recopilación de diversos trabajos de investigación relacionados con los aspectos pertinentes para una evaluación técnica de proyectos se enlistan algunos para tomarlos en consideración:

- Años de operación
- Localidades de donde provienen los residuos y su caracterización
- Consumo de materia prima en cada carga diaria
- Análisis de las curvas de operación de los equipos
- Medición de demanda eléctrica de la instalación.
- Nivel de respaldo según requerimientos de la demanda eléctrica.
- Tendencia de las condiciones meteorológicas del sitio (temperatura, humedad y presión).
- Índice de generación de metano.
- Índice de generación potencial de metano.
- Eficiencia del sistema de recolección de biogás.
- Eficiencia de la conversión termoeléctrica de los generadores.
- Factor de planta anual de los generadores.
- Políticas de operación de los generadores de biogás.
- Características técnicas de las cargas eléctricas actuales y futuras.
- Selección de escenarios con análisis de ventajas y desventajas técnicas (Fiscal, 2007, pp. 93-96; Montaña *et al.*, 2009, pp. 11-12).

La recopilación, análisis y comparativa de esta información dará los escenarios, ventajas y desventajas del proyecto, esto para asegurar su vida útil, su adecuada operación y respaldar la inversión.

### **7.3.2. Factibilidad económica financiera**

En base a la recopilación de diversos trabajos de investigación relacionados con los aspectos pertinentes para una evaluación económica de proyectos se enlistan algunos para tomarlos en consideración:

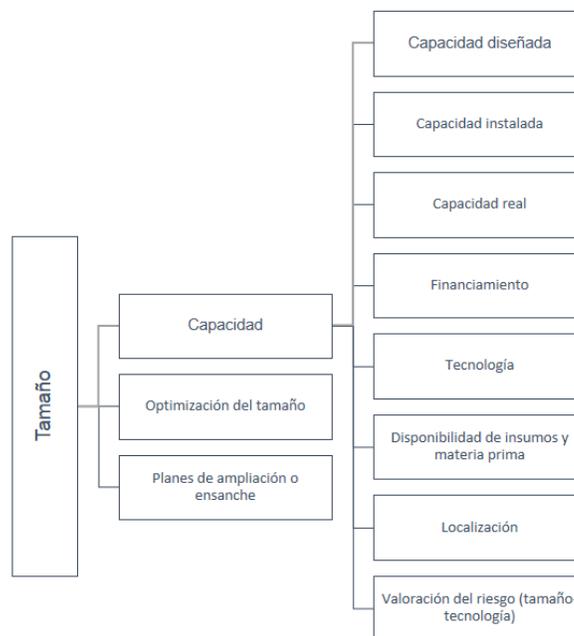
- Costos operativos y administrativos
- Costos de servicio de transmisión
- Crecimiento de la población
- Crecimiento del PIB
- Tasa de Rendimiento Mínima Atractiva (TREMA) para su instalación.
- Costos de operación de los biodigestores.
- Precio del gas combustible para arranque o emergencias.
- Costos de mano de obra y material para mantenimiento eléctrico, mecánico y electrónico, entre otros.
- Costo de desmantelamiento de equipos en caso de requerirse.
- Evaluación económica de escenarios planteados.
- Estimar el costo del kWh generado para los diversos escenarios técnicamente factibles.
- Obtención de los indicadores económicos del Período de Recuperación (PR), Valor Presente Neto (VPN), la Anualidad Equivalente (AE), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y la relación Beneficio-Costo (B/C), a partir de los beneficios de la venta de energía eléctrica (Fiscal, 2007, pp. 93-96; Montaña *et al.*, 2009, pp. 11-12).

La recopilación, análisis y comparativa de esta información dará los escenarios, ventajas y desventajas del proyecto, esto para asegurar los años de operación, ingreso de ganancias y respaldo de la inversión.

### 7.3.3. Variables de un proyecto de generación eléctrica

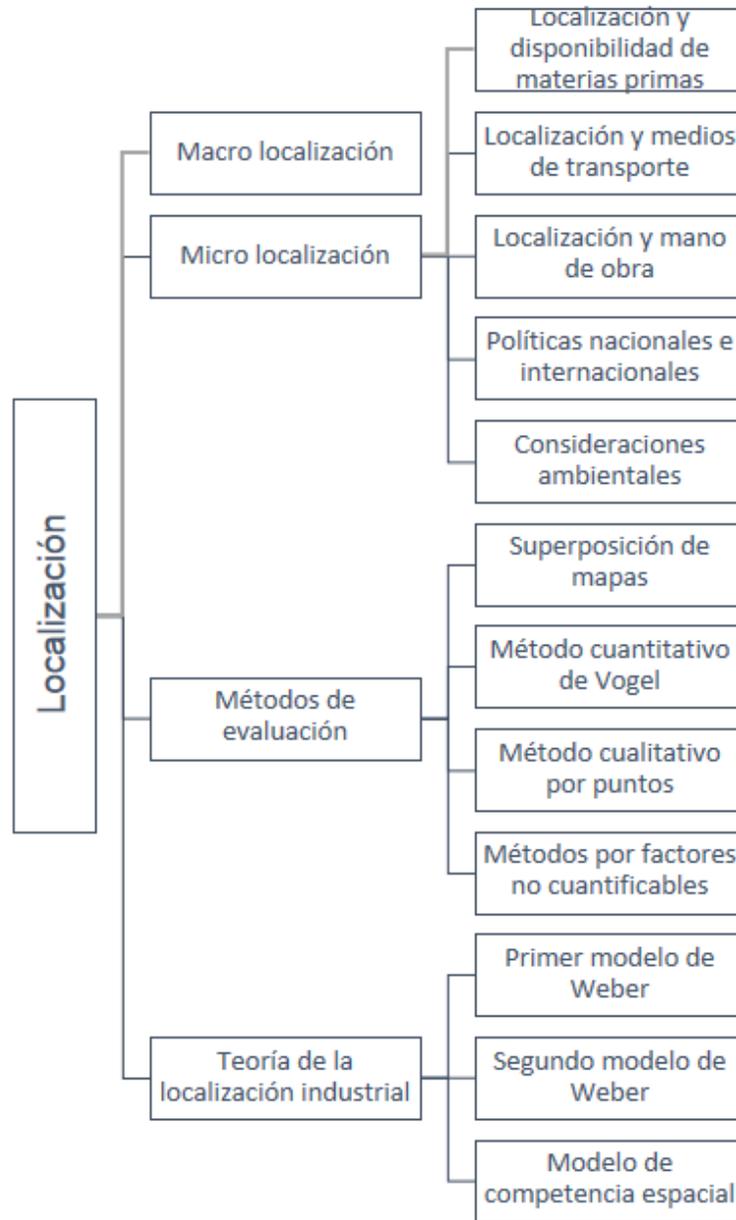
Como complemento para el análisis de la investigación, se presentan las variables independientes y dependientes que Garzón y Salazar (2015) recopilaron de diversas investigaciones para la formulación de etapas para el desarrollo de un proyecto de biogás. El Tamaño, Localización e Ingeniería de proyecto son variables que dan pautas para la optimización de recursos, satisfacción de la demanda y rentabilidad (p. 1).

