



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Arte en Energía y Ambiente

**POTENCIAL DE BIOGÁS PRODUCIDO POR LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE
LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN GUATEMALA**

Ing. Juan Pablo García Solares

Asesorado por la MA. Claudia Beatriz Montenegro Franco

Guatemala, octubre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**POTENCIAL DE BIOGÁS PRODUCIDO POR LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE
LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ING. JUAN PABLO GARCIA SOLARES

ASESORADO POR LA MA. CLAUDIA BEATRIZ MONTENEGRO FRANCO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Mtro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
SECRETARIA	Mtra. Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

POTENCIAL DE BIOGÁS PRODUCIDO POR LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha agosto 2014.

Juan Pablo García Solares

Universidad de San Carlos
de Guatemala

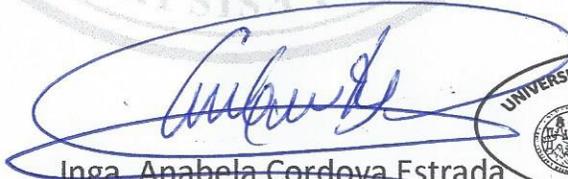


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 487.2019

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 Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **POTENCIAL DE BIOGÁS PRODUCIDO POR LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN GUATEMALA**, presentado por el Ingeniero Juan Pablo García Solares, estudiante de la Maestría en Arte en Energía y Ambiente y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, octubre de 2019

AACE/asga

EPPFI-599-2019

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **"POTENCIAL DE BIOGÁS PRODUCIDO POR LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN GUATEMALA"** presentado por el Ingeniero Químico **Juan Pablo García Solares** quien se identifica con Carné **200312390**, correspondiente al programa de Maestría en Artes en Energía y Ambiente; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"



Mtro. Ing. Edgar Dario Alvarez Coti
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, septiembre de 2019

Como Coordinador de la Maestría en Artes en Energía y Ambiente doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“POTENCIAL DE BIOGÁS PRODUCIDO POR LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN GUATEMALA”** presentado por el Ingeniero Químico **Juan Pablo García Solares** quien se identifica con Carné **200312390**.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, septiembre de 2019

EEPM-601-2019

En mi calidad como **Asesor del Ingeniero Químico Juan Pablo García Solares** quien se identifica con Carné **200312390** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“POTENCIAL DE BIOGÁS PRODUCIDO POR LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN GUATEMALA”** quien se encuentra en el programa de Maestría en Artes en Energía y Ambiente en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



**Ing. Claudia Beatriz
Montenegro Franco
INGENIERA QUÍMICA
Colegiado 1481**

**Mtra. Claudia Beatriz Montenegro Franco
Asesora**

Guatemala, septiembre de 2019

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por guiarme.

Mis padres

Por ser el mejor ejemplo.

Mi familia

Por ese amor que no paran de dar.

AGRADECIMIENTOS A:

**La Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por formarme como ser humano.

Facultad de Ingeniería

Por el conocimiento científico y las enseñanzas
de la vida.

Mis amigos

Por los momentos inolvidables.

Flor de María

Por ser mi inspiración.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Biogás.....	1
1.2. Biometanización por digestión anaeróbica	2
1.2.1. Parámetros del proceso.....	3
1.3. Aplicaciones del biogás	13
1.3.1. Aprovechamiento de la FORSU para la producción de biogás.....	15
1.3.2. Generación de energía eléctrica.....	20
1.4. Contexto del aprovechamiento energético del biogás	24
1.4.1. Centroamérica	24
1.4.2. México	25
1.4.3. Estados Unidos.....	27
1.4.4. Europa	28
1.4.5. India.....	30
1.4.6. China	30

2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	31
2.1.	El potencial de biogás a partir de la FORSU	31
2.1.1.	Situación actual en Guatemala.....	31
2.1.2.	Cálculo del potencial de biogás, a partir de la FORSU.....	33
2.1.3.	Cantidad de biomasa	35
2.1.4.	Análisis de Regresión.....	37
2.1.4.1.	Análisis de datos, Prueba <i>t</i> para medias de dos muestras emparejadas.....	37
2.1.5.	Potencial de producción de volumen de biogás	38
2.1.5.1.	Producción de biogás por departamento de Guatemala.....	41
2.1.6.	Potencial de producción de energía eléctrica.....	42
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	45
3.1.	Potencial de producción volumen de biogás en Guatemala.....	45
3.2.	Potencial de producción de energía eléctrica por medio de biogás en Guatemala	46
3.3.	Plantas de producción de energía eléctrica a partir de biogás en Guatemala	47
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	49
	CONCLUSIONES.....	53
	RECOMENDACIONES	55
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
	ANEXO.....	63

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Micrográficas de escaneo de electrones de diversas especies de arqueobacterias metanogénicas	2
2.	Efecto de la temperatura sobre la producción de biogás, expresada como volumen en función de los sólidos volátiles totales según el tiempo de retención hidráulico (TRH).....	8
3.	Variación de los distintos parámetros en función del tiempo para un digester de carga única o <i>batch</i> y otro de carga continua (derecha)....	10
4.	Reactor de cadena agitadora	12
5.	Incremento de la producción de biogás por trituración.....	13
6.	Opciones para la utilización de biogás	14
7.	Necesidad de tratamiento del biogás en función del uso	15
8.	Esquema global del procesamiento de la basura urbana.....	16
9.	Sistema de digestión anaeróbica a escala piloto	18
10.	Diagrama de flujo de la planta de energía a escala real	19
11.	Principio de funcionamiento de motor Stirling	22
12.	Proceso de producción de electricidad con biogás por medio de una turbina	23
13.	Esquema de microturbina de gas.....	23
14.	Tipos de celdas de combustible	24
15.	Potencial de aprovechamiento de biogás proveniente de rellenos sanitarios.....	26
16.	Potencial de metano a partir de fuentes de biogás seleccionadas en EE.UU.	27

17.	Crecimiento de la producción de biogás en Alemania	28
18.	Producción de biogás en la UE en 2012 y 2013 (kTEP)	29
19.	Diagrama de flujo de metodología para determinar el potencial de biogás	34
20.	Proyección de producción de FORSU en Guatemala.....	36
21.	Cobertura nacional del servicio de recolección de desechos domiciliarios.....	39
22.	Potencial de biogás por departamento de Guatemala.....	42
23.	Potencial de producción total, accesible y disponible de biogás en Guatemala (2017-2027).....	45
24.	Potencial de producción de energía eléctrica en TW por medio de biogás en Guatemala (2017-2027)	46
25.	Número potencial de plantas de producción de energía eléctrica a partir de FORSU en Guatemala (2017)	47

ÍNDICE DE TABLAS

I.	Composición de biogás derivado de diversos tipos de desechos.....	1
II.	Características de las arqueobacterias metanogénicas.....	3
III.	Contenido en nitrógeno y relación C/N en varios desperdicios.....	4
IV.	Intervalos de temperaturas en que trabajan las bacterias anaeróbicas	7
V.	Valores de las concentraciones de inhibidores comunes	11
VI.	Producción de biogás en función del substrato utilizado	17
VII.	Rendimiento de la planta energética a escala real	20
VIII.	Valores para generadores de potencia	20
IX.	Potencial de aprovechamiento de biogás proveniente de rellenos sanitarios	26

X.	Potencial de aprovechamiento de biogás proveniente de rellenos sanitarios.....	27
XI.	Producción de FORSU por año en Guatemala (2006-2010).....	35
XII.	Producción de FORSU en Guatemala (2017-2027).....	36
XIII.	Prueba <i>t</i> para medias de dos muestras emparejadas	37
XIV.	Potencial total de producción de biogás en Guatemala (2017-2027)...	38
XV.	Cobertura nacional del servicio de recolección de desechos domiciliarios (2017-2027).....	39
XVI.	Potencial accesible de producción de biogás en Guatemala (2017-2027)	40
XVII.	Potencial disponible de producción de biogás en Guatemala (2017-2027)	40
XVIII.	Potencial de producción de biogás en Guatemala por departamento (2017)	41
XIX.	Potencial de producción de energía eléctrica en Guatemala con motor Diesel (2017-2027).....	43
XX.	Potencial de producción de energía eléctrica en Guatemala con microturbina (2017-2027).....	43
XXI.	Potencial de instalación de plantas de producción de energía a base de biogás en Guatemala, por departamento (2017).....	44
XXII.	Disposición final de la basura domiciliar por departamento en Guatemala, en 2009 (toneladas).....	63

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
ΔG°	Energía libre de Gibbs
μ	Micro (prefijo)
$^\circ\text{C}$	Grados Celsius
C/N	Relación carbono / nitrógeno.
Ca	Calcio
CH_4	Metano
CHCOO^-	Acetato
CH_3NH_3^+	Metilamina
$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Cl}$	Cloruro de Metilamina
CH_3OH	Metanol
CH_3SH	Metilmercaptano
Cl	Cloro
CN	Cianuro
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
Cr	Cromo
Cu	Cobre
Fe°	Hierro elemental
g	Gramos
H^+	Hidrógeno iónico
H_2	Hidrógeno molecular
HCOO^-	Formiato
H_2O	Agua

H₂S	Ácido sulfhídrico
J	Joule
k	Kilo (prefijo)
L	Litro
M	Molar
m	Metros
m³	Metros cúbicos
M€	Millones de euros
Mg	Magnesio
mg	Miligramos
ml	Mililitros
N₂	Nitrógeno gaseoso
Na	Sodio
NH⁺	Ión amonio
Ni	Níquel
NO_x	Óxido de nitrógeno
O₂	Oxígeno gaseoso
pH	Potencial de hidrógeno
S⁰	Azufre elemental
SH₂	Sulfuro de hidrógeno
T	Tera (prefijo)
ton	Toneladas
W	Watt
We	Watt equivalente
W-h	Watt hora
Zn	Cinc

GLOSARIO

Acetogénesis	Proceso mediante el cual bacterias anaerobias producen acetato a partir de diversas fuentes de energía (por ejemplo, hidrógeno) y de carbono (por ejemplo, dióxido de carbono).
AMSA	Autoridad para el manejo sustentable de la cuenca y del lago de Amatitlán.
Arqueobacterias	Son un grupo de microorganismos unicelulares que, al igual que las bacterias, tienen morfología procariota (sin núcleo ni, en general, orgánulos membranosos internos), pero son fundamentalmente diferentes a éstas, de tal manera que conforman su propio dominio y reino denominado también Archaea.
ATP	Trifosfato de adenosina.
Biogás	Es el nombre con que se le conoce al gas resultante de la descomposición de la biomasa.
Biol	Abono orgánico resultante de la metanización anaeróbica de la biomasa.
Biomasa	Materia de origen biológico.

Biometanización	Producción de metano a partir de biomasa.
CNEE	Comisión nacional de energía eléctrica (Guatemala).
CSTR	Completely stirred tank reactor (reactor de tanque completamente agitado).
CTI	Capital total de inversión.
DQO	Demanda química de oxígeno. Describe la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar completamente la materia orgánica en los desechos y se determina experimentalmente al medir la cantidad de agente oxidante necesario para oxidar completamente una muestra del desecho.
Desecho orgánico	Biomasa producto de la actividad humana que se dispone en un basurero.
FORSU	Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.
GEI	Gases efecto invernadero.
GWP	Global warming potential (potencial de calentamiento global).
IARNA	Instituto de agricultura, recursos naturales y ambiente.

IDAE	Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (España).
INE	Instituto nacional de estadística (Guatemala).
Inhibidor	Agente químico que impide o ralentiza una reacción química.
LandGEM	Herramienta del modelo de los EE.UU. de emisiones de biogás a partir de un relleno sanitario.
LMOP	Landfill methane outreach program (programa de alcance de metano de relleno sanitario).
Metanogénesis	Es una forma de metabolismo microbiano que produce gas metano.
MCFC	Membrana de carbonato derretido.
MCIA	Motores de combustión interna alternativa.
n.d.	No disponible.
NREL	National renewable energy laboratory (EE.UU.).
PAFC	Membrana de ácido fosfórico.
PB	Coeficiente de productividad de biogás.

PEFC	Membrana polímero – electrolito.
pH	Logaritmo inverso de la concentración de hidrógeno en una solución. Indica acidez o alcalinidad.
RMC	Reactores de mezcla completa.
RSM	Residuos sólidos municipales.
RSU	Residuos sólidos urbanos.
SENER	Secretaría de energía (México).
SOFC	Membrana de sólido oxidado.
ST	Sólidos totales.
SV	Sólidos volátiles.
TEP	Tonelada equivalente de petróleo.
TRH	Tiempo de retención hidráulico. Magnitud de tiempo que permanece el sustrato dentro del reactor.
Reactor	Equipo donde ocurre una reacción química.
Relación C/N	Es la masa de carbono dividido masa de nitrógeno.

RESUMEN

La presente investigación muestra el potencial de biogás y de producción de energía eléctrica que se puede llegar a obtener, a partir de los residuos sólidos en Guatemala, específicamente de la denominada fracción orgánica. La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) representa restos de alimentos. La separación en origen de este componente, mejora notablemente la calidad y cantidad de gas producido.

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

Asimismo, se calcula el número de plantas que podrían operar por medio de un ejemplo de sistema de producción de biogás y recolección de FORSU a gran escala. Únicamente en la ciudad de Guatemala se podrían instalar más de 3 mil plantas de valoración de biogás para generar 30 MW-h de potencia cada una.

De igual forma, se cuantifica la potencia eléctrica que se podría generar a nivel nacional. En este caso se utilizan dos distintos medios para calcular la energía eléctrica que se puede producir: Motor de combustión interna y Microturbina. De esta manera, se obtiene un rango de potencia eléctrica que se podría producir de desde 463 TW hasta 644 TW para 2018, en Guatemala.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Un problema de gran peso en la actualidad mundial son los desechos sólidos, aquello que es concebido como materia inútil y que en realidad no se aprovecha. Uno de sus grandes componentes son los desechos orgánicos, ricos en nitrógeno y cuyo proceso de descomposición genera dos componentes aprovechables: Biogás y abono orgánico (Biol).

El calentamiento global es una consternación mundial y los estudios en esta materia exponen la colaboración del metano como gas efecto invernadero (GEI). Este compuesto, componente mayoritario del biogás, y su fracción útil, tiene un potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) de 25 para un rango de 100 años. Es decir, la emisión de un millón de toneladas de metano es equivalente a emitir 25 millones de toneladas de dióxido de carbono (Reay, 2010, p. 2), por lo que representa una amenaza latente que debe ser enfrentada.

Ante esta problemática social, técnica y económica; en Guatemala existe un vacío de conocimiento referente a la capacidad energética aprovechable de la FORSU. Se necesita saber un aproximado de cuánto biogás se produce para obtener un panorama que ayude a enfrentar estas amenazas y, a la vez, beneficiar la economía del país.

La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU), a cuyos componentes se les denomina residuos sólidos biodegradables o bioresiduos, representan del 30 al 65 % de los desechos sólidos urbanos (Pérez, 2006, p. 56).

Preguntas de investigación

General:

¿Cuál es el potencial de producción de biogás en Guatemala, a partir de la masa estimada de FORSU en el presente y de los próximos 10 años desde las estimaciones y métodos apropiados?

Auxiliares:

- ¿Cuánto volumen de biogás aprovechable se podría llegar a producir en los próximos 10 años en Guatemala, por cada tonelada de FORSU generada?
- ¿Qué potencia eléctrica se puede obtener a partir de la cantidad de biogás producida?
- ¿Cuántas plantas energéticas a base de producción de biogás se pueden instalar en Guatemala?

OBJETIVOS

General

Estimar el potencial volumétrico y energético de biogás proveniente de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos en Guatemala en los próximos diez años, a partir de un modelo matemático basado en las estimaciones del Instituto Nacional de Estadística sobre la generación nacional de residuos sólidos urbanos.

Específicos

1. Calcular el volumen estimado de biogás que se puede producir, a partir de la FORSU en Guatemala con proyección a diez años a nivel nacional.
2. Cuantificar el potencial de generación de energía eléctrica, a partir del volumen de biogás calculado.
3. Determinar el número de plantas de producción de energía eléctrica, a partir de biogás que se pueden instalar en Guatemala.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

La investigación realizada es del tipo descriptiva, ya que describe y analiza la situación actual del país en materia de capacidad de producción de biogás. Por medio de este análisis se calculan los potenciales energéticos, desde la FORSU y su proyección a 10 años.

Para el desarrollo de este estudio se trabajaron principalmente variables cuantitativas, con las cuales se calculan parámetros que componen el potencial de energía, a partir de data bibliográfica utilizada en estudios internacionales de la misma temática.

Como base del estudio se utilizó información histórica oficial de producción de desechos alimenticios. A partir de ello, y con el conocimiento que estos están compuestos casi en su totalidad por restos vegetales (biomasa) y que al descomponerse tienen como uno de sus subproductos al biogás, se calcula el volumen del mismo que se podría generar. Se tomaron en cuenta datos desde el año 2001 con fines de proyecciones matemáticas a diez años.

La cuantificación de volumen de biogás se calcula bajo dos distintos coeficientes de producción, uno utilizado por el gobierno de España y otro por la universidad de Concordia en Canadá. En este caso, se obtendrá un rango de potenciales dado por un mínimo y un máximo teóricos.

Para valorar el potencial de biogás, se determinó el dato de potencial total; el cual corresponde a toda la FORSU que se genera. Luego, se calculó el potencial accesible, el cual se define como la cantidad de desechos que es

posible recolectar. Para finalmente estimar el potencial disponible, que se presenta como un escenario teórico en el que un 40% de la FORSU se valoriza por medio de digestión anaeróbica.

Con los resultados obtenidos, se calculó el potencial energético. Para ello se tomaron en cuenta dos casos: Motor Diesel y Microturbina.

A partir de esta información, y en base al modelo de producción de biogás, a partir de residuos de alimentos utilizado en el mercado de Sardeña en Italia, se determina el número de plantas de generación de energía a base de FORSU, en Guatemala.

INTRODUCCIÓN

Con el propósito de desarrollar conocimiento útil en el tema energético nacional, específicamente relacionado con la producción de biogás, debido al manejo adecuado de los residuos sólidos urbanos y su posterior aprovechamiento, se realiza el presente trabajo de graduación; el cual muestra de manera detallada el potencial energético de los residuos sólidos orgánicos de las áreas urbanas en Guatemala.

Esta investigación servirá de referencia para el aprovechamiento del volumen de biogás que se genera por la FORSU y pretende dar fundamentación a la generación de energía optimizando recursos, debido al manejo adecuado de los RSU.

En el capítulo 1, el marco teórico profundiza en conceptos de biogás, enfocados principalmente en aquel que se obtiene de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU): cómo se produce, bajo qué condiciones, cuáles son las etapas de su formación, qué variables se deben considerar para la producción óptima, de dónde se puede obtener, para qué se puede utilizar, con qué tecnología se puede aprovechar, qué datos se tienen en Guatemala y qué están haciendo otros países al respecto.

En el capítulo 2, relacionado al desarrollo de la investigación, se identifica claramente cada uno de los pasos tomados para determinar el potencial energético del biogás proveniente de la FORSU en Guatemala. Detalla los procedimientos matemáticos y su fundamentación científica, aplicados a sistemas reales que se pueden adquirir en el mercado.

En las secciones finales, la bibliografía y referencias enlistan las fuentes de la información utilizada para el desarrollo de este trabajo de graduación. Por último, los anexos contienen tablas y fichas técnicas que se utilizan para el cálculo de los resultados.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Biogás

El biogás es un gas combustible compuesto por una mezcla de gases, dentro de los cuales están metano, dióxido de carbono y pequeños porcentajes de otros gases.

Tabla I. **Composición de biogás derivado de diversos tipos de desechos**

Compuesto	Fórmula química	Desechos agrícolas	Desechos cloacales	Desechos industria	Desechos sanitarios	Propiedad
Metano	CH ₄	50 – 80 %	50 – 80 %	50 – 70 %	45 – 65 %	Combustible
Dióxido de carbono	CO ₂	30 – 50 %	20 – 50 %	30 – 50 %	34 – 55 %	Contamina, asfixiante
Hidrógeno	H ₂	0 – 2 %	0 – 5 %	0 – 2 %	0 – 1 %	Combustible
Nitrógeno	N ₂	0 – 1 %	0 – 3 %	0 – 1 %	0 – 20 %	Inerte
Monóxido de carbono	CO	0 – 1 %	0 – 1 %	0 – 1 %	Trazas	Tóxico
Oxígeno	O ₂	0 – 1 %	0 – 1 %	0 – 1 %	0 – 5 %	Corrosivo
Ácido sulfhídrico	H ₂ S	100 – 7000 ppm	0 – 1 %	0 – 8 %	0,5 – 100 ppm	Corrosivo, mal olor, tóxico

Fuente: Gaspar, Liz & Alfredo Matos (2010). *Producción de biogás por digestión anaeróbica de residuos vegetales* p.1.

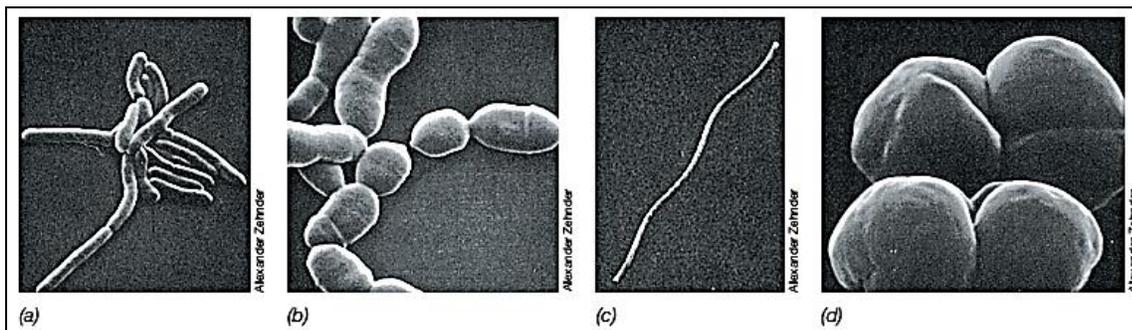
Proviene de la biomasa, que se define como materia de origen biológico. Dentro de la biomasa aprovechable con fines energéticos, los más importantes en la actualidad son la leña y la FORSU (Biomass Users Network, 2002, p. 15).

1.2. Biometanización por digestión anaeróbica

La biometanización es un proceso natural de degradación anaeróbica de materiales orgánicos, resultando en biogás (Rosenzweig, 2011, p. 375). La digestión anaerobia es el método más común para la producción de biogás, descomponiendo, por medio de microorganismos, la materia orgánica sin la presencia de oxígeno (Klass, 1998, p.456).

Tres grupos de microorganismos están involucrados en el proceso: bacterias fermentadoras, bacterias que oxidan ácidos orgánicos y bacterias metanogénicas. La relación sintrópica entre productores (acetógenos) y carroñeros de hidrógeno (homoacetógenos, metanógenos) es crítica en el proceso. La determinación práctica y teórica del potencial de metano es muy importante para el diseño óptimo del proceso, su configuración y una efectiva evaluación de factibilidad económica (Rosenzweig, 2011, p. 375).

Figura 1. **Micrográficas de escaneo de electrones de diversas especies de arqueobacterias metanogénicas**



(a) *Methanobrevibacter ruminantium*. (b) *Methanobrevibacter arboriphilus*. (c) *Methanospirillum hungatei*. (d) *Methanosarcina barkeri*.

Fuente: Madigan, Michael T. (2012) *Brock biology of microorganisms*. p. 563.

Existen al menos diez substratos que se convierten en metano por la acción de las arqueobacterias metanogénicas, los cuales liberan energía para la síntesis de ATP, incluyendo acetato (CH_3COO^-), formiato (HCOO^-), metanol (CH_3OH), metilamina (CH_3NH_3^+) y metilmercaptano (CH_3SH).

Tabla II. **Características de las arqueobacterias metanogénicas**

Grupo	Género	Morfología	Sustratos
I	<i>Methanobacterium</i> <i>Methanobrevibacter</i> <i>Methanosphaera</i>	Bacilos alargados Bacilos cortos Cocos	$\text{H}_2 + \text{CO}_2, \text{HCOO}^-$ $\text{H}_2 + \text{CO}_2, \text{HCOO}^-$ $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2$
II	<i>Methanothermus</i>	Bacilos	$\text{H}_2 + \text{CO}_2$ (reduce S^0)
III	<i>Methanococcus</i>	Cocos irregulares	$\text{H}_2 + \text{CO}_2, \text{HCOO}^-$, piruvato + CO_2
IV	<i>Methanomicrobium</i> <i>Methanogenium</i> <i>Methanospirillum</i> <i>Methanoplanus</i>	Bacilos cortos Cocos irregulares Espirilos Placas	$\text{H}_2 + \text{CO}_2, \text{HCOO}^-$ $\text{H}_2 + \text{CO}_2, \text{HCOO}^-$ $\text{H}_2 + \text{CO}_2, \text{HCOO}^-$ $\text{H}_2 + \text{CO}_2, \text{HCOO}^-$
V	<i>Methanosarcina</i> <i>Methanolobus</i> <i>Methanoculleus</i> <i>Methanohalobium</i> <i>Methanococcoides</i> <i>Methanohalophilus</i> <i>Methanotherix</i>	Cocos grandes y en paquetes Cocos irregulares Cocos irregulares Cocos irregulares Cocos irregulares Cocos irregulares Cocos irregulares	$\text{H}_2 + \text{CO}_2, \text{CH}_3\text{OH}$, CH_3COO^- CH_3OH , metilaminas $\text{H}_2 + \text{CO}_2, \text{HCOO}^-$, alcoholes CH_3OH , metilaminas CH_3OH , metilaminas CH_3OH , metilaminas, metilsulfuros CH_3COO^-
VI	<i>Methanopyrus</i>	Bacilos en cadenas	$\text{H}_2 + \text{CO}_2$ (crece a 110°C)
VII	<i>Methanocorpusculum</i>	Cocos irregulares	$\text{H}_2 + \text{CO}_2, \text{HCOO}^-$, alcohols

Fuente: Carrillo, Leonor. (2004). *Energía de biomasa*. p. 25.

1.2.1. Parámetros del proceso

- Relación carbono/nitrógeno (C/N): la relación C/N en un rango de 20/1 a 25/1 es considerada óptima para la digestión anaeróbica (Abbasi, 2012, p. 5), y se puede producir biogás a un valor máximo de 30/1 (Carrillo, 2004, p.31). Si la relación C/N es muy alta, el nitrógeno se consume rápidamente por los metanógenos para cumplir sus requerimientos

protéicos y no dejan suficiente para reaccionar con el contenido de carbono en el material, también atrae consecuencias negativas a la formación de proteínas afectando la estructura y energía de los microorganismos.

Sustratos con una relación C/N baja tienden a incrementar la producción de amonio, aumentando el pH y, si pasa de 8,5, produce un efecto tóxico en las arqueobacterias metanogénicas (Deublein, 2008, p. 6).

Generalmente la FORSU, los lodos de depuración de aguas residuales y los desechos ganaderos presentan nutrientes en las proporciones correctas (Cuesta, 2011, p. 23). Para mantener el valor de C/N a nivel óptimo, se pueden co-fermentar materiales de C/N bajo con otros de C/N alto.

Tabla III. **Contenido en nitrógeno y relación C/N en varios desperdicios**

Material	Nitrógeno (%)	C/N
Residuos animales		
Orina	15 – 18 %	0,8
Sangre	10 – 14 %	3
Desperdicios de pescado	6,5 – 10 %	5,1
Deyecciones de aves de corral	6,3	10
Excretas de cabra	---	12
Boñigas de oveja	3,8	19
Deyecciones de cerdo	3,8	18
Bosta de caballo	2,3	25
Estiércol vacuno	1,7	18 – 24
Estiércol de corral, promedio	2,15	14
Heces humanas	5,5 – 6,5	6 – 10
Restos vegetales		
Desbroce de pasto tierno	4,0	12
Desbroce de pastos mezclados	2,4	19
Verdolaga	4,5	8
Amaranto	3,6	11
Alfalfa	2,4 – 3,0	16 – 20
Algas marinas	1,9	19
Paja cortada	1,1	48

Paja de trigo	0,3	128
Aserrín podrido	0,25	208
Aserrín fresco	0,1	511
Residuos domésticos		
Desechos sólidos urbanos	2,2	25 – 40
Pan	2,1	---
Peladura de papas	1,5	25
Papel	0	---

Fuente: Carrillo, Leonor. (2004). *Energía de biomasa*. p. 31.

- Dilución: se debe de mezclar el sustrato con agua, si es necesario, para obtener un lodo. Si el material se diluye mucho, las partículas sólidas pueden llegar a sedimentarse en el fondo, provocando una degradación inadecuada (Abbasi, 2012, p. 6). La relación sustrato:agua deber ser de 1:1 a 2:1.
- Nutrientes (sustrato): el tipo y composición del sustrato determinan directamente la calidad del gas producido. Para que se produzca biogás se necesita, además de una fuente de carbono y energía, la presencia de nutrientes minerales dentro de los cuales se pueden mencionar: azufre, fósforo, nitrógeno, potasio, calcio y magnesio. Debe existir una proporción adecuada de nutrientes para que se desarrolle la flora bacteriana.

En los procesos anaeróbicos, las medidas utilizadas comúnmente para describir la concentración de desechos es la demanda química de oxígeno (DQO) expresada en g O₂/Litro y el contenido de Sólidos Volátiles (SV) expresado en g SV/Litro. La DQO describe la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar completamente la materia orgánica en los desechos y se determina experimentalmente al medir la cantidad de agente oxidante necesario para oxidar completamente una muestra del desecho.

El contenido de SV describe la composición de material orgánico en el residuo y se define como la cantidad de materia perdida de una muestra seca, después de una hora, a una temperatura de aproximadamente 550 °C. La producción de metano se encuentra generalmente en el rango de 100 a 400 L de CH₄ / kg de SV (Rosenzweig, 2011, p. 339).

- Presión parcial de hidrógeno: para que se dé un proceso sin perturbaciones entre bacterias acetogénicas productoras de H₂ y metanogénicas consumidoras de H₂, se necesita de simbiosis en espacios reducidos (Deublein, 2008, p. 101). Generalmente, las reacciones biológicas son exergónicas (energía libre negativa); para que estas reacciones tomen lugar, la concentración de hidrógeno debe estar balanceada. Asimismo, la presión parcial de hidrógeno debe ser muy baja para que las bacterias acetogénicas no se rodeen por mucho hidrógeno y, consecuentemente, dejen de producirlo.
- Temperatura: la digestión anaeróbica se puede llevar a cabo a un amplio intervalo de temperaturas, dependiendo del tipo de bacterias que se utilicen, se pueden diferenciar cuatro intervalos diferentes (ver tabla 4). El intervalo mesofílico es el más utilizado, a pesar que en el termofílico es donde se tiene la mayor producción de biogás. Esto se debe a que las bacterias termofílicas tienen mayor sensibilidad a pequeñas variaciones térmicas, lo que conlleva un mayor control del sistema y operación más costosa. Por otra parte, en este intervalo de temperatura, el mantenimiento y operación del sistema consume más energía de la que puede proporcionar el biogás resultante (Cuesta, 2011, p. 23).

Tabla IV. **Intervalos de temperaturas en que trabajan las bacterias anaeróbicas**

Bacterias	Rango de temperaturas	Sensibilidad
Psicrofílicas	Menos de 20 °C	±2 °C/hora
Mesofílicas	Entre 20 °C y 45 °C	±1 °C/hora
Termofílicas	Entre 45 °C y 60 °C	±0,5 °C/hora
Extra termofílicas	Mayor a 60 °C	----

Fuente: Cuesta, Ma José y Otros. (2011). *Situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento* p. 23.

La temperatura tiene un efecto directo en las propiedades fisicoquímicas de todos los componentes dentro del biodigestor, además afecta la termodinámica y cinética de los procesos biológicos. La temperatura determina si una reacción específica es favorable (Kumar, 2012, p. 157).