Figura 9. Variables independientes y dependientes del tamaño



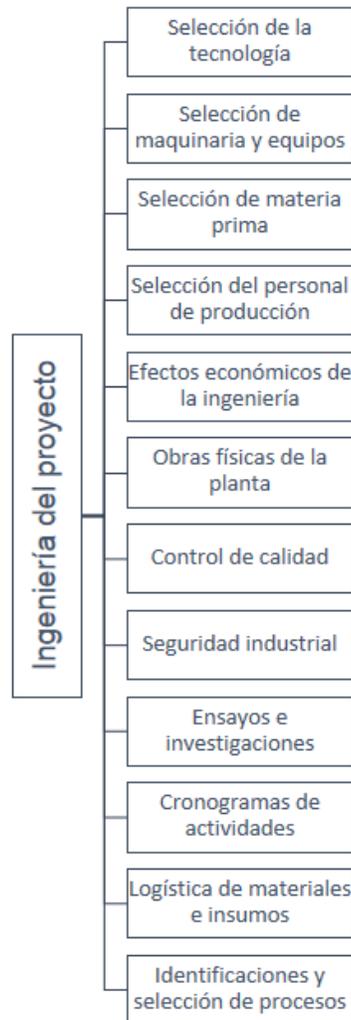
Fuente: Garzón y Salazar (2015). *Técnicas de formulación de proyectos*.

Figura 10. **Variables independientes y dependientes de localización**



Fuente: Garzón y Salazar (2015). *Técnicas de formulación de proyectos*.

Figura 11. **Variables interdependientes de ingeniería del proyecto**



Fuente: Garzón y Salazar (2015). *Técnicas de formulación de proyectos*.

Se recomienda desarrollar una matriz de impacto cruzada que permita analizar la viabilidad del proyecto de forma integral desde los factores de éxito y los puntos críticos que determinan el fracaso del proyecto.

## **8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS**

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

### **1. MARCO TEÓRICO**

#### **1.1. Manejo y aprovechamiento de RSU**

##### **1.1.1. Gestión de RSU en América Latina y el Caribe**

1.1.1.1. Consecuencias del mal manejo de desechos

1.1.1.2. Aplicaciones de RSU

##### **1.1.2. Gestión de RSU en Guatemala**

1.1.2.1. Estrategias para el manejo y aprovechamiento de residuos sólidos

1.1.2.2. Aprovechamiento de los RSU

1.1.2.3. FORSU en el mercado Concepción, Villa Nueva, Guatemala

#### **1.2. Características, tecnologías y gestión de bioenergía**

1.2.1. Características de la biomasa y la bioenergía

1.2.2. Producción de Energía a partir de la FORSU

1.2.3. Tipos de biodigestores para obtención de biogás

1.2.3.1. Biodigestores de Flujo Continuo

- 1.2.3.2. Biodigestores de Flujo Discontinuo
- 1.2.3.3. Biodigestores Semi-Continuo
- 1.2.4. Modelos de biodigestores
  - 1.2.4.1. Biodigestor tipo Chino o Cúpula Fija
  - 1.2.4.2. Biodigestor tipo Hindú o Campana Flotante
  - 1.2.4.3. Biodigestor tipo Taiwanés o Estructura Flexible
- 1.2.5. GDR en Guatemala
  - 1.2.5.1. Regulaciones, Normas y Leyes
  - 1.2.5.2. Capacidad instalada de GDR en Guatemala
- 1.3. Factibilidad en proyectos de bioenergía
  - 1.3.1. Factibilidad técnica
  - 1.3.2. Factibilidad económica financiera
  - 1.3.3. Variables de un proyecto de generación eléctrica

## 2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

- 2.1. Características del estudio
  - 2.1.1. Diseño
  - 2.1.2. Enfoque
  - 2.1.3. Alcance
  - 2.1.4. Unidad de análisis
- 2.2. Variables
- 2.3. Fases del desarrollo de la investigación
  - 2.3.1. Fase 1
  - 2.3.2. Fase 2
  - 2.3.3. Fase 3
  - 2.3.4. Fase 4
  - 2.3.5. Fase 5
  - 2.3.6. Resultados esperados