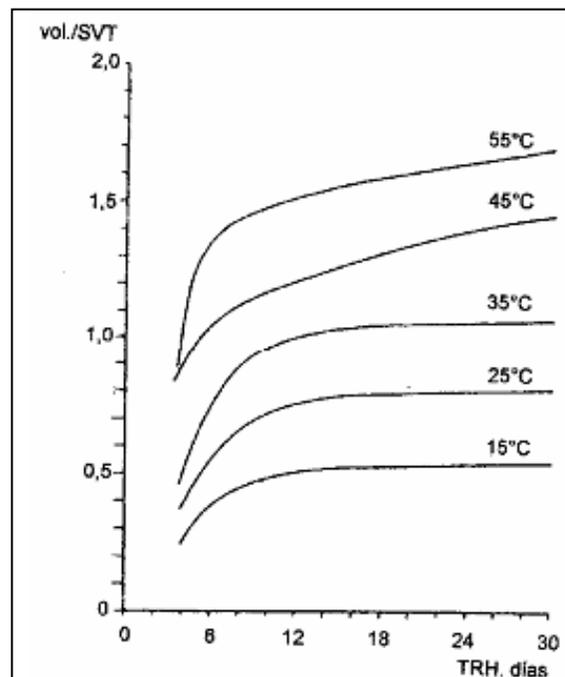
El aumento de la temperatura tiene las siguientes ventajas:

- Incremento en la solubilidad de compuestos orgánicos, lo cual los hace más digeribles para los microorganismos.
- Incremento en las tasas de reacción química y biológica, acelerando la conversión del proceso, necesitando un reactor de menor tamaño que puede operar con menor tiempo de retención hidráulica.
- Mejora propiedades fisicoquímicas como la difusividad del sustrato soluble, aumento en la tasa de transferencia de líquido hacia el gas (debido a la baja solubilidad del gas), reducción en la

viscosidad del líquido que facilita la agitación y también mejora la separación líquido-sólido de la biomasa.

- Incremento en la tasa de mortalidad de bacterias patógenas, disminuyendo el tiempo necesario para su reducción.

Figura 2. **Efecto de la temperatura sobre la producción de biogás, expresada como volumen en función de los sólidos volátiles totales según el tiempo de retención hidráulico (TRH)**



Fuente: Carrillo, L. (2004). *Energía de Biomasa* p. 34.

- pH: en cada etapa del proceso de biometanización, los microorganismos presentan máxima actividad en un intervalo de pH diferente. El intervalo óptimo de los microorganismos hidrolíticos es entre 7,2 y 7,5, para los

acetogénicos entre 7 y 7,2 y para los metanogénicos entre 6,5 y 7,5 (Cuesta, 2011, p. 23).

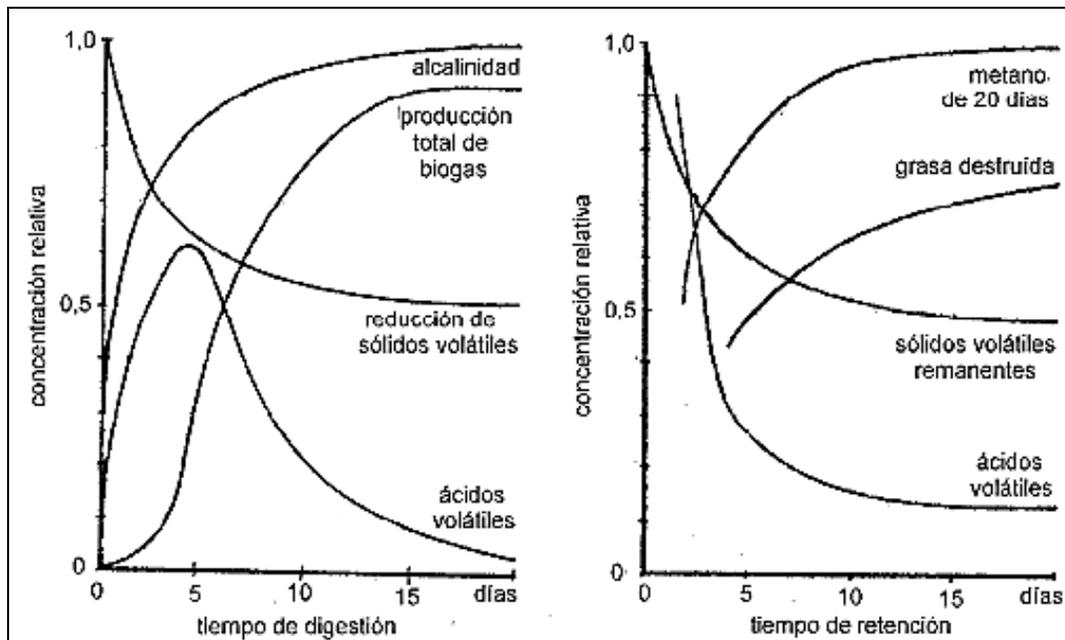
El nivel de pH tiene efecto en la actividad enzimática de los microorganismos, ya que cada enzima se activa solamente en un rango específico y tiene su máxima actividad en un pH óptimo. Un pH estable indica equilibrio en el sistema y estabilidad en el biodigestor. Mientras el pH se acerca más a neutro (7 – 7,2), más grande es la posibilidad de que las bacterias metanogénicas funcionen (Rosenzweig, 2011, p. 341).

El mayor riesgo de fracaso en un biodigestor se basa en el hecho que el pH sea menor al neutral y, por consiguiente, se acumule ácido. Esto ocurriría si la cantidad de SV en el biodigestor aumentó considerablemente en la carga de desechos frescos, por lo que mantener el control del pH en el arranque es muy delicado debido a la formación de ácidos en las primeras etapas. Para aumentar el pH en las fases iniciales del proceso, se debe agregar un amortiguador al sistema como carbonato de calcio o cal (Kumar, 2012, p. 158).

- Tiempo de retención: es el intervalo de tiempo en que el substrato está sujeto a la acción de los microorganismos dentro del reactor. Este parámetro solo se puede definir en los sistemas discontinuos (*batch*), donde el tiempo de retención se relaciona directamente con el tiempo de permanencia del substrato dentro del digestor. En los biodigestores continuos y semicontinuos, la variable tiempo del reactor discontinuo se reemplaza por el tiempo de residencia (valor en días del cociente entre el volumen del biodigestor y el volumen de carga por día). Este parámetro está ligado al tipo de substrato y la temperatura del mismo. Una mayor temperatura resultará en una disminución en los tiempos de retención

requeridos y por consiguiente, será menor el volumen de reactor requerido para digerir un volumen de material determinado (Cuesta, 2011, p. 24).

Figura 3. **Variación de los distintos parámetros en función del tiempo para un digestor de carga única o *batch* y otro de carga continua (derecha)**



Fuente: Carrillo, L. (2004). *Energía de Biomasa* p. 32.

- Inhibidores: el oxígeno tiene efecto inhibitor no permanente, ya que existen microorganismos en la flora bacteriana que irán consumiendo el oxígeno que pueda tener el medio. Si la biomasa es rica en nitrógeno, se puede producir un exceso de amoníaco que inhibe el proceso (Kumar, 2012, p. 158). Otros inhibidores son los metales pesados, ya que afectan a los microorganismos metanogénicos. Algunas sustancias orgánicas,

como los antibióticos y los detergentes en determinadas concentraciones pueden inhibir el proceso. Una concentración elevada de ácidos volátiles puede llegar a producir un efecto inhibitor (Cuesta, 2011. p. 24).

Tabla V. **Valores de las concentraciones de inhibidores comunes**

Inhibidores	Concentración Inhibidora(mg/ml)
Sulfuro (como azufre)	200
Cu	10-250
Cr	200- 2 000
Zn	350-1 000
Ni	100-1 000
CN	2
Na	8 000
Ca	8 000
Mg	3 000

Nota: Las bacterias se pueden adaptar con el tiempo a condiciones más desfavorables.

Fuente: Cuesta, M. y Otros. (2011). *Situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento*. p.25

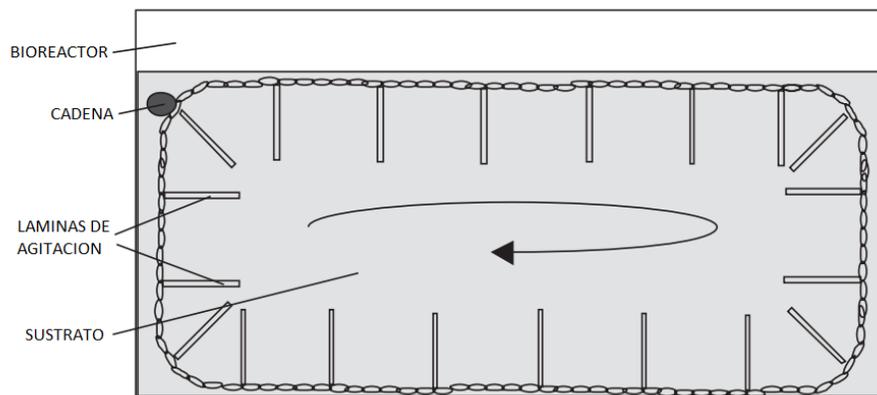
- **Agitación:** cumple una especial función ya que interviene en el mezclado y homogenización del sustrato, en la distribución de calor para mantener la temperatura homogénea, en favorecer la transferencia de gases y evita la sobresedimentación y la formación de espumas.

La agitación puede ser neumática o mecánica a través de burbujeo de biogás recirculado. En ningún caso debe ser violenta, ya que podría destruir los agregados de bacterias.

La intensidad con que se mezcla la materia prima en un reactor de tanque completamente agitado (CSTR) tiene efecto en la inhibición y

restablecimiento de la carga orgánica. Un mezclado lento tolera más carga orgánica que uno rápido (Kumar, 2012, p. 158).

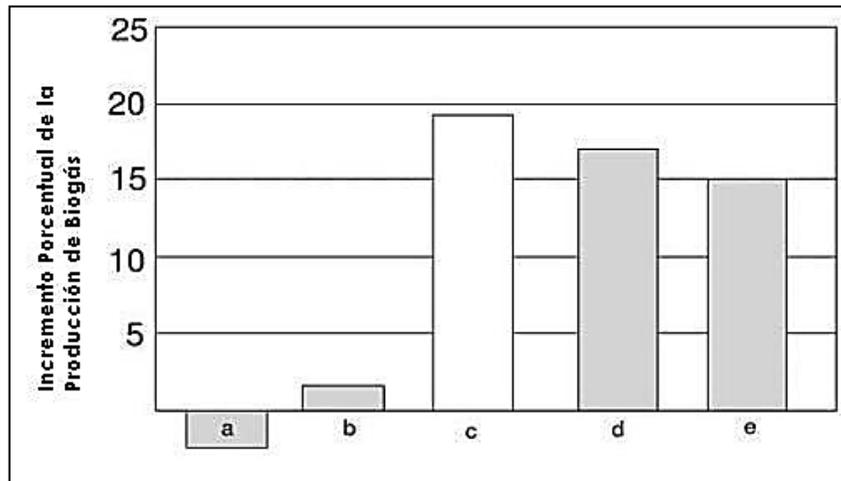
Figura 4. **Reactor de cadena agitadora**



Fuente: Deublein, D. (2011). *Biogas from waste and renewable resources*. p. 255.

- Tamaño de partícula: para que una reacción bioquímica tenga soporte, se necesita el mayor tamaño de partícula posible. La trituración de la biomasa antes de la fermentación se recomienda para aumentar el área superficial (Deublein, 2008, p. 103), sin embargo, en materia de fácil degradación, no tiene gran influencia.

Figura 5. **Incremento de la producción de biogás por trituración**



a. Mezcla de manzanas, papas y zanahorias, b. carne, c. semillas de girasol, d. heno, e. hojas.

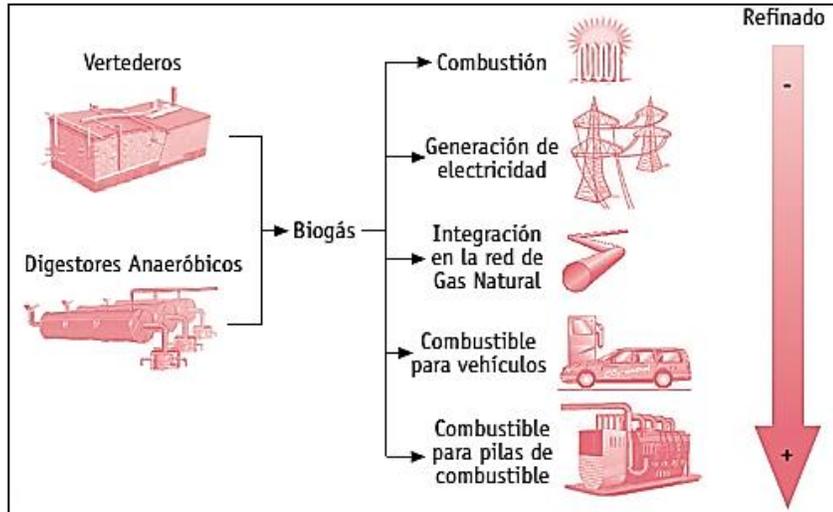
Fuente: Deublein, D. (2008). *Biogas from waste and renewable sources* p. 104.

1.3. **Aplicaciones del biogás**

El aprovechamiento de biogás como fuente de energía aumenta conforme lo hace la importancia de las energías renovables como alternativa a las fuentes tradicionales de energía de origen fósil y no renovable como el petróleo, el gas propano y el carbón.

Dentro de los usos que se le puede dar al biogás se puede mencionar que se utiliza como materia prima en la industria química, así como resulta ser un excelente conservante de granos (Cuesta, 2011, p. 76). El biogás es un excelente suplente del gas propano, se puede utilizar para la generación de calor y electricidad, se puede integrar a la red de gas natural (en países con ese sistema), es posible usarlo como combustible para vehículos y combustible de pilas.

Figura 6. Opciones para la utilización de biogás

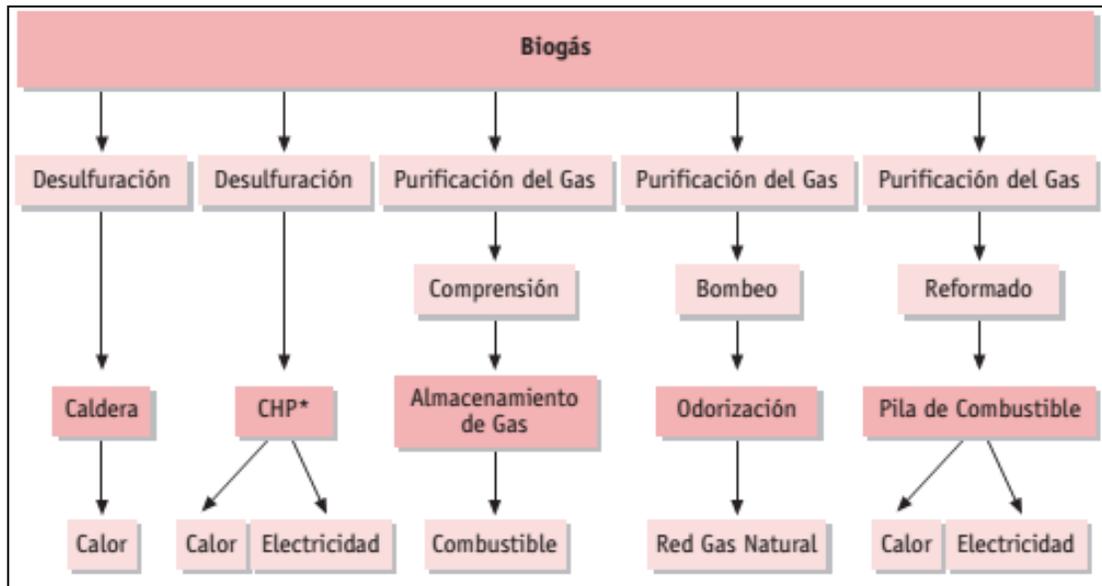


Fuente: Cuesta, M. y Otros (2011). *Situación Actual de la Producción de Biogás y de su Aprovechamiento*. p. 76.

Las aplicaciones más comunes del biogás son la combustión directa para la producción de calor y la generación de energía eléctrica (Kumar, 2012, p. 114).

El biogás es un combustible con las características apropiadas para ser utilizado en motores de combustión interna y turbinas que accionen generadores eléctricos (Pérez, 2006, p. 74). Sin embargo, el gas debe ser depurado previamente en todas sus aplicaciones energéticas y las operaciones de refinación varían en función del uso del biogás. Los requisitos de calidad son mayores cuando se utiliza como combustible de automóviles, cuando se introduce en las líneas de distribución de gas natural o se utiliza en celdas de combustible. La depuración del biogás incluye la eliminación de CO_2 , NH_3 , SH_2 , agua y partículas sólidas (Cuesta, 2011, p.77).

Figura 7. Necesidad de tratamiento del biogás en función del uso

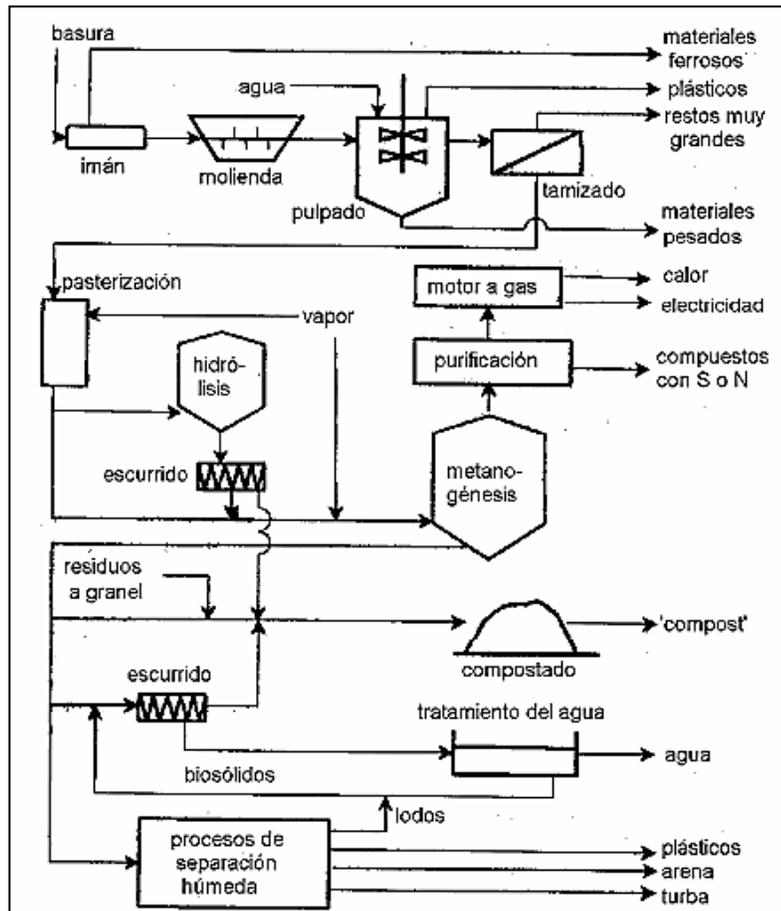


Fuente: Cuesta, M. y Otros (2011). *Situación Actual de la Producción de Biogás y de su Aprovechamiento*. p. 77.

1.3.1. Aprovechamiento de la FORSU para la producción de biogás

La tecnología se aplica en función de la cantidad de sólidos totales (ST) del sustrato a trabajar. En el caso de la FORSU, el porcentaje de ST varía del 10 al 40 % (Rosenzweig, 2011, p. 343).

Figura 8. Esquema global del procesamiento de la basura urbana



Fuente: Carrillo, L. (2004). *Energía de biomasa*. p. 60.

La mayor dificultad de aprovechar este recurso radica en la falta de homogeneidad de los residuos, lo que involucra la separación de la materia orgánica biodegradable de los plásticos y metales (Deublein, 2008, p. 66). Otro aspecto que dificulta la operación de los biodigestores es la falta de fluidez del sustrato que logra obstruirlo en poco tiempo. Para contrarrestar los inconvenientes se ha añadido agua al proceso y pretratamiento, sin embargo, esto consume energía (Abbasi, 2012, p. 106). Este proceso puede conllevar

tratamiento magnético, tamizado, despulpado, separación por gravedad y/o pasteurización (Rosenzweig, 2011, p. 344).

La digestión se puede llevar a cabo tanto a condiciones mesofílicas como termofílicas y toma de 10 – 30 días dependiendo de la temperatura, tecnología y composición del sustrato. En la actualidad, se utilizan tanto reactores por lotes, como continuos.

La separación adecuada de los RSU conlleva resultados de producción de biogás que superan a las excretas de los animales productores, que ha sido el método de mayor utilización por la facilidad de uso y mantenimiento, debido a su homogeneidad (Cuesta, 2011, p. 30).

Tabla VI. **Producción de biogás en función del sustrato utilizado**

Tipo de residuo	Contenido orgánico	Sólidos volátiles (%)	Producción de biogás (m ³ /Tm)
Purines de cerdo	Hidratos de carbono, lípidos y proteínas	3-5	10 – 20
Fangos residuales	Hidratos de carbono, lípidos y proteínas	3-4	17-22
Fangos residuales concentrados	Hidratos de carbono, lípidos y proteínas	15-20	85-110
FORSU separada en origen	Hidratos de carbono, lípidos y proteínas	20-30	150-240

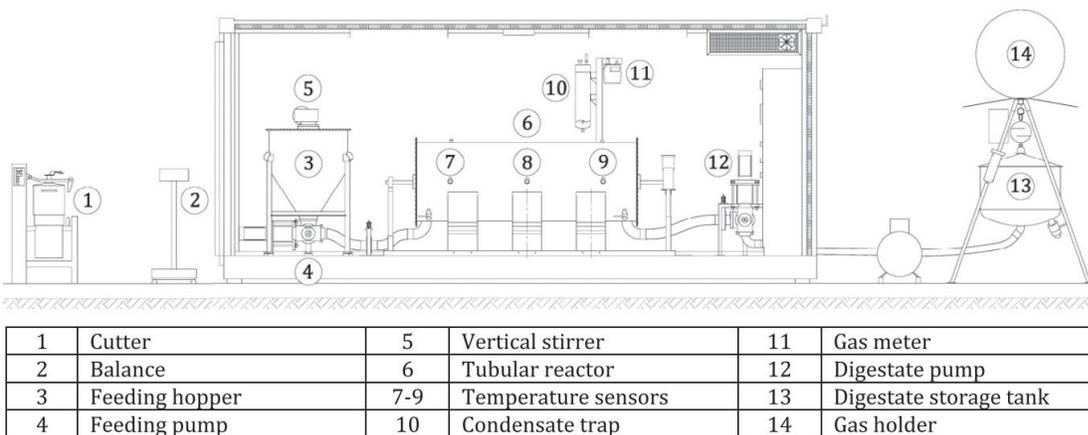
Fuente: Cuesta, M. y Otros. (2011). *Situación actual de la producción de biogás y su aprovechamiento* p. 30.

Para residuos alimenticios mezclados, en base a diferentes experimentos, la producción promedio de biogás a temperaturas mesofílicas es de aproximadamente 370 m³/ton (Curry, 2012, p. 204).

Un modelo utilizado para el aprovechamiento de los desechos de alimentos se ha implementado en el mercado de Sardeña en Italia. El sistema fue probado inicialmente con una planta piloto equipada con una cortadora para

pretratamiento del sustrato, una tolva de alimentación, un reactor tubular horizontal, una bomba neumática de alimentación, una bomba neumática de descarga de digestato, una unidad de medición y tratamiento de biogás, un tanque de almacenamiento de digestato, una unidad de compresión de aire, un receptor de gas y un sistema de control y supervisión (Scano, 2014, p. 23).

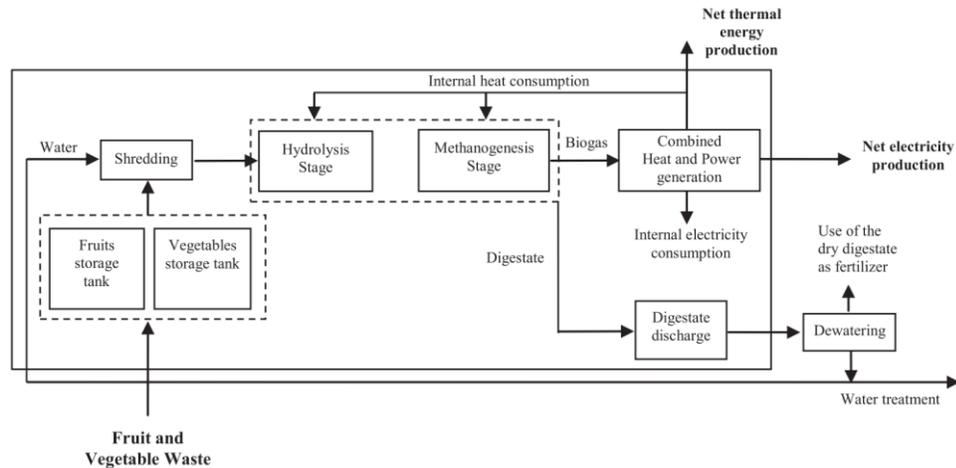
Figura 9. Sistema de digestión anaeróbica a escala piloto



Fuente: Scano, E. (2014). *Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes* p.24.

Finalmente, se obtiene un rendimiento de 318 m³ de gas utilizado por cada megawatt-hora de energía eléctrica producida al llevar el sistema a escala real. Se definió el flujo del proceso de la siguiente manera:

Figura 10. Diagrama de flujo de la planta de energía a escala real



Fuente: Scano, E. (2014). *Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes* p.28.

Los resultados de la investigación de Scano son 525 m³ de metano por día y una generación de 332.5 MW-h/año de potencia eléctrica. El costo de la producción de energía eléctrica es de aproximadamente 150 €/MW-h con un retorno en la inversión a 7.25 años si se aporta a la matriz energética italiana. Este dato se reduce a 5.4 años si el 50% de la energía térmica disponible se usa para sustituir calor de caldera (Scano, 2014, p.22). Basado en análisis del mercado, el capital total de inversión se estimó en €300,000, mientras que se asume que los costos anuales de mantenimiento y operación son el 6% del CTI (Scano, 2014, p.29).

Tabla VII. **Rendimiento de la planta energética a escala real**

Volumen total del digestor	270 m ³
Producción de biogás promedio	525.2 m ³ /día
Producción de metano	289.6 m ³ /día
Producción de energía primaria de biogás	2 859.6 kW-h/día
Consumo de energía eléctrica	90 kW-h/día
Consumo de energía térmica	86.4 kW-h/día
Producción neta de energía eléctrica	910.9 kW-h/día
Energía térmica disponible	1 343.4 kW-h/día

Fuente: Scano, E. (2014). *Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes* p.29.

1.3.2. Generación de energía eléctrica

En la actualidad es posible generar energía eléctrica, a partir de biogás con un motor de cuatro tiempos o diésel, motor Stirling, turbina de gas, microturbina de gas, celdas de combustible de temperatura alta y baja, motores de combustión interna alternativa (MCIA) o una combinación de celda de combustible de alta temperatura con una turbina de gas (Cuesta, 2011, p. 79). La eficiencia se indica en términos de la relación potencia eléctrica / contenido energético en el biogás.

Tabla VIII. **Valores para generadores de potencia**

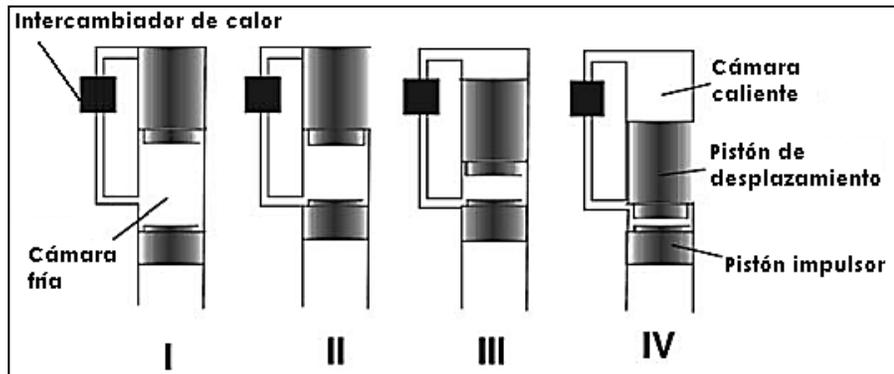
Característica	Motor gasolina	Motor diésel	Motor Stirling	Celda	Turbina gas	Microturbin a gas
Capacidad (kW)	< 100	> 150	< 150	1–10000	---	30 – 110
Inversión (US\$/kW)	1200	1300	1600	Muy alto	1 200	600 – 900
Costo mantenimiento	Alto	Bajo	Muy alto	Muy alto	Muy bajo	Muy bajo
Eficiencia eléctrica (%)	30–40	35 –40	30 – 40	40 – 70	25 – 35	15 – 33
Control de la relación potencia/calor	No es posible	No es posible	No es posible	Buena	Muy buena	Muy buena

Peso	Medio	Medio	Medio	Alto	Bajo	Bajo
Durabilidad	Media	Media	Larga	Corta	Larga	Larga
Ruido	Medio	Fuerte	Medio	Silencio	Silencio	Silencio
Emisiones NO_x	Alto	Alto	muy bajo	muy bajo	Bajo	Bajo
Alternativa biogás a	Gasolina	Gas licuado	---	Gas natural	Gas natural	Kerosene, gas natural

Fuente: Deublein, D. (2008). *Biogas from Waste and Renewable Sources* p. 368.

- Motores de combustión interna: se puede utilizar biogás como combustible para motores de gasolina (ciclo Otto) y para los que funcionan con gasóleo (ciclo diésel). El biogás tiene un octanaje que se encuentra en el rango de 100 a 110, siendo apto para motores de relación volumétrica alta de compresión y como contraparte tiene una baja velocidad de encendido (Cuesta, 2011, p.79). Los motores existentes en el mercado actual fueron desarrollados inicialmente para funcionar con gas natural, por lo que se adaptan al biogás. Si se utiliza un recuperador puede llegar a lograr eficiencias superiores al 40 % (Deublein, 2008, p. 367).
- Motor Stirling: la eficiencia de este proceso es más cercana al ciclo ideal. A este tipo de motor se le debe suministrar calor y frío alternadamente al medio de trabajo una vez por ciclo. Debido a la lenta transferencia de calor, a través de las paredes de la cámara de combustión, se instalan intercambiadores de calor externos en los cuales un gas impulsor especial se calienta y enfría mientras se mueve entre una cámara a baja temperatura y otra a alta.

Figura 11. Principio de funcionamiento de motor Stirling

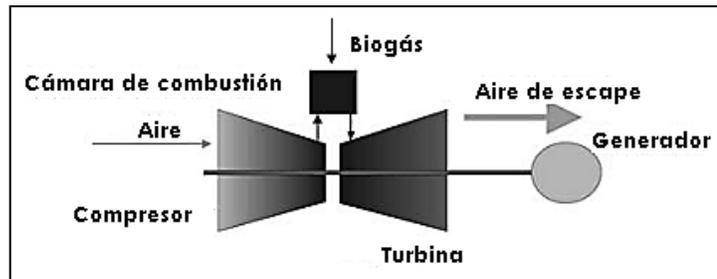


I) El gas impulsor se encuentra sin compresión en la cámara fría; II) El pistón impulsor se mueve hacia arriba, el gas impulsor se comprime y se fuerza hacia la cámara caliente mientras es calentado en un intercambiador de calor externo; III) El gas impulsor calentado presiona el pistón de desplazamiento hacia abajo por su presión de expansión; IV) El pistón de desplazamiento se va hacia abajo junto al pistón impulsor.

Fuente: Deublein, D. (2008). *Biogas from waste and renewable sources* p. 372.

- Turbinas de gas: el biogás puede convertirse en corriente eléctrica por medio de turbinas de gas de mediana y alta capacidad (≥ 20 MW). Funcionan comprimiendo aire del ambiente en el compresor y moviéndolo a la cámara de combustión (donde el biogás se introduce), luego el gas de combustión pasa a la turbina donde se expande y transmite su energía. Después, la turbina impulsa el compresor y el generador de energía. El gas de escape sale de la turbina a 400–600 °C, y puede aprovecharse para encender una turbina de vapor para calentamiento o precalentamiento del aire de entrada.