### 3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1. Proyecciones de aspectos técnicos

##### 3.1.1. Escenarios analizados

##### 3.1.2. Tablas comparativas con características de biodigestores

##### 3.1.3. Producción de energía del proyecto

#### 3.2. Proyecciones de aspectos económicos

##### 3.2.1. Inversión inicial

##### 3.2.2. Análisis del VAN

##### 3.2.3. Costos de oportunidad

#### 3.3. Proyecciones de aspectos ambientales

##### 3.3.1. Tendencia de los GEI

#### 3.4. Proyecciones de aspectos sociales

##### 3.4.1. Tendencia de la tasa de crecimiento poblacional

##### 3.4.2. Interés de los inquilinos del mercado Concepción respecto a proyectos de bioenergía

### 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. Aspectos técnicos óptimos para el proyecto

##### 4.1.1. Biodigestor idóneo para aprovechamiento de FOSRU

##### 4.1.2. Producción de energía y vida útil del proyecto

#### 4.2. Aspectos económicos óptimos para el proyecto

##### 4.2.1. Monto y tiempo de recuperación de inversión

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS



## **9. METODOLOGÍA**

El diseño de la investigación a desarrollarse se cataloga como, diseño de investigación no experimental clasificada por objetivo y con un alcance descriptivo realizando un análisis del impacto multisectorial enfocado en variables cuantitativas. Tiene como propósito investigar las características, tecnologías y parámetros que influyen en la implementación de un proyecto de generación de energía eléctrica con reutilización de la FORSU.

### **9.1. Características del estudio**

El enfoque de la investigación propuesta es cuantitativa abordando los parámetros técnicos de implementación, los datos de disponibilidad de la FORSU y potencia energética capaz de generar.

El alcance es descriptivo realizando un análisis del impacto multisectorial y la factibilidad del proyecto, se limita a los recursos de un mercado municipal específico por el estudio ambiental que se tiene como antecedente. Tomar en cuenta que el proyecto analizado es una instalación de generación de energía eléctrica a base del aprovechamiento de la FORSU como materia prima, siendo este un factor clave para el cumplimiento del impacto multisectorial que se busca y un óptimo aprovechamiento en la producción de biogás.

### **9.2. Unidades de análisis**

La población a estudiarse es la FORSU proveniente del mercado Concepción en Villa Nueva, Guatemala, lugar donde se tiene una caracterización

y cuantificación de este recurso base para el análisis del proyecto propuesto, dato relevante para determinar la factibilidad del proyecto. Para la obtención de la información se tomará como base las investigaciones descriptivas, artículos científicos y bases científicas establecidas en previos estudios.

### 9.3. Variables

Para realizar mediciones en la investigación se tomarán datos en condiciones iguales para cada uno de los escenarios y se llenará la Tabla IV. para documentar los valores a considerar:

Tabla IV. **Categorías de mediciones de variables**

Criterio Variable	Categórica		Numérica		Manipulable	Observable	Nivel de medición
	Dicotómica	Policotómica	Discreta	Continua			
RSU				X		X	De razón
FORSU				X		X	De razón
Potencia				X	X		Nominal
Eficiencia de conversión energética de la tecnología				X		X	Ordinal
Gases de efecto invernadero				X		X	De razón
Tasa de crecimiento poblacional				X		X	De razón
Costo de oportunidad				X		X	De razón
Valor actual neto (VAN)				X		X	De razón

Fuente: elaboración propia, utilizando software Microsoft Excel.

Ampliando sobre las semejanzas de las variables relacionadas con el trabajo de graduación, se presenta la tabla V.

Tabla V. **Definiciones de variables**

<b>Variable</b>	<b>Definición teórica</b>	<b>Definición operativa</b>
RSU	Los residuos sólidos urbanos (RSU) son los desechos que se producen en diferentes áreas de las ciudades.	Pesaje de los residuos generados cada día en el sitio a estudiar (ton/día)
FORSU	La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) son los desechos que se producen en diferentes áreas de las ciudades, delimitado a todo lo que es de origen vegetal y animal.	Pesaje de los residuos generados cada día en el sitio a estudiar (ton/día)
Potencia	Es la proporción por unidad de tiempo con la cual la energía eléctrica es transferida por un circuito eléctrico.	Dependiendo de la tecnología seleccionada y la cantidad de biogás generado, se calculara la potencia del sistema (MW)
Eficiencia de conversión energética de la tecnología	Es la relación entre la salida útil de una máquina de conversión de energía y la entrada, en términos de energía.	Potencia generada con relación de la materia prima que se cargue (%)
Gases de efecto invernadero (GEI)	Son gases dañinos para la atmosfera de la tierra, entre estos el vapor de agua (H <sub>2</sub> O), el dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ), el óxido nitroso (N <sub>2</sub> O), el metano (CH <sub>4</sub> ) y el ozono (O <sub>3</sub> ).	Datos estadísticos y científicos de otras investigaciones (Ton CO <sub>2</sub> )
Tasa de crecimiento poblacional	Es un indicador importante para conocer la evolución de la población, permite medir el aumento (crecimiento) o disminución (decrecimiento) de la población de un territorio para un período determinado, el cual indica los cambios que experimenta la población a causa de tres fenómenos demográficos fundamentales: migración, mortalidad y fecundidad	Por estadísticas realizadas por el Instituto Nacional de Estadística Guatemala (INE) (%)

Continuación tabla V.

<b>Costo de oportunidad</b>	<b>Es el coste de la alternativa a la que renunciamos cuando tomamos una determinada decisión, incluyendo los beneficios que podríamos haber obtenido de haber escogido la opción alternativa.</b>	<b>Se calcula considerando las opciones, los gastos de cada opción, el retorno de cada inversión, se elegirá la opción más beneficiosa y se calculará el coste de oportunidad (Q)</b>
<b>Valor actual neto (VAN)</b>	Es un criterio de inversión que consiste en actualizar los cobros y pagos de un proyecto o inversión para conocer cuánto se va a ganar o perder con esa inversión.	Se calcula considerando la inversión y los flujos de caja (%)

Fuente: elaboración propia, utilizando software Microsoft Excel.

#### **9.4. Fases del estudio**

La investigación se pondrá en marcha acorde a una serie de fases, iniciando por la recopilación de referencias bibliográficas como bases científicas para el planteamiento y guía del trabajo, finalizando con un análisis de los resultados determinando la factibilidad del proyecto de bioenergía según las condiciones del mercado Concepción en Villa Nueva, Guatemala.