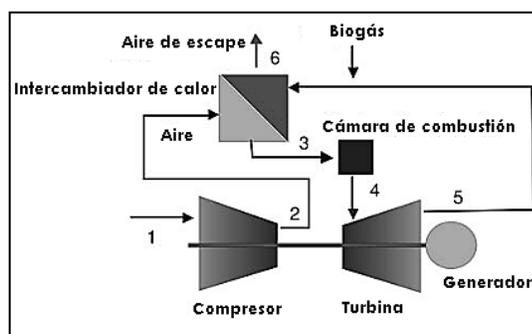
Figura 12. **Proceso de producción de electricidad con biogás por medio de una turbina**



Fuente: Deublein, D. (2008). *Biogás from waste and renewable sources* p. 378.

- Microturbinas de gas: son pequeñas turbinas de alta velocidad con bajas presiones y temperaturas en la cámara de combustión. La mayor parte tiene diseño radial con compresor de aire de combustión, generador e intercambiador de calor. La turbina acciona el compresor, el cual comprime el aire de combustión y el generador (Deublein, 2008, p. 379). Es una tecnología en desarrollo con baja eficiencia en la actualidad, que no está en el mercado de plantas de biogás.

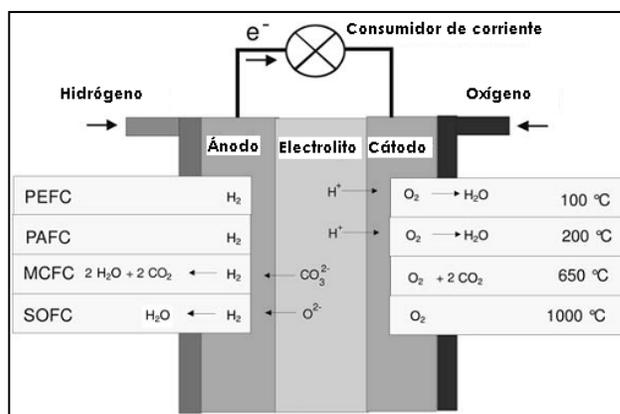
Figura 13. **Esquema de microturbina de gas**



Fuente: Deublein, D. (2008). *Biogas from waste and renewable sources* p. 379.

- Celda de combustible: convierte la energía química del hidrógeno y oxígeno directamente en corriente eléctrica y calor, obteniendo agua como subproducto. En principio, funciona con un electrolito sólido o líquido sostenido entre dos electrodos porosos.

Figura 14. Tipos de celdas de combustible



Membrana polímero-electrolito (PEFC), de ácido fosfórico (PAFC), de carbonato derretido (MCFC), de sólido oxidado (SOFC).

Fuente: Deublein, D. (2008). *Biogas from waste and renewable sources* p. 373.

1.4. Contexto del aprovechamiento energético del biogás

1.4.1. Centroamérica

La tecnología de energía renovable representa una alternativa económica, ambiental y factible para la producción de energía en áreas rurales y para el crecimiento de la capacidad eléctrica instalada. La región cuenta con suficientes recursos para desarrollar sistemas de biomasa principalmente (Biomass Users Network, 2002, p. 30).

El LMOP (Landfill Methane Outreach Program) desarrolló el modelo de biogás centroamericano para ayudar a grupos interesados a evaluar la factibilidad y los beneficios del biogás como fuente de energía. El modelo proyecta la generación y recuperación de biogás máxima de cada relleno sanitario, basándose en factores tales como la cantidad de residuos sólidos depositados en el relleno sanitario, cantidad anual de residuos sólidos recibidos, el índice de generación de metano y el potencial de generación de metano (Steger, 2007, p. 1-1). El modelo de biogás centroamericano está basado en el modelo de emisiones de biogás (LandGEM) de los EE.UU. e incluye aspectos del modelo de biogás mexicano, el modelo de desechos IPCC y el método de CDM AM00255.

1.4.2. México

En el caso de este país norteamericano, en los rellenos sanitarios se depositan 28.2 millones de toneladas anuales de RSU con una composición aproximada de 53 % de residuos orgánicos. Asimismo, se presenta un aumento del 2,7 % anual en la generación de residuos orgánicos (SENER, 2012, p. 84).

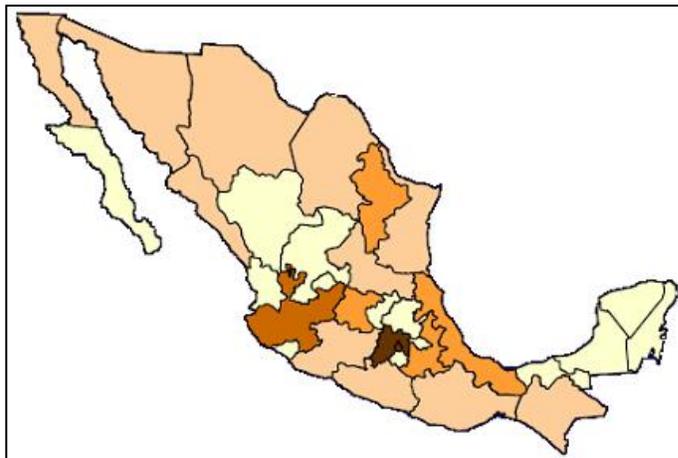
El aprovechamiento de los 186 rellenos sanitarios del país podría generar entre 1 629 y 2 248 ton/año de CH₄, y podría producir entre 652 y 912 MW de energía eléctrica. El aprovechamiento térmico tiene una capacidad de generación entre 1 597 y 1 994 MW.

Tabla IX. **Potencial de aprovechamiento de biogás proveniente de rellenos sanitarios**

	Generación RSM-2010 (miles ton/año)	Potencial de generación de CH4 (miles ton/año)	Potencial de generación de energía eléctrica a partir de biogás (MW)	Potencial de generación de energía térmica a partir de electricidad (MW)
	0 – 500	0-25	0 -10	0 – 25
	550- 1,000	25-50	10 – 20	25 -50
	1,000 – 2,000	50-100	20 – 35	50 – 80
	2,000 – 2,500	100-150	35 – 50	80 – 110
	2,500 – 5,000	150-300	50 -110	110 – 225
Nacional	40,058	1629 -2248	652 – 912	1597 -1994

Fuente: SENER. (2012). *Prospectiva de energías renovables 2012 – 2026*. p. 91.

Figura 15. **Potencial de aprovechamiento de biogás proveniente de rellenos sanitarios**



Fuente: SENER. (2012). *Prospectiva de energías renovables 2012 – 2026* p. 91.

1.4.3. Estados Unidos

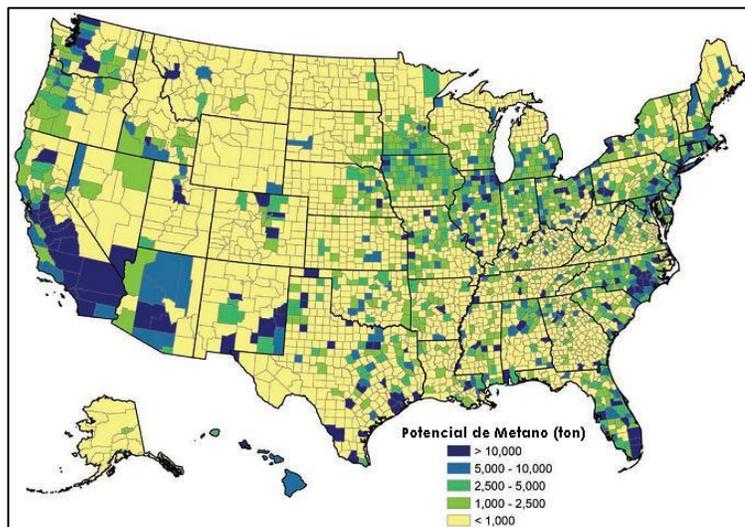
El metano potencial que se puede producir, a partir de material de relleno sanitario, estiércol animal, aguas residuales y desechos orgánicos se calcula en alrededor de 7.9 millones de toneladas por año, lo que equivale a aproximadamente 420 billones de pies cúbicos (NREL, 2013, p.1).

Tabla X. **Potencial de aprovechamiento de biogás proveniente de rellenos sanitarios**

Fuente	Potencial de metano (ton/año)
Aguas residuales	2 339 339
Rellenos sanitarios	2 454 974
Estiércol	1 905 253
Desechos orgánicos	1 157 883

NREL. (2013). *Biogás potential in the United States* p. 1.

Figura 16. **Potencial de metano a partir de fuentes de biogás seleccionadas en EE.UU.**

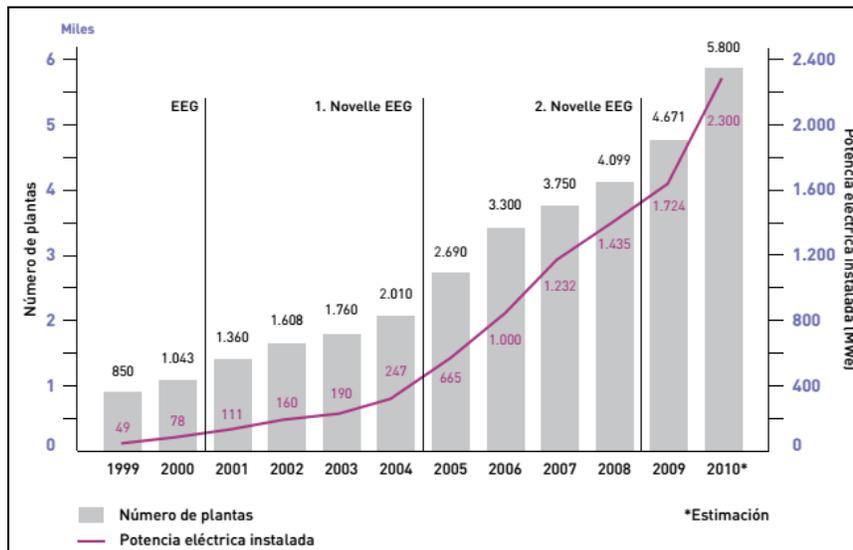


Fuente: NREL. (2013). *Biogás potential in the United States*. p. 88.

1.4.4. Europa

La producción de energía por biogás para electricidad y calor ha incrementado en la Unión Europea, siendo Alemania el mayor productor. Esto se debe en gran parte a la política en el país teutón relacionada a incentivos para la instalación de plantas. Se prevé la construcción de 43 000 plantas para el año 2020 (Deublein, 2008, p. 32). La materia prima utilizada para la producción de biogás son los residuos agrícolas y ganaderos (51 %), cultivos energéticos (33 %), FORSU (11 %) y residuos industriales (5 %).

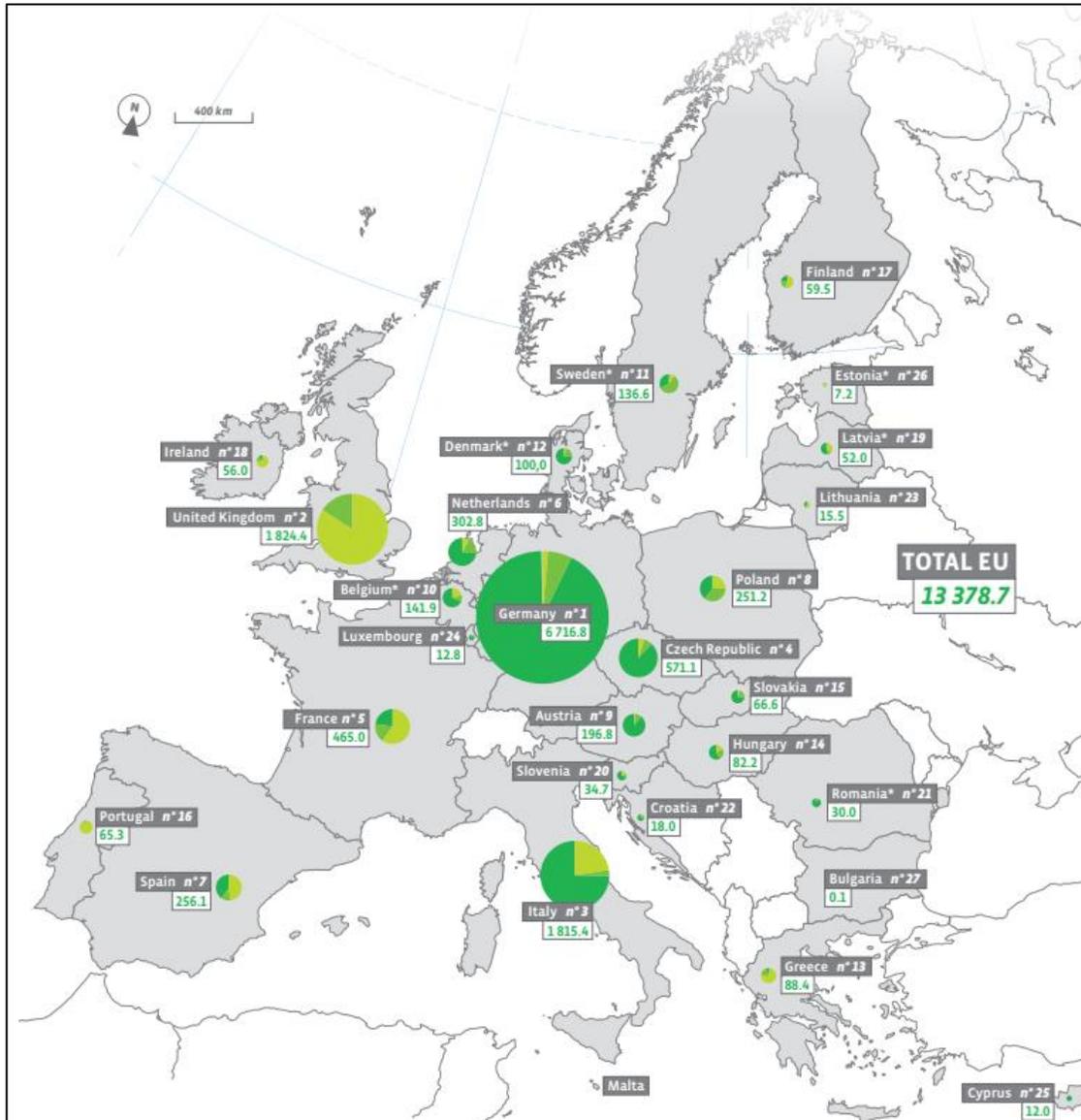
Figura 17. Crecimiento de la producción de biogás en Alemania



Fuente: Pascual, A. (2011). *Situación y potencial de generación de biogás: estudio técnico per 2011 – 2020* p. 73.

En Suecia, hay flotas de vehículos comunales y tren que funciona con biogás. Dinamarca es otro de los países pioneros en el desarrollo de plantas de biogás, donde usan la FORSU como codigestato (Pascual, 2011, p. 65).

Figura 18. Producción de biogás en la UE en 2012 y 2013 (kTEP)



Los números en verde indican la producción total de biogás. En las gráficas circulares el color verde más claro es el indicador del biogás de vertedero, el verde intermedio es concerniente a plantas de tratamiento urbanas e industriales, y el más oscuro es de otros tipos de biogás (principalmente plantas de biogás agrícola descentralizada, plantas de metanización de desechos, plantas centralizadas de co-digestión).

Fuente: EurObserv'ER. (2014). *Biogas barometer* p. 5.

1.4.5. India

En las plantas de este país asiático, se utiliza una mezcla de estiércol de ganado con desecho biodegradable y agua, en una proporción de materia seca y húmeda de 1:9. El reactor no se agita ni se aísla y funciona a temperatura ambiente que oscila entre 14 y 25 °C (Deublein, 2008, p. 40).

El Ministerio de Fuentes de Energía no Convencionales (MNES por sus siglas en inglés), tiene programas de promoción de construcción y mantenimiento de plantas de biogás (Van Nes, 2006, p. 102). Existe un potencial de 12 millones de plantas domésticas y al 2004, 3,67 millones de unidades habían sido instaladas.

1.4.6. China

De acuerdo a datos oficiales del Ministerio de Agricultura de China, 15 millones de viviendas utilizaban biogás para el año 2004 y se proyectaban 27 millones para el 2010 (Van Nes, 2006, p. 102). China planea tener instaladas 200 millones de plantas para el año 2020.