##### **9.4.1. Fase 1**

En la primera fase se realizará la lectura y selección de las relevantes referencias bibliográficas que aporten valor a la investigación, constituida por artículos científicos, tesis, informes, libros y compendios. Con la información digerida se desarrollará el marco teórico logrando identificar variables pertinentes para una evaluación técnica económica, se examinarán los objetivos establecidos del trabajo de investigación y finalmente relacionar la información necesaria para interpretar los resultados.

Dentro de la literatura de interés se encuentra el estado actual de la GIRS en América Latina y el Caribe, características de la bioenergía y el marco regulatorio nacional referente a los GDR para conocer los beneficios que conllevan.

#### 9.4.2. Fase 2

En la segunda fase se recopilará la información necesaria para la formulación de escenarios y desarrollo de la investigación. Se determinarán parámetros científicos establecidos por estudios previos para proyectos de bioenergía y estudios medio ambientales que serán considerados en la investigación. Entre estos están:

- Se considera que la muestra del mercado Concepción generada diariamente es de 1,144 kg de residuos orgánicos (Aldana, 2021, p. 92).
- Para los biodigestores flexibles se estima una generación entre 0.3 y 0.8 m<sup>3</sup> de biogás por m<sup>3</sup> de biodigestor al día (24 horas) (Barrera et al., citado en NZILA, Charles, Jo DEWULF, Henri SPANJERS, David TUIGONG, Henry KIRIAMITI a Herman VAN LANGENHOVE 2020).
- Si la capacidad lo permite se puede producir 195 m<sup>3</sup> de biogás por cada tonelada de FORSU (García citado en Cuesta, 2019).
- Si la capacidad lo permite se puede producir 370 m<sup>3</sup> de biogás por cada tonelada de FORSU (García citado en Curry, 2019).
- La potencia energética dependerá del caudal de biogás utilizando la siguiente ecuación:

$$Potencia\ disponible\ (kW) = \eta_t * PCI_{biogás} * Q_{biogás}$$

Donde:

$\eta_t$ : Rendimiento térmico de la generación eléctrica. Para escenarios de bajo, medio y alto, tomar los valores respectivamente, 25, 30 y 40 %.

$PCI_{biogás}$ : Poder calorífico inferior del biogás: se asume 5 kWh/m<sup>3</sup>

$Q_{biogás}$ : Caudal de biogás capturado, para escenarios de bajo, medio y alto (CH<sub>4</sub> m<sup>3</sup>/hora) (Banco Interamericano de Desarrollo, 2017, p. 34)

Se plantearán los biodigestores más comunes y convenientes para el proyecto enlistando algunas de las características y condiciones contemplando su construcción y operación, entre estas están: rangos de capacidad de retención de carga, niveles de presión, niveles de temperatura, áreas de instalación, nivel de dificultad para su construcción, complejidad de la operación del sistema, características de mantenimiento, vida útil, entre otros (Rodríguez L. , 2014)

Como parte de una alternativa para los resultados, se realizarán encuestas de auto-completado a los inquilinos del mercado Concepción para conocer sus opiniones sobre la recolección y aprovechamiento de la FORSU para la generación de energía eléctrica, siendo esta una opción para el autoconsumo trayendo beneficios económicos para todos los involucrados. Para familiarizar a los inquilinos se les dará información previa a la encuesta para que sean objetivos con las respuestas.

Se presenta una recopilación de las preguntas y posibles respuestas para la encuesta en la tabla VI. el modelo se tiene en una nube de datos ya que se harán las encuestas de forma digital para reducir los recursos siendo beneficioso para el ambiente y mantener los protocolos de bioseguridad:

Tabla VI. Encuesta para los inquilinos del mercado Concepción

<b>ANÁLISIS DE PROYECTO DE BIOENERGÍA EN MERCADO CONCEPCIÓN, VILLA NUEVA, GUATEMALA</b>	
<b>Preguntas</b>	<b>Posibles respuestas</b>
<b>Ingreso de datos</b>	
Nombre	
Nivel donde se ubica el local	
Numero de local	
Cargo desempeñado en el local	Encargado Colaborador
Naturaleza del local	Venta de verduras y frutas Venta de carnes Venta de artículos varios Venta de ropa Venta de comida para consumo en sitio
<b>Relevante al proyecto</b>	
¿Esta consiente de los problemas ambientales que este sobre llevando el mundo?	Si No
¿Actualmente ejecuta alguna acción para la disminución del impacto ambiental (reutilización, reciclaje, reducción)	Si No
¿Estaría interesado(a) en poder realizar una pequeña acción para la reducción de los efectos negativos al medio ambiente?	Si No
¿Dividiría sus residuos orgánicos en algún contenedor específico? (vegetales, frutas y granos)	Si No
¿La información proporcionada previamente le ayudo para comprender el objetivo de la investigación en curso?	Sí, la información fue clara No, la información no fue suficiente

Continuación tabla VI.

Beneficios del proyecto	
<b>¿Considera que consume mucha energía eléctrica en el local?</b>	Si No
<b>¿Estaría interesado(a) en reducir el pago de energía eléctrica en el local?</b>	Si No
Valoración del aporte humano	
<b>Del 1 al 10 indicar si estaría dispuesto a colocar los residuos orgánicos (vegetales, frutas y granos) en contenedores específicos</b>	Calificación del 1 al 10
<b>Del 1 al 10 indicar si estaría dispuesto a comunicar los beneficios del proyecto de bioenergía para que todos participen en la iniciativa</b>	Calificación del 1 al 10
<b>Del 1 al 10 indicar si estaría dispuesto a colaborar en la instalación del proyecto (mano de obra)</b>	Calificación del 1 al 10

Fuente: elaboración propia, utilizando software Microsoft Excel.

### 9.4.3. Fase 3

En la tercera fase se agendarán reuniones con un experto en el diseño, instalación y equipamiento de biodigestores. En base a la información recopilada y los escenarios del proyecto se pretende robustecer la investigación con su experiencia y datos recabados durante su desarrollo como profesional. Esta fase dará una perspectiva real de un proyecto de bioenergía, tomando en cuenta los beneficios y retos que se podrían presentar en los escenarios modelados. Se tendrá el acompañamiento del experto a lo largo del desarrollo de la investigación

para un adecuado análisis e interpretación de los resultados obtenidos, siendo así el co-asesor de este trabajo.

#### **9.4.4. Fase 4**

En la cuarta fase se revisarán los datos obtenidos y se tabularán acorde a las metodologías planteadas en el marco teórico para un análisis de factibilidad y minimizar los riesgos de inversión y operación. Se tomará en cuenta las características técnicas, económicas y ambientales. Además de las recomendaciones y puntos de vista del co-asesor.

Se tendrá un análisis utilizando:

- Tablas comparativas con las características y los componentes de los biodigestores identificando sus ventajas y desventajas.
- Tabla con las características de operación de cada escenario del proyecto de bioenergía.
- Análisis del coeficiente de correlación de Pearson para la proyección de producción de FORSU en el mercado Concepción.
- Graficas de dispersión para la proyección del potencial accesible de producción de biogás en el mercado Concepción dado el aumento anual del crecimiento poblacional.
- Análisis de métodos estáticos o dinámicos, en concreto la regresión lineal para determinar la Tasa de crecimiento poblacional.
- Análisis de métodos estáticos o dinámicos, determinando el Costo de Oportunidad.
- Análisis de métodos estáticos o dinámicos, en concreto, el Valor actual neto (VAN) para la viabilidad económica de la inversión.

- Varianza estadística para comparar los niveles de generación y respaldo de energía en los diversos escenarios.
- Gráficas de columnas para conocer el interés de los inquilinos del mercado Concepción respecto al proyecto de bioenergía, enfocado en la reutilización de residuos, ahorro energético y alternativas con el biol.
- Gráfico de araña comparando las múltiples variables cuantificadas para una mejora del proyecto aumentando su vida útil.

#### **9.4.5. Fase 5**

En la quinta fase se realizará la interpretación de resultados y comparaciones con bases científicas y exploratorias sobre la factibilidad del proyecto según las condiciones de los escenarios modelados desde el punto de vista técnico y económico.

En base a las tablas comparativas se seleccionará el digestor que tenga un mayor aprovechamiento del biogás y una mayor producción de energía eléctrica, además de considerar las dificultades de su construcción, mantenimiento y operación.

Se realizará un análisis de sensibilidad para la factibilidad del proyecto específicamente interpretando el modelo bidimensional del VAN donde se consideraron las variables de los escenarios de costos de producción de energía eléctrica por tonelada recuperada de FORSU y los escenarios de precios de venta de la energía según el comportamiento del mercado eléctrico nacional. Con las consideraciones base de los escenarios propuestos en la investigación se obtendrá el VAN llegando a una conclusión sobre cuanto se va a ganar o perder con esta inversión.

En el aspecto ambiental se interpretarán los resultados de la proyección de los gases de efecto invernadero sabiendo el aporte al medio ambiente que el proyecto puede tener. En el aspecto social se interpretarán los resultados de la proyección de la tasa de crecimiento poblacional siendo un indicativo del aumento de la generación de desechos y residuos sólidos en el departamento aportando a la carga de materia prima.

Se realizarán graficas de columna para comprar los resultados de las encuestas conociendo el interés de los inquilinos del mercado Concepción, esto podría impulsar, facilitar y agilizar parte de la recolección y clasificación de los residuos, haciendo más eficiente el proyecto.

#### **9.4.6. Resultados esperados**

Dentro de los resultados esperados se tomarán en consideración los objetivos del trabajo de graduación para cotejar que los datos obtenidos y los análisis realizados se apeguen a lo buscado.

Se pretende obtener las condiciones de operación del biodigestor ideal para el aprovechamiento de la FORSU del mercado Concepción e identificar parámetros que se deberían de cambiar o mejorar para la generación de energía eléctrica basado en la viabilidad económica y así ser una base para las inversiones de proyectos de bioenergía.

Con las encuestas realizadas en el mercado Concepción se espera una aceptación e interés de los inquilinos por el proyecto de bioenergía contribuyendo al aspecto social por estas iniciativas. Tener un respaldo para la promulgación en otros mercados potenciales para un impacto a nivel nacional.

Recomendar proyectos de bioenergía a nivel departamental para impulsar los estudios ambientales, la recuperación de áreas afectadas, aprovechamiento de residuos y desechos sólidos y mejorar la calidad de vida de los lugareños.

## 10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Para la realización del presente trabajo de graduación se utilizará la comparación cuantitativa y herramientas de análisis estadístico para predecir los escenarios posibles.

Para el análisis técnico en base a la caracterización de la FORSU del mercado Concepción y las condiciones de operación entre ventajas y desventajas de los tipos de biodigestores se verificará un adecuado nivel de tensión, nivel de respaldo y cumplimiento de demanda, Fiscal (2007) recomienda considerar los siguientes datos:

- Potencial de generación eléctrica que se pueda obtener
- Potencia de demanda de los equipos de seguridad del proyecto
- Equipos y componentes necesarios para el aprovechamiento de la FORSU
- Acceso de la tecnología y materiales
- Áreas de instalación disponibles (p. 93)

Para el análisis económico en base a la caracterización de la FORSU y el biodigestor que sea más conveniente se determinará la compensación financiera por el potencial de generación eléctrica inyectado a la red eléctrica que se pueda obtener, Fiscal (2007) recomienda considerar los siguientes datos:

- Costo de venta de la energía
- Costo de personal capacitado para la operación de la central generadora
- Costos de mantenimiento
- Inversión inicial (p. 93)

Además de obtener el costos de operación, el VAN, la tasa de crecimiento poblacional y el costo de oportunidad. Estos se desarrollarán de la siguiente manera:

- Costos de operación: considerando los recursos para su funcionamiento y mantenimiento.
- VAN: Por medio de un análisis de sensibilidad bidimensional buscando establecer las dos variables de mayor incidencia, considerando los escenarios de costos de producción por tonelada de FORSU y los escenarios de precios de venta.
- Tasa de crecimiento poblacional: se utiliza la regresión lineal a los datos presentados por el INE.
- Cosos de oportunidad: considerando el equipo y componentes necesarios para el biodigestor que recolectara el biogás y comparándolo con dos escenarios, el primero solo tener el capital disponible y segundo tener el capital en un plazo fijo teniendo una ganancia por intereses en un banco donde se considerara el porcentaje de mayor beneficio.