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. El potencial de biogás a partir de la FORSU

2.1.1. Situación actual en Guatemala

En Guatemala existe muy poco desarrollo en el aprovechamiento de biogás, a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), solamente un proyecto se ha llevado a cabo para la recuperación del gas en el vertedero de la zona 13 de la ciudad de Guatemala, así como estudios de factibilidad (SCS Engineers, 2005).

En 2008, la empresa de carbón Trade Ltd, tenía estimado que el 80 % del área del sitio de disposición final en AMSA se encontraba disponible para la instalación de sistemas de extracción de gas. Sin embargo, en ese entonces, ya se había firmado el contrato, no se había concretado por falta de fianza de cumplimiento del mismo (Hernández, 2008, p.55).

El informe preparado por SCS Engineers, como parte del programa de extensión de metano de rellenos sanitarios de los Estados Unidos (Landfill Methane Outreach Program), es el estudio más completo que se haya hecho a nivel urbano en el tema de aprovechamiento de biogás de la FORSU. El mismo contiene una descripción histórica del manejo de los desechos sólidos en el vertedero de la zona 3 capitalina, datos sobre una prueba de extracción de gas, una proyección matemática de recuperación de biogás y una evaluación económica del proyecto; teniendo una estimación de costos de capital de USD2,014,400 sin incluir inflación (SCS Engineers, 2005, p. 76).

En Guatemala no existe un programa de separación de basura, el cual volvería más eficiente la generación de biogás y el manejo del mal olor, además, traería consigo beneficios adicionales como facilitar el reciclaje y disminuir el riesgo a la salud del personal que labora en los vertederos (Herrera, 2004, p.11).

Según el informe del Instituto Nacional de Estadística (INE) relacionado con los residuos y desechos sólidos, publicado en el año 2016, en la República de Guatemala (año 2010) se generaron 75,601,400 toneladas de restos de alimentos y solo en la ciudad de Guatemala 165,083 ton, siendo el tipo de desperdicio de mayor masa en el país y la capital.

Los problemas de residuos sólidos y de la creciente demanda energética se manifiestan a nivel mundial. Así, surge como necesidad el aprovechamiento de alternativas conocidas, con poco desarrollo y beneficioso potencial (Kumar, 2012, p. 151). Como parte de este avance, los países del primer y segundo mundo han generado conocimiento en materia de energías renovables y, para interés de este estudio, han estimado el potencial de biogás como materia prima para la transformación en energía útil. Para ello, se han identificado y clasificado los distintos tipos de biomasa para la generación de biogás, siendo uno de ellos, la FORSU.

En el año 2015, se consumieron 19 millones de m³ de biogás para generación de energía eléctrica en Guatemala (CNEE, 2017, p. 9). Asimismo, se generaron 11,6 TW de energía eléctrica en 2016 (CNEE, 2017, p. 11).

2.1.2. Cálculo del potencial de biogás, a partir de la FORSU

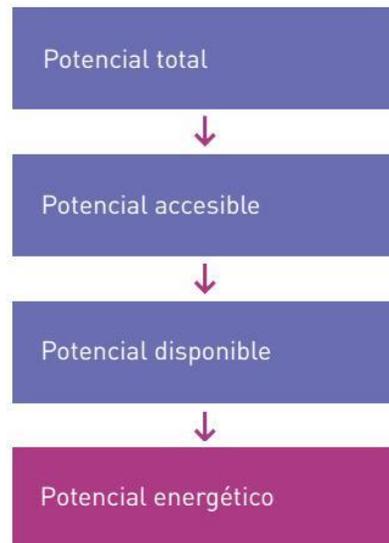
El potencial de producción de biogás se calcula por medio de la metodología utilizada internacionalmente, la cual incluye la determinación del potencial total o teórico, potencial accesible, potencial disponible y potencial energético (Deublein, 2008, p. 21). Este procedimiento se ha utilizado para determinar los potenciales de biogás de España, Alemania, EE.UU., entre otros.

Dentro de las publicaciones relacionadas con el cálculo del potencial de biogás a nivel país se pueden destacar los estudios realizados por España y Chile. Ambos son muy claros en señalar que es una aproximación, debido a la variedad de factores que intervienen en la producción y posterior aprovechamiento del metano (Chamy, 2007, p.5).

Para determinar el potencial, los españoles han optado por utilizar un escenario teórico que involucra una cultura de separación de desechos sólidos en origen, ya que en caso contrario se presentan muchas dificultades operativas que impedirían el funcionamiento de las instalaciones durante las horas por año estimadas.

En este marco, para la valorización energética de la FORSU, se diferencian: potencial total, potencial accesible, potencial disponible y potencial previsto (Grau, 2011, p. 7). El potencial total es aquel que se deriva de toda la materia prima, el accesible es aquella fracción que se puede gestionar de forma viable, el disponible resulta del descuento de la valorización de los residuos y los usos alternativos (compostaje, reciclaje, entre otros). El potencial energético se calcula a partir de la masa de materia prima (FORSU) y su coeficiente de productividad de biogás (PB). Los resultados muestran para España un potencial total de 778,1 ktep/año y potencial disponible de 124,5 ktep/año.

Figura 19. **Diagrama de flujo de metodología para determinar el potencial de biogás**



Fuente: Pascual, A. (2011). Situación y potencial de generación de biogás. p. 5.

Por su parte, en Chile, para la estimación de producción de metano se consideró el promedio por persona al año 2010, el censo realizado en 2002 y se tomó como valor teórico 60 m^3 de biogás/ton residuo. Los resultados se calcularon únicamente para rellenos sanitarios con y sin captación de biogás, dando los datos de 57,775 y 26,835 metros cúbicos de metano al año respectivamente (Chamy, 2007, p. 51).

En un estudio realizado por la Universidad de Concordia en Canadá, se recaban datos de producción de biogás a partir mezclas de residuos de alimentos en temperaturas mesofílicas, resultando en un promedio de 370 m^3 de biogás/ton residuo (Curry, 2012, p. 204). Este promedio de producción surge de ocho distintos estudios experimentales.

Para determinar el potencial energético, se parte de la siguiente data:

2.1.3. Cantidad de biomasa

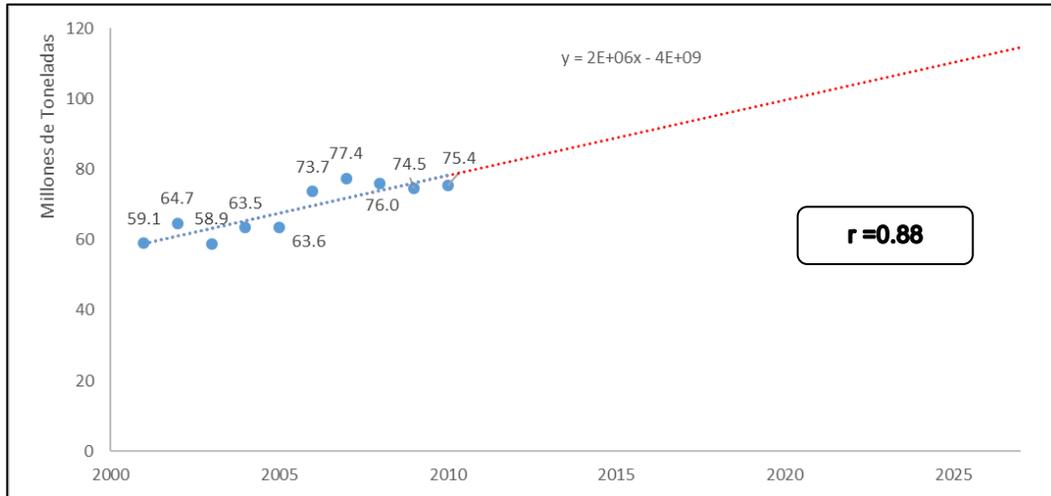
Este parámetro se medirá a partir de información estadística histórica relacionada a la producción de la FORSU. Esta data se encuentra disponible para descarga gratuita en la página web del INE (www.ine.gob.gt). Se tomarán en cuenta datos desde el año 2001, con fines de proyecciones matemáticas a diez años.

Tabla XI. **Producción de FORSU por año en Guatemala (2006-2010)**

Año	Producción de FORSU (Ton)
2001	59,063,800
2002	64,677,700
2003	58,882,100
2004	63,478,400
2005	63,575,200
2006	73,728,889
2007	77,392,090
2008	75,970,084
2009	74,497,854
2010	75,438,057

Fuente: INE, 2016.

Figura 20. **Proyección de producción de FORSU en Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

El coeficiente de correlación (r) se calculó a partir de la fórmula de Excel llamada “CORREL” en inglés o “COEF.DE.CORREL” en español.

Tabla XII. **Producción de FORSU en Guatemala (2017-2027)**

Año	Producción de FORSU (ton)
2017	18,666,620,478
2018	19,094,977,871
2019	19,523,335,264
2020	19,951,692,657
2021	20,380,050,050
2022	20,808,407,444
2023	21,236,764,837
2024	21,665,122,230
2025	22,093,479,623
2026	22,521,837,016
2027	22,950,194,409

Fuente: elaboración propia.

2.1.4. Análisis de Regresión

2.1.4.1. Análisis de datos, Prueba *t* para medias de dos muestras emparejadas

Mediante Microsoft Excel, se utiliza el Add-In llamado “Análisis de Datos”, el cual lo encontramos en el menú “Datos”. Para este caso se utiliza la “Prueba *t* para medias de dos muestras emparejadas” con el fin de determinar si la regresión realizada es confiable. Los resultados son los siguientes:

Tabla XIII. Prueba *t* para medias de dos muestras emparejadas

	Año	Masa de FORSU
Media	2005.5	68670417.4
Varianza	9.166666667	5.46288E+13
Observaciones	10	10
Correlación de Pearson	0.877468779	
Grados de libertad	9	
Estadístico <i>t</i>	-29.3796324	
P(T<=t) una cola	1.49621E-10	
Valor crítico de <i>t</i> (una cola)	1.833112933	
P(T<=t) dos colas	2.99243E-10	
Valor crítico de <i>t</i> (dos colas)	2.262157163	

Fuente: elaboración propia.

Y de manera complementaria se calcula el *t* calculado (*t_c*)

$$t_c = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{(1-r^2)}} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde: *r* = coeficiente de correlación; *n* = número de pares de labores u observaciones.

Para este caso *r* = 0.877468 y *n* = 10

$$t_c = 5.1744$$

Debido a que el valor crítico de t , tanto a una cola como a dos colas, es menor que t_c ; podemos concluir que se rechaza la hipótesis nula, indicándose que es significativo y por lo tanto, existe correlación entre las variables.

2.1.5. Potencial de producción de volumen de biogás

Este dato se podrá determinar a partir de la masa de la FORSU relacionándola con el dato teórico de producción de biogás por cada tonelada de residuos orgánicos. Se utilizarán dos métodos de estimación a partir de la producción promedio de biogás: 195 m³ de biogás por tonelada de FORSU (Cuesta, 2011, p.30) y 370 m³ de biogás por tonelada de FORSU (Curry, 2012, p. 204).

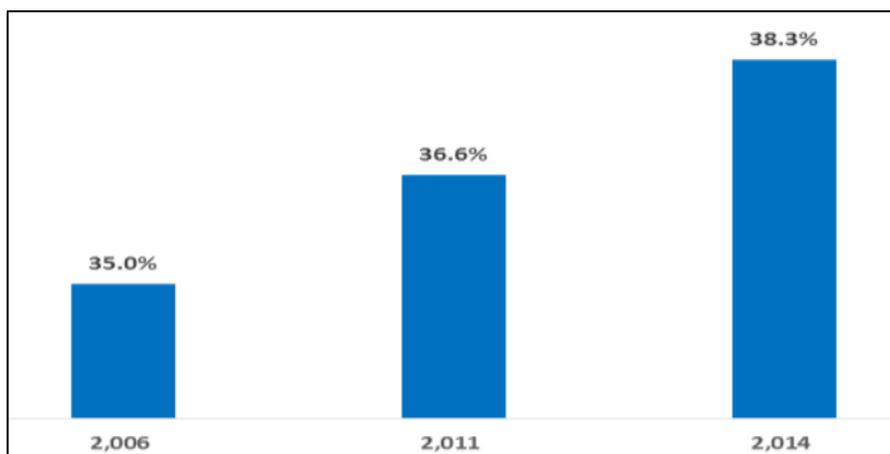
Tabla XIV. **Potencial total de producción de biogás en Guatemala (2017-2027)**

Año	Potencial Total Min (m³)	Potencial Total Max (m³)
2017	18,199,954,966	34,533,247,884
2018	18,617,603,424	35,325,709,061
2019	19,035,251,882	36,118,170,238
2020	19,452,900,341	36,910,631,416
2021	19,870,548,799	37,703,092,593
2022	20,288,197,257	38,495,553,771
2023	20,705,845,716	39,288,014,948
2024	21,123,494,174	40,080,476,125
2025	21,541,142,633	40,872,937,303
2026	21,958,791,091	41,665,398,480
2027	22,376,439,549	42,457,859,658

Fuente: elaboración propia.

El potencial accesible se calcula con base a la capacidad de recolección de desechos. La información oficial nacional indica un evidente crecimiento en el porcentaje de cobertura del servicio de recolección de desechos domiciliarios:

Figura 21. **Cobertura nacional del servicio de recolección de desechos domiciliare**s



Fuente: INE, 2016.

Con esta información se realiza una correlación matemática para predecir los resultados para el período de tiempo evaluado.

Tabla XV. **Cobertura nacional del servicio de recolección de desechos domiciliare**s (2017-2027)

Año	% de Cobertura
2017	40.56%
2018	41.43%
2019	42.37%
2020	43.37%
2021	44.42%
2022	45.55%
2023	46.73%
2024	47.98%
2025	49.28%
2026	50.65%
2027	52.08%

Fuente: elaboración propia.

Multiplicando el porcentaje de cobertura por el potencial total obtenemos el volumen de biogás al que se puede acceder.

Tabla XVI. Potencial accesible de producción de biogás en Guatemala (2017-2027)

Año	Potencial Accesible Min (m³)	Potencial Accesible Max (m³)
2017	7,381,901,734	14,006,685,342
2018	7,713,273,099	14,635,441,264
2019	8,065,236,223	15,303,268,730
2020	8,436,722,878	16,008,140,845
2021	8,826,497,777	16,747,713,730
2022	9,241,273,851	17,534,724,743
2023	9,675,841,703	18,359,289,385
2024	10,135,052,505	19,230,612,445
2025	10,615,475,089	20,142,183,503
2026	11,122,127,688	21,103,524,330
2027	11,653,649,717	22,112,053,310

Fuente: elaboración propia.

El potencial de producción de biogás disponible se presenta como un escenario teórico en el que un 40% de la FORSU accesible se valoriza por medio de digestión anaeróbica (Grau, 2011). En este escenario se toma en cuenta que la FORSU tiene otras valoraciones como el compostaje.

Tabla XVII. Potencial disponible de producción de biogás en Guatemala (2017-2027)

Año	Potencial Disponible Min (m³)	Potencial Disponible Max (m³)
2017	2,952,760,694	5,602,674,137
2018	3,085,309,239	5,854,176,506
2019	3,226,094,489	6,121,307,492
2020	3,374,689,151	6,403,256,338
2021	3,530,599,111	6,699,085,492
2022	3,696,509,540	7,013,889,897
2023	3,870,336,681	7,343,715,754
2024	4,054,021,002	7,692,244,978
2025	4,246,190,036	8,056,873,401
2026	4,448,851,075	8,441,409,732
2027	4,661,459,887	8,844,821,324

Fuente: elaboración propia.