Como parte de una alternativa para los resultados, se realizarán encuestas de auto-completado a los inquilinos del mercado Concepción para conocer sus opiniones sobre la recolección y aprovechamiento de la FORSU para la generación de energía eléctrica, siendo esta una opción para el autoconsumo trayendo beneficios económicos para todos los involucrados. Ver la propuesta de la encuesta en el apéndice.





## 12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Para el presente trabajo de graduación se realizará con recursos propios del estudiante de maestría, se tendrán en cuenta la siguiente inversión para el desarrollo y recolección de datos resumida en la tabla VII.

Tabla VII. **Recursos necesarios para el desarrollo de la investigación**

<b>Recurso</b>	<b>Costo</b>
Curso sobre diseño de Biodigestores (aporte de valor para el análisis de la investigación)	Q 2,500.00
Viáticos para el curso (combustible y alimentación)	Q 1,000.00
Viáticos para visitas al mercado Concepción (combustible y alimentación)	Q 1,200.00
Resmas de hojas para documentación de protocolo	Q 200.00
Impresiones de documentación de protocolo	Q 500.00
Honorarios del Asesor	Q 2,500.00
Honorarios de la Investigadora	Q 10,000.00
<b>TOTAL</b>	<b>Q 17,900.00</b>

Fuente: elaboración propia, utilizando software Microsoft Excel.

El dato base para la realización del proyecto, siendo este la cantidad de FORSU del mercado Concepción, se adquiere de un trabajo de investigación de graduación de la Maestría en Artes en Energía y Ambiente de Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, trabajo citado y reconocido en este trabajo. Se tendrá la participación activa de los inquilinos del mercado Concepción para la realización de las encuestas. Los equipos necesarios para el análisis técnico serán

accesibles por medio del desarrollo del curso sobre Diseño de Biodigestores y el acompañamiento de los instructores que serán asesores secundarios.

Siendo los recursos técnicos y económicos suficientes para el trabajo de graduación, considerando así que es factible continuar con el desarrollo de este aporte investigativo.

### 13. REFERENCIAS

1. Administrador del Mercado Mayorista. (2021). *Capacidad instalada en el sistema eléctrico diciembre de 2020*. Guatemala. Obtenido de <https://www.amm.org.gt>
2. Aldana, L. (2021). *Propuesta de manejo de los residuos sólidos orgánicos por medio del método de compostaje aeróbico controlado, en el mercado Concepción del municipio de Villa Nueva, departamento de Guatemala*. Guatemala: (Tesis Maestria, Universidad de San Carlos de Guatemala).
3. André, F., & Cerdá, E. (2006). Gestión de residuos sólidos urbanos análisis económico y políticas públicas. *Cuadernos Económicos de ICE*. Obtenido de <https://n9.cl/blyes>
4. Banco Interamericano de Desarrollo. (2017). *Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico*. Buenos Aires. Obtenido de <https://publications.iadb.org>
5. Barrera, E., Odales, L., Carabeo, A., Alba, Y., & Hermida, F. (2020). Recopilación de aspectos teóricos sobre las tecnologías de producción de biogás a escala rural. *Tecnología química*, 303-321. Obtenido de <http://ref.scielo.org/v5wj2q>
6. BID, B., AIDIS, A., & OPS, O. (2010). *Informe de la evaluación regional del manejo de residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe*. Obtenido de <https://publications.iadb.org>

7. Bolaños, R. (20 de Julio de 2015). Generan electricidad por medio de gas metano. *Prensa Libre*. Obtenido de <https://www.prensalibre.com>
8. Chicaiza, C. (2020). Tecnologías modernas para el tratamiento de residuos sólidos urbanos. *I Congreso de Biotecnología y Encuentro de Estudiantes de Biotecnología*. Puyo. doi:10.13140/RG.2.2.13818.93120
9. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (1997). *Reglamento de la ley general de electricidad*. Guatemala. Obtenido de <https://www.cnee.gob.gt>
10. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (2003). *Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable*. Guatemala. Obtenido de <https://www.cnee.gob.gt>
11. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (2014). *Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía*. Guatemala. Obtenido de <https://www.cnee.gob.gt>
12. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (2021). *Informe estadístico UAEE y GDR 2020*. Guatemala. Obtenido de <https://www.cnee.gob.gt>
13. Congreso de la República de Guatemala. (2003). *Decreto No. 52-5003, Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable*. Guatemala. Obtenido de [https://www.congreso.gob.gt/seccion\\_informacion\\_legislativa/decretos](https://www.congreso.gob.gt/seccion_informacion_legislativa/decretos)

14. Diputados de la Asamblea Nacional Constituyente. (1993). *Constitución política de la república de Guatemala*. Guatemala. Obtenido de <https://www.cijc.org>
15. D-Waste, ISWA, University of Leeds, WtERT, Sweep-Net, & SWAPI. (2014). *Waste atlas The world's fifty biggest dumpsites*. Obtenido de <http://www.atlas.d-waste.com>
16. Escobar, C., Rúa, D., Silva, E., Venturini, O., & Mambeli, R. (2015). Procesos biológicos de conversión. En *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad* (págs. 123-160). Bogotá: Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/312535899>
17. Fazenda, A., & Tavares-Russo, M. (2016). Caracterización de residuos sólidos urbanos en Sumbe: herramienta para gestión de residuos. *Ciencias Holguín, Angola*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181548029002>
18. Fernández González, J., & Zamorano, M. (2017). Aplicación de tecnologías WTE en el tratamiento de los residuos municipales en España: una herramienta imprescindible en la implementación de la economía circular. *VII Simposio Iberoamericano en Ingeniería de Residuos: hacia una Economía Circular*. España. Obtenido de <https://n9.cl/etjps>
19. Fiscal, R. (2007). Metodología de análisis para estudios de factibilidad técnica-económica en sistemas de generación eléctrica costa fuera. *Boletín IIE*, 92-97. Obtenido de <https://www.ineel.mx>

20. Flores Contreras, L. (2018). *Modelo de gestión para la erradicación de basureros clandestinos, estudio de dos casos en el municipio de Villa Nueva*. Guatemala: (Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala). Obtenido de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/12108>
21. García, J. (2019). *Potencial de biogás producido por la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos en Guatemala*. Guatemala: (Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala). Obtenido de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/13325>
22. Garzón, C., & Salazar, J. (2015). *Técnicas para determinar la viabilidad técnica de un proyecto en la etapa de formulación*. Santiago de Cali: (Tesis de especialización, Universidad de San Buenaventura Cali). Obtenido de <http://hdl.handle.net/10819/3065>
23. Girón Brincker, E. (2017). *Elaboración de un plan de manejo integral de residuos sólidos para el vertedero controlado, ubicado en el km 22, Carretera Al Pacífico, Villa Nueva, Guatemala*. Guatemala: (Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala). Obtenido de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/7542>
24. Islas, J., & Martínez, A. (2010). Bioenergía. *Ciencia*, 30-39. Obtenido de <https://www.revistaciencia.amc.edu.mx>
25. Kaza, S., Yao, L., Bhada, P., & Van, F. (2018). *What a Waste 2.0: Una instantánea global de la gestión de residuos sólidos hasta 2050*. Washington: Banco Mundial. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10986/30317>

26. MINENERGIA, G. d., PNUD, P. d., FAO, O. d., & GEF, G. E. (2011). *Manual de biogás*. Chile. Obtenido de <http://www.fao.org>
27. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2015). *Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos*. Guatemala. Obtenido de <https://www.marn.gob.gt>
28. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2016). *Guía Práctica para la Formulación de Planes Municipales para la Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos*. Guatemala. Obtenido de <https://www.marn.gob.gt>
29. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2017). *Estadística de vertederos de basura sin control a nivel nacional*. Guatemala. Obtenido de <https://www.marn.gob.gt>
30. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Guía para elaborar Estudios de Caracterización de Residuos Sólidos Comunes*. Guatemala. Obtenido de <https://www.marn.gob.gt>
31. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2021). *Memoria de labores 2020-2021*. Guatemala. Obtenido de <https://www.marn.gob.gt>
32. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2021). *Reglamento para la gestión integral de los residuos y desechos sólidos comunes*. Guatemala. Obtenido de <https://sgp.gob.gt>

33. Ministerio de Energía y Minas. (2018). *Política energética 2019-2050*. Guatemala. Obtenido de <https://mem.gob.gt/politica-energetica-2019-2050-2/>
34. Montañó Arango, O., Corona Armenta, J., & Montelongo Reyes, M. (2009). Metodología sistémica para el desarrollo de un proyecto de Biogás. *XIII Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Administrativas La administración frente a la globalización: Gobernabilidad y desarrollo* 5, 6, 7 y 8. Hidalgo. Obtenido de <https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/handle/123456789/7995>
35. Moratorio, D., Rocco, I., & Castelli, M. (2012). Conversión de residuos sólidos urbanos en energía. Obtenido de <https://core.ac.uk/reader/335340914>
36. Moya, D., Aldás, C., López, G., & Kaparaju, P. (2017). Municipal solid waste as a valuable renewable energy resource: a worldwide opportunity of energy recovery by using Waste-To-Energy Technologies. *9th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings*. Greece. doi:10.1016/j.egypro.2017.09.618
37. Municipalidad de Guatemala. (2020). *Dirección de gestión y manejo de residuos y desechos sólidos*. Guatemala. Obtenido de <http://www.muniguate.com>
38. ONU, O. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Santiago. Obtenido de <https://repositorio.cepal.org>
39. Posso, F. (2004). Estudio del desarrollo de las energías alternativas en Venezuela. *Anales del Decanato de Investigación y Desarrollo Académico*

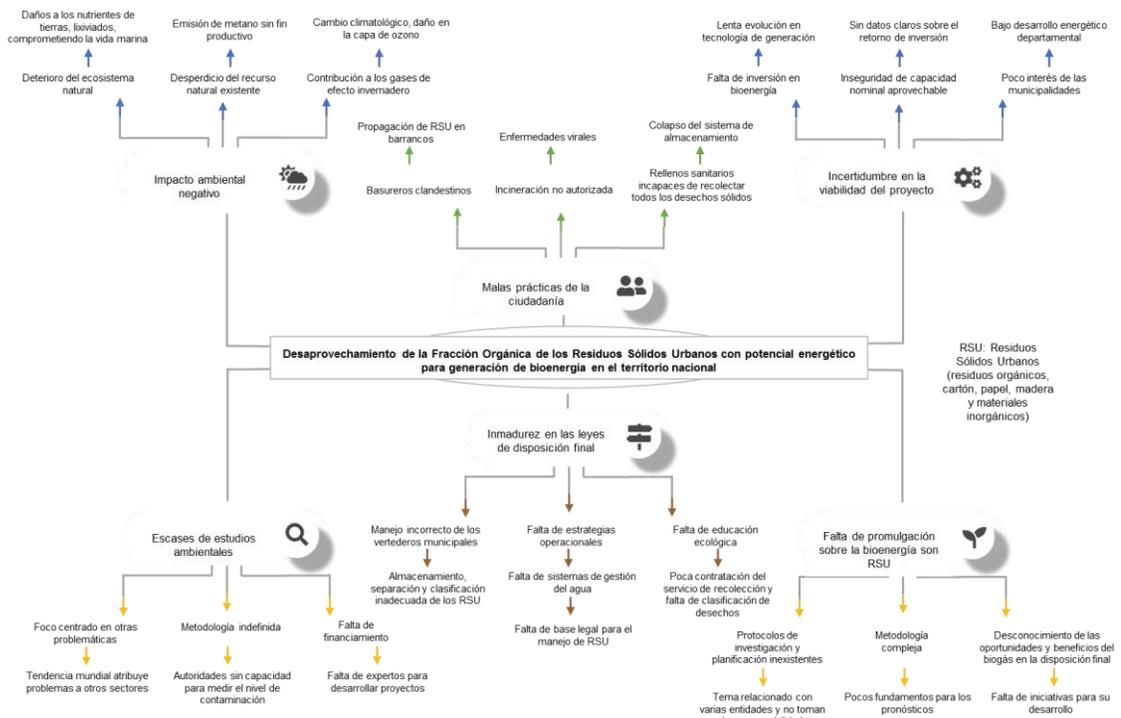
de la Universidad Metropolitana, Vol. 4, N<sup>o</sup>. 1, 147-164. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4003560>