2.1.5.1. Producción de biogás por departamento de Guatemala

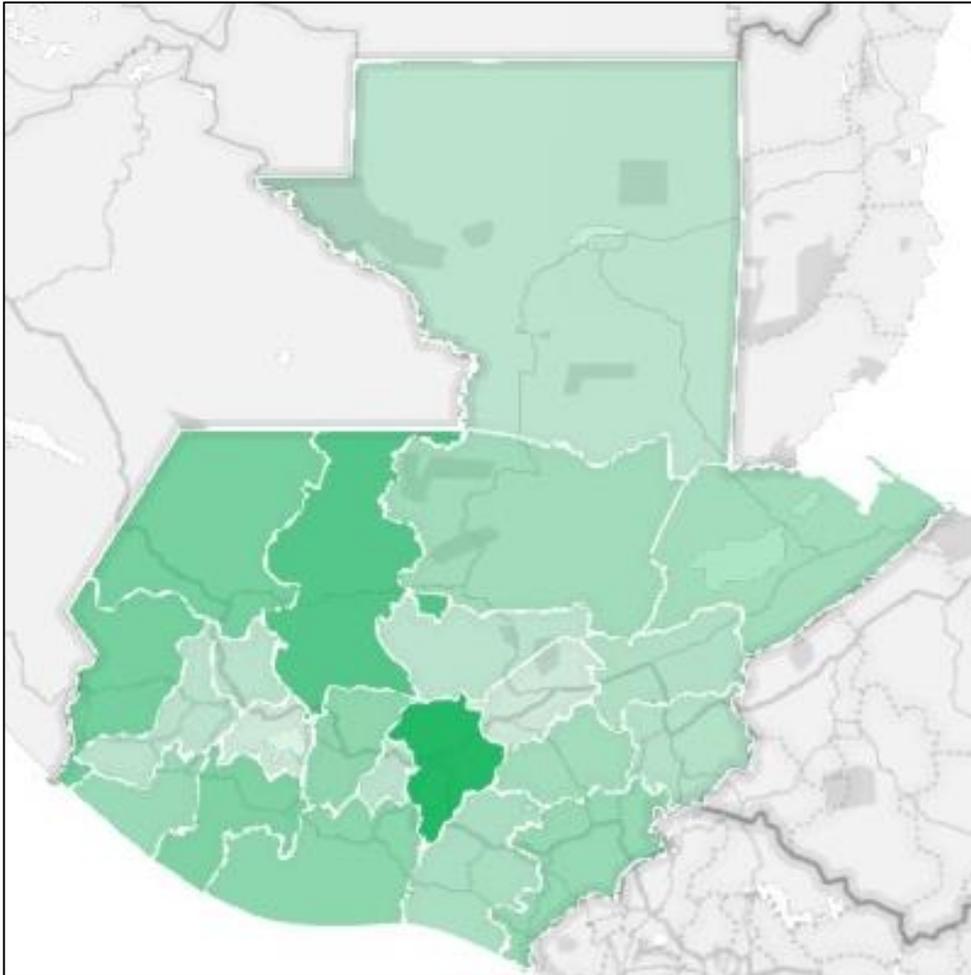
Con base a los datos de producción de residuos por departamento que calculó el INE, se puede determinar la participación porcentual de cada uno de ellos (INE, 2010, p.107).

Tabla XVIII. **Potencial de producción de biogás en Guatemala por departamento (2017)**

Departamento	% Producción de Biogás	Volumen Min Biogás (m ³)	Volumen Max Biogás (m ³)
Guatemala	18.07%	533,474,327	1,012,233,339
Quiché	12.38%	365,603,212	693,708,660
San Marcos	8.74%	257,968,203	489,478,130
Huehuetenango	8.64%	255,144,508	484,120,349
Suchitepéquez	7.49%	221,031,662	419,393,409
Escuintla	6.11%	180,308,430	342,123,689
Chimaltenango	5.78%	170,613,200	323,727,611
Jutiapa	4.81%	142,000,846	269,437,503
Retalhuleu	4.49%	132,599,411	251,598,882
Alta Verapaz	3.83%	113,184,467	214,760,271
Jalapa	3.61%	106,704,659	202,465,250
Izabal	3.47%	102,518,082	194,521,489
Santa Rosa	2.73%	80,524,273	152,789,646
Zacapa	2.01%	59,224,146	112,374,020
Chiquimula	1.80%	53,078,937	100,713,880
Totonicapán	1.15%	34,047,559	64,603,061
Petén	1.00%	29,640,636	56,241,207
Quetzaltenango	0.98%	29,028,564	55,079,839
Sacatepéquez	0.97%	28,742,930	54,537,867
Baja Verapaz	0.94%	27,861,545	52,865,496
El Progreso	0.54%	16,060,785	30,474,311
Sololá	0.45%	13,408,471	25,441,714

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Potencial de biogás por departamento de Guatemala**



Mientras más oscuro sea el tono, mayor su potencial de producción de biogás.

Fuente: elaboración propia.

2.1.6. Potencial de producción de energía eléctrica

Con la información de la tabla VIII es posible calcular la potencia eléctrica que podemos obtener a partir de biogás como materia prima, por medio de un motor Diesel y una microturbina, siendo estos los medios mayormente utilizados en la actualidad.

Tabla XIX. Potencial de producción de energía eléctrica en Guatemala con motor Diesel (2017-2027)

Año	Motor Diesel Min (TW)	Motor Diesel Max (TW)
2017	443	840
2018	463	878
2019	484	918
2020	506	960
2021	530	1,005
2022	554	1,052
2023	581	1,102
2024	608	1,154
2025	637	1,209
2026	667	1,266
2027	699	1,327

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. Potencial de producción de energía eléctrica en Guatemala con microturbina (2017-2027)

Año	Microturbina Min (TW)	Microturbina Max (TW)
2017	325	616
2018	339	644
2019	355	673
2020	371	704
2021	388	737
2022	407	772
2023	426	808
2024	446	846
2025	467	886
2026	489	929
2027	513	973

Fuente: elaboración propia.

Para estimar el número de plantas que se pueden instalar se utiliza la Tabla VII, la cual contiene los resultados experimentales de una planta de producción de energía eléctrica a partir del biogás producido por residuos de alimentos. En este caso, se producen 191,698 m³ de biogás al año por planta. Al dividir el potencial disponible mínimo de producción de biogás por

departamento por este factor se obtiene un estimado de número de plantas que se pueden instalar.

Tabla XXI. Potencial de instalación de plantas de producción de energía a base de biogás en Guatemala, por departamento (2017)

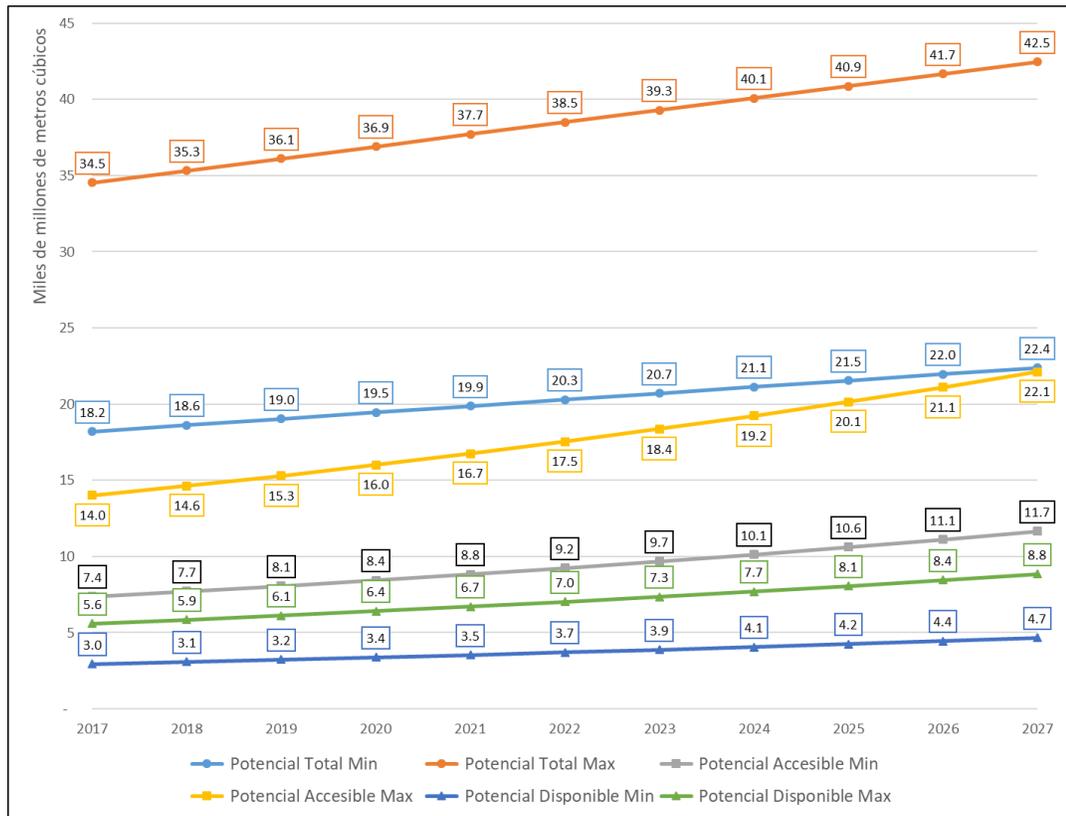
Departamento	Plantas de Producción de Energía Eléctrica
Guatemala	3 299
Quiché	2 261
San Marcos	1 595
Huehuetenango	1 577
Suchitepéquez	1 366
Escuintla	1 115
Chimaltenango	1 055
Jutiapa	878
Retalhuleu	820
Alta Verapaz	699
Jalapa	659
Izabal	634
Santa Rosa	497
Zacapa	366
Chiquimula	328
Totonicapán	210
Petén	183
Quetzaltenango	179
Sacatepéquez	177
Baja Verapaz	172
El Progreso	99
Sololá	82
<i>Total País</i>	<i>18 251</i>

Fuente: elaboración propia.

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3.1. Potencial de producción volumen de biogás en Guatemala

Figura 23. Potencial de producción total, accesible y disponible de biogás en Guatemala (2017-2027)



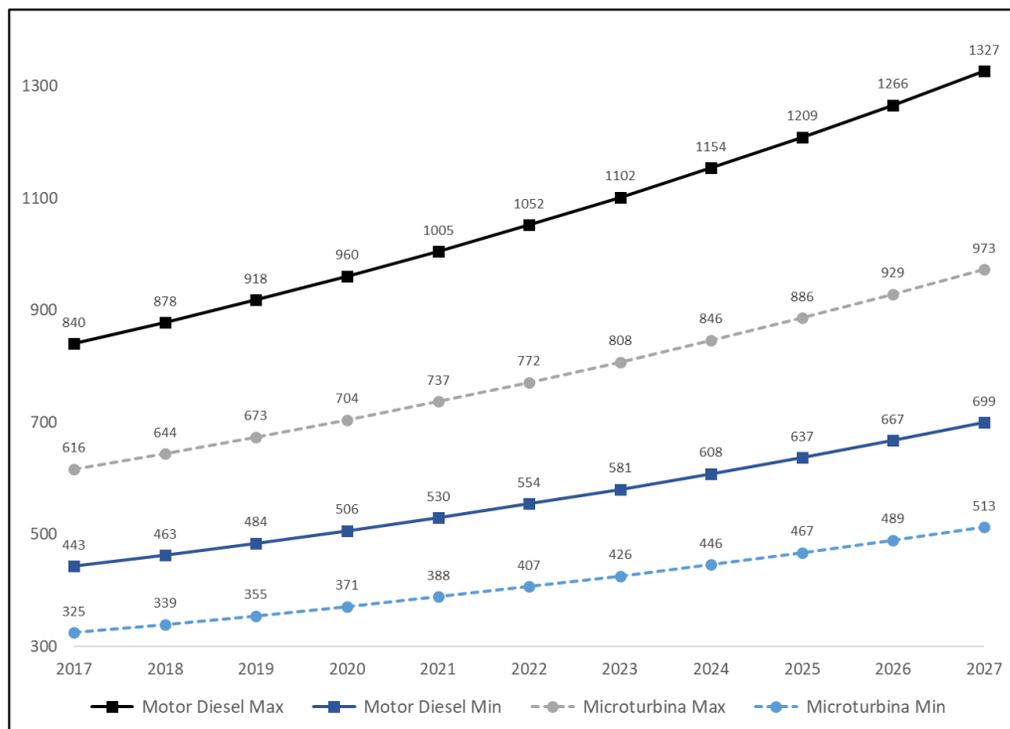
Fuente: Tablas XIII, XV y XVI.

El volumen potencial disponible de biogás que se puede generar a partir de la FORSU en Guatemala, se estima entre 3 y 8.8 mil millones de metros

cúbicos en el período 2017-2027. Los datos surgen a partir de la masa de desechos sólidos orgánicos estimada por el INE, tomando en cuenta los factores de producción de biogás por tonelada de FORSU calculados por Cuesta y Curry para determinar el potencial total. Seguidamente se determina el potencial accesible, que es a partir de la cantidad recolectable de desechos orgánicos; para finalmente estimar el potencial disponible, donde se toma en cuenta que la materia prima tiene otros usos.

3.2. Potencial de producción de energía eléctrica por medio de biogás en Guatemala

Figura 24. Potencial de producción de energía eléctrica en TW por medio de biogás en Guatemala (2017-2027)

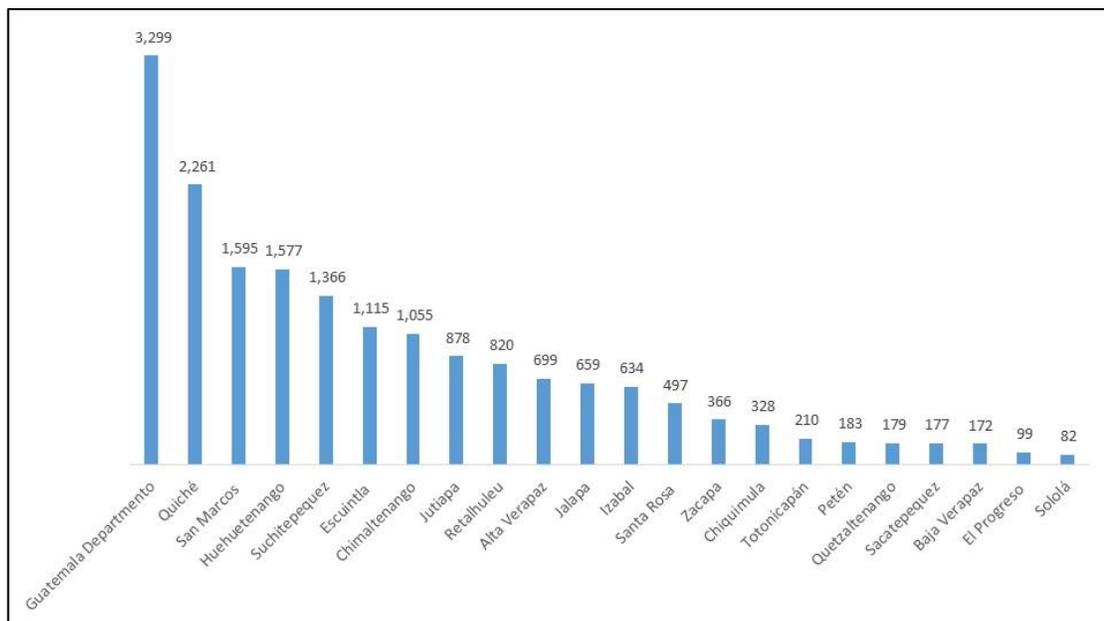


Fuente: Tablas XVIII y XIX.

Con base al volumen de biogás disponible estimado máximo y mínimo, se determina cuánta energía eléctrica se puede producir, mediante la utilización de las tecnologías más utilizadas en la actualidad como el motor Diesel y la microturbina. En el caso del motor Diesel, la producción se encuentra en el rango de 616 a 1327 TW para el período 2017-2027. Si se llegara a utilizar microturbinas se puede llegar a obtener de 325 a 699 TW de electricidad.

3.3. Plantas de producción de energía eléctrica a partir de biogás en Guatemala

Figura 25. Número potencial de plantas de producción de energía eléctrica a partir de FORSU en Guatemala (2017)



Fuente: Tabla XX.

Siguiendo el modelo de Scano (2014), que consiste en una planta de producción de energía eléctrica, a partir de biogás, la cual se alimenta de desechos de frutas y verduras de un mercado; se ha calculado la cantidad de instalaciones de este tipo que se podrían colocar en Guatemala, con base a la producción de biogás estimada. A nivel nacional se podrían instalar más de 18 mil plantas, produciendo cada una de ellas aproximadamente 30 MW-h.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El biogás a partir de restos de alimentos es un recurso energético que aumenta año con año con tendencia lineal. El potencial accesible de biogás aumenta en función del coeficiente de recolección de basura domiciliar a nivel nacional que incide directamente con el potencial disponible.

En Guatemala en 2017, se producen aproximadamente 19 millones de toneladas de residuos de alimentos, los cuales producen un volumen de 3 millones de metros cúbicos de biogás disponibles para su aprovechamiento y posterior conversión a energía eléctrica. El potencial de energía eléctrica se traduce en alrededor de 400 TW al año si se utiliza un motor Diesel. Con este resultado se puede proveer de electricidad a toda la población guatemalteca y aún existiría un excedente aprovechable por la industria y/o para venta a la red regional.

El comportamiento de la oferta actual de biomasa de restos de alimentos a nivel nacional y su correspondiente producción de biogás, garantiza la materia prima para generar energía eléctrica en la actualidad y en los próximos años, logrando un proyecto sostenible.

Con el potencial disponible de biogás, y con base al método experimental utilizado en el mercado de Sardeña en Italia, se estima que se pueden instalar más de 18 000 plantas de producción de energía eléctrica a partir de biogás proveniente de la FORSU en el país.

La planta diseñada en que se basa el presente estudio tiene como materia prima residuos de frutas y verduras separadas al origen. Este es uno de los factores determinantes en el funcionamiento óptimo para la producción de biogás, por lo que al momento de ejecutar un proyecto de este tipo es clave que se tenga materia prima homogénea.

El biol resultante de la digestión anaeróbica es un subproducto de beneficio para la agroindustria. Con los resultados a nivel nacional de 2017, se puede obtener una masa de aproximadamente 2.4 mil millones de toneladas de biofertilizante.

Asimismo, la planta de generación de energía eléctrica produce calor que puede ser aprovechado para reducir los costos de operación, disminuyendo de esta forma el tiempo de retorno de la inversión inicial considerablemente. De acuerdo a los resultados obtenidos en el mercado de Sardeña, este tiempo se reduce 1.85 años si se aprovecha adecuadamente la energía.

Se debe tomar en cuenta que el modelo de planta elegido utiliza aproximadamente 3 300 toneladas de desechos de frutas y verduras al año. En la actualidad existen plantas de mayor capacidad, como es el caso de la planta Biogen© en Westwood, Inglaterra; que tiene una capacidad de 45 000 toneladas de alimentos, produciendo 2.1 MWe que abastece de energía eléctrica a aproximadamente 3 600 casas y teniendo como subproducto 36 000 toneladas de biol que es una cantidad suficiente para crecer 7 000 toneladas de trigo.

También existen casos de modelos integrados al ambiente urbano, con plantas de pequeña escala adaptables a edificios como alternativas para ahorrar en costos de transporte y reducir las cantidades de desecho que se

envían a los rellenos sanitarios. Estos sistemas pueden trabajar con alrededor de 165 toneladas de residuos de alimentos y pueden ser incluidos dentro del diseño de la infraestructura, o bien adaptados a construcciones preexistentes; como es el caso del modelo planteado por Curry (2012). Esta propuesta de proyecto genera 145 MW-h al año y se utiliza 7% de la potencia generada para su funcionamiento, dejando un excedente de 135 MW-h al año. De acuerdo al estudio realizado en la Universidad de Concordia en Canadá en 2014, el costo del mismo asciende a USD230,000, ahorrando más de USD20,000 al año.

Tanto en modelos a gran escala, como en pequeña, es determinante el proceso de pretratamiento que se utiliza para obtener un rendimiento óptimo de producción de biogás. De acuerdo a los estudios consultados, son básicos los sistemas de agitación, biofiltros para desodorización y equipo de reducción de partícula para mejorar la eficiencia de conversión a metano.

Para evitar pérdidas en la eficiencia de producción de biogás, se debe mantener la relación C/N en un rango de 20/1 a 25/1 de manera óptima; ya que en caso sea muy alta se reduce la producción de gas, ya que el nitrógeno se consume muy rápido; y si es muy baja, el medio se vuelve alcalino matando a las arqueobacterias metanogénicas.

CONCLUSIONES

1. En los próximos diez años, es posible generar más de 2 mil millones de metros cúbicos de biogás aprovechables por año, a partir de residuos sólidos orgánicos urbanos en Guatemala. Guatemala es el departamento que más genera a nivel nacional, produce como mínimo un estimado de más de 500 millones de metros cúbicos para 2017. El departamento que menos genera es Sololá, tiene un potencial de más de 13 millones de metros cúbicos, superando por 4 millones el volumen que se consumió en 2015 a nivel nacional para la generación de energía eléctrica.
2. El potencial de energía eléctrica que se podría obtener a partir del biogás disponible es de como mínimo más de 300 TW/año si se utiliza una microturbina y de 400 TW/año en el caso de un motor Diesel. Esto significa que el potencial supera la producción nacional de energía eléctrica de 2016 en más de treinta veces.
3. A nivel nacional se podrían instalar más de 18 mil plantas de aprovechamiento de biogás, a partir de residuos de alimentos, generando cada una de ellas aproximadamente 30 MW-h por año. En el departamento de Guatemala, se podrían instalar más de 3 mil.

RECOMENDACIONES

1. La clasificación de los residuos sólidos domiciliarios al origen es necesaria para que funcione este tipo de sistemas; para ello la educación a la población en materia de manejo de sus desechos es clave en el desarrollo de cualquier proyecto de esta naturaleza.
2. Promover inversiones público – privadas en el tema de manejo adecuado de residuos sólidos, con el propósito de aprovechar la biomasa para producción de biogás, aportar a la matriz energética, reducir el costo de la energía eléctrica, reducir el aporte de metano a la atmósfera, reducir la vulnerabilidad higiénica de los recolectores de basura y demás beneficios derivados de esta práctica.
3. Realizar estudios más específicos en cuanto a producción de residuos de alimentos por sectores poblacionales, tomando en cuenta factores socioeconómicos, topográficos y climáticos, para optimizar costos y estimar de manera más precisa la producción de biogás.
4. Tomar en cuenta otros tipos de plantas de producción de energía eléctrica, a partir de biogás, con el objetivo de adecuar las condiciones locales de la mejor manera posible.
5. Se debe tomar en cuenta que también se precisa buscar mercado para el biol resultante como subproducto de la digestión anaeróbica, ya que aproximadamente el 80% de la masa de FORSU con que se alimenta la planta se convierte en biofertilizante.

6. Al momento de iniciar la operación, se debe de tomar en cuenta manejar un sistema de pretratamiento de la FORSU para su homogenización, incluyendo la reducción de tamaño de partícula. Es óptimo utilizar un sistema de agitación no violento para mejorar la producción y evitar destruir los agregados de bacterias; un mezclado lento tolera más carga orgánica que uno rápido. La carga diaria de alimentación al reactor debe mantenerse constante para maximizar la producción de biogás, para mejorar su calidad (alto contenido de metano y bajo contenido de H_2S). Asimismo, se recomienda un proceso de dos etapas para separar las fases de hidrólisis y acetogénesis de la fase de metanogénesis. Es muy importante mantener la relación C/N en un rango desde 20/1 hasta 25/1, para optimizar la producción de biogás.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abbasi, T., S.M. Tauseef & S.A. Abbasi (2012). *Biogas energy*. EE.UU.: Springer.
2. Asís, H.G., F. Dopazo & P.J. Gianoglio (2006). *Producción de energía a partir de biogás obtenido de residuos sólidos urbanos*. Argentina: Universidad Tecnológica Nacional.
3. Biomass Users Network (2002). *Manuales sobre energía renovable. Biomasa*. (1ª Ed.). Costa Rica: PNUD, GEF, BUN-CA.
4. Carrillo, L. (2004). *Energía de biomasa*. (1º Ed.). Argentina: San Salvador de Jujuy.
5. Comisión Nacional de Energía Eléctrica (2017). *Informe estadístico 2016*. Guatemala: CNEE.
6. Chamy, R. & E. Vivanco (2007). *Potencial de biogás*. Chile: Proyecto Energías Renovables No Convencionales en Chile.
7. Curry, N. & P. Pillay (2012). *Biogás prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment*. Renewable Energy No. 41. Canadá: ELSEVIER.

8. Cuesta, M., F.M. Sánchez, G. Vicente Crespo y S. Villar (2011). *Situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento*. Informe de Vigilancia Tecnológica Madri+d No. 17. Madrid: Fundación Madri+d para el Conocimiento.
9. Daskalopoulos, E., O. Badr y S.D. Probert (1998). *Municipal solid waste: a prediction methodology for the generation rate and composition in the European Union countries and the United States of America*. Resources, conservation and recycling No. 24. Reino Unido: Elsevier.
10. Dávila, J. (2009). *Energía limpia a través del uso de biodigestores y su importancia*. Revista Redfia, No. 9, 5 – 6. Guatemala: Redfia.
11. Deublein, D. & A. Steinheuser (2008). (1ª Ed.). *Biogas from waste and renewable sources*. Alemania: WILEY-VCH.
12. EurObserv'ER (2014). *Biogas barometer*. Francia: EurObserv'ER / ECN / Institute for Renewable Energy / Jozef Stefan Institute / Renac / Frankfurt School of Finance & Management.
13. FAO (2011). *Manual de biogás*. Chile: MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF.
14. Gaspar, L. & A. Matos (2010). *Producción de biogás por digestión anaeróbica de residuos vegetales*. Perú: Universidad Peruana Unión.

15. Grau, A. & O. Farré (2011). *Situación y potencial de valorización energética directa de residuos. Estudio técnico per 2011 – 2020*. España: IDAE.
16. Gunaseelan, V. (2004). *Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks*. Biomass & Bioenergy Vol. 26. India: ELSEVIER.
17. Hernández, A. (2008). *Revisión ambiental inicial, previa a la implantación de la Norma ISO 14001 en el sitio de disposición final en Bárcenas Villa Nueva*. Guatemala: USAC.
18. Herrera, R. (2004). *Cómo y por qué separar la basura*. (2ª Ed.). México: Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.
19. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (2012). *Perfil ambiental de Guatemala 2010-2012: vulnerabilidad local y creciente construcción de riesgo*. Guatemala: IARNA-URL.
20. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2007). *Biomasa: digestores anaerobios*. España: IDAE.
21. Instituto Nacional de Estadística (2010). *Compendio estadístico ambiental 2010*. Guatemala: INE.
22. Instituto Nacional de Estadística (2016). *Compendio estadístico ambiental 2015*. Guatemala: INE

23. Klass, D.L. (1998). *Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals*. EE.UU.: Academic Press.
24. Kumar, S. (2012). *Biogas*. Croacia: InTech.
25. Madigan, M.T., J.M. Martinko, D.A. Stahl & D.P. Clark (2012). *Brock biology of microorganisms*. EE.UU.: Pearson Education Inc.
26. Martínez, C., H. Oechsner, M. Brulé & E. Marañón (2014). *Estudio de algunas propiedades físico-mecánicas y químicas de residuos orgánicos a utilizar en la producción de biogás en Cuba*. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias Vol. 23. Cuba: UCLV.
27. National Renewable Energy Laboratory (2013). *Biogas potential in the United States*. EE.UU.: NREL.
28. Pascual, A., B. Ruiz, P. Gómez, X. Flotats & B. Fernández (2011). *Situación y potencial de generación de biogas. Estudio Técnico per 2011 – 2020*. Madrid: IDAE.
29. Pérez Rosales, M.F. (2006). *Producción de energía eléctrica a partir de biogás procedente de vertederos de residuos sólidos urbanos*. Guatemala: USAC.
30. Petersson, A., M. Thomsen, H. Haugaard-Nielsen & A. Thomsen (2007). *Potential bioethanol and biogas production using lignocellulosic biomass from winter rye, Oilseed Rape and Faba Bean*. Biomass & Bioenergy Vol. 31. Dinamarca: Elsevier.

31. Proyecto Acelerando las Inversiones en Energía Renovable en Centroamérica y Panamá (2010). *Análisis del mercado guatemalteco de energía renovable*. (1ª Ed.). Tegucigalpa: BCIE, PNUD, FMAM.
32. Reay, D., P. Smith & A. van Amstel (2010). *Methane and climate change*. Reino Unido: Earthscan.
33. Rosenzweig, A.C. & S.W. Ragsdale (2011). *Methods in methane metabolism, Part A: methanogens*. Methods of Enzymology Vol. 494. EE.UU.: Elsevier.
34. Secretaría de Energía (2012). *Prospectiva de energías renovables 2012 – 2026*. México: SENER.
35. Scano, E.A., C. Asquer, A. Pistis, L. Ortu, V. Demontis & D. Cocco (2014). *Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant*. Energy Conversion and Management No. 77. Italia: ELSEVIER.
36. SCS Engineers (2005). *Informe de la prueba de extracción y estudio de pre-viabilidad para la recuperación de biogás en el relleno sanitario El Trébol, ciudad de Guatemala, Guatemala*. EE.UU.: SCS Engineers.
37. Stege, A. & D. Murray (2007). *Manual de usuario modelo centroamericano de biogás*. Versión 1.0. EE.UU.: LMOP.

38. Van Nes, W.J. (2006). *Asia hits the gas*. Renewable Energy World Magazine Vol. 9 No. 1. EE.UU.: PennWell Co.
39. Williams, P.T. (2005). *Waste treatment and disposal*. Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd.

ANEXO

En el informe del INE, en 2010, sobre residuos y desechos sólidos, se informa acerca de los detalles de generación de basura domiciliar y el manejo de desechos sólidos en las urbes de Guatemala. En el informe más actualizado del tema en el país, que es el Perfil Ambiental de Guatemala 2010-2012 se utilizan los datos del INE (IARNA, 2012, p. 419).

Tabla XXII. Disposición final de la basura domiciliar por departamento en Guatemala, en 2009 (toneladas)

DEPARTAMENTO	POBLACIÓN TOTAL	TOTAL	SERVICIO MUNICIPAL	SERVICIO PRIVADO	LA QUEMAN	TIRAN EN CUALQUIER PARTE	LA ENTIERRAN	OTRA
República	14.017.057	1.746.059	162.136	361.445	530.196	459.722	170.829	61.732
Guatemala	3.049.601	445.242	63.371	257.938	58.473	45.119	7.239	13.103
El Progreso	153.261	19.020	537	2.567	10.937	3.694	811	473
Sacatepéquez	303.459	18.830	2.650	6.002	3.640	2.004	1.894	2.639
Chimaltenango	578.976	80.304	6.579	13.634	23.479	17.061	11.792	7.758
Escuintla	670.570	93.008	13.623	11.538	51.313	11.522	2.940	2.073
Santa Rosa	334.720	41.539	2.813	3.321	21.545	11.303	1.948	608
Sololá	411.202	46.528	8.193	1.180	7.998	17.164	9.811	2.182
Totonicapán	447.651	62.089	2.699	987	19.312	15.144	21.345	2.603
Quetzaltenango	754.457	85.367	18.274	4.503	29.172	16.883	13.754	2.781
Suchitepéquez	492.481	68.307	6.248	9.118	34.606	14.695	2.450	1.189
Retalhuleu	290.796	40.333	3.231	4.073	24.857	6.787	994	391
San Marcos	972.781	134.925	6.594	5.164	37.919	50.667	25.644	8.936
Huehuetenango	1.085.357	95.077	4.501	4.006	15.281	50.373	17.352	3.565
Quiché	890.764	113.795	2.816	4.147	20.812	57.079	23.346	5.595
Baja Verapaz	257.876	29.179	2.037	644	9.141	13.142	3.297	918
Alta Verapaz	1.046.185	118.376	2.267	8.443	42.341	49.348	13.976	2.001

Petén	588.860	32.240	364	2.055	22.569	6.272	734	247
Izabal	393.345	50.250	1.643	8.372	30.461	8.074	1.115	584
Zacapa	215.752	29.925	3.617	2.934	14.695	7.902	520	257
Chiquimula	355.223	49.269	5.522	3.677	14.543	22.647	1.608	1.272
Jalapa	301.755	38.549	1.646	3.346	11.038	15.207	6.165	1.147
Jutiapa	421.984	53.908	2.908	3.795	26.064	17.634	2.098	1.409

Fuente: INE. (2010). *Compendio estadístico ambiental 2010*. p. 106.