40. Rodríguez, L. (2014). *Viabilidad técnica para producción de biogás a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos – FORSU*. Bogotá: (Tesis de Maestría, Universidad EAN). Obtenido de <http://hdl.handle.net/10882/1560>
41. Rodríguez, M. (2017). *Evaluación del impacto de conectar generadores distribuidos renovables a una línea de distribución, hasta cubrir su demanda de potencia*. Guatemala: (Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala). Obtenido de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/6402>
42. Sáez, A., & Urdaneta, J. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia*(3), 121-135. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=73737091009>
43. Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia. (2015). *Ranking de la gestión municipal 2013*. Guatemala. Obtenido de <http://www.segeplan.gob.gt>



# 14. APÉNDICES

## Apéndice 1. Árbol de problemas



Fuente: Elaboración propia, utilizando software Microsoft PowerPoint.

## Apéndice 2. Matriz de Coherencia

MATRIZ DE COHERENCIA				
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	PREGUNTAS DE INVESTIGACION	OBJETIVOS	METODOLOGIA	RESULTADOS ESPERADOS
	PRINCIPAL	GENERAL		
Falta de control en la disposición final de los Residuos Sólidos Urbanos, que lleva a efectos dañinos en la tierra, ambiente y recursos hídricos. Por lo que un aprovechamiento de estos disminuiría sus efectos negativos volviendo de utilidad para un servicio de bien común, como lo es la energía eléctrica. Teniendo como resultados planes de expansión para la electrificación rural, robustecer el sistema de eléctrico nacional y brindando energía renovable por medio de la reutilización.	¿Es factible técnica y económicamente el aprovechamiento de la FORSU del Mercado Concepción de Villa Nueva para la generación de energía eléctrica?	Determinar la factibilidad técnica y económica de la implementación de un generador eléctrico aprovechando la FORSU del Mercado Concepción en Villa Nueva, Guatemala.		
	ESPECIFICOS	ESPECIFICOS		
	¿La FORSU será suficiente para la producción de biogás aprovechable para la generación de energía eléctrica?	Evaluar la capacidad de potencial energético útil referente a la FORSU del Mercado Concepción en Villa Nueva, Guatemala	Evaluar la muestra de FORSU del Mercado Concepción comparándolo con datos experimentales relacionando el peso de la muestra por producción de biogás y la relación de biogás por producción de energía eléctrica.	Con las relaciones establecidas determinar que la carga mensual de FORSU será suficiente para la instalación de un GDR
	¿Qué tecnología será la idónea para la generación de energía eléctrica utilizando la FORSU?	Determinar la tecnología idónea para la generación de energía eléctrica y aprovechar la FORSU	Evaluar con ventajas y desventajas los tipos de biodigestores que se pueden adaptar al proyecto con el que se obtenga el mayor aprovechamiento de la FORSU. Con la producción de biogás calcular la capacidad de generación eléctrica.	Se espera obtener una generación de biogás alta por la pureza de la FORSU dado que se recuperara desde su desecho inicial.
	¿Qué aspectos técnicos deberán de considerarse para determinar la factibilidad de instalación del proyecto?	Realizar un análisis técnico para determinar la factibilidad de instalación del proyecto.	Analizar los componentes y materiales necesarios para la instalación del biodigestor seleccionado. Tomando en cuenta disponibilidad de repuestos, mantenimiento y personal capacitado para su gestión.	Se espera conocer a los proveedores nacionales e internacionales capacitados para la instalación del proyecto. Además de contar con cursos accesibles para la capacitación del personal de operaciones.
	¿Qué análisis económico deberá de considerarse para determinar la factibilidad inversión del proyecto?	Elaborar un análisis económico para determinar la factibilidad de inversión del proyecto.	Se hará un análisis económico usando el Valor Actual Neto (VAN) para la viabilidad económica de la inversión. Además de calcular el costo de oportunidad como un indicativo de los beneficios de la inversión.	Se espera una recuperación de inversión e ingreso económico atractivo para que la inversión sea conveniente tanto para el sector público y privado.
	¿Qué información e incentivos serían necesarios para que las instituciones públicas y privadas implementen proyectos similares en el territorio nacional?	Enlistar la información básica e incentivos mínimos necesarios para la implementación del proyecto a nivel nacional.	Con los recursos y las necesidades que se usen y presenten en la factibilidad técnico-económica, se dará un listado de lo que será necesario para un pre-estudio de implementación del proyecto.	Se espera el interés del sector público y privado para financiar las necesidades e impulsar un desarrollo energético renovable.

Fuente: Elaboración propia, utilizando software Microsoft Excel.