



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE LA DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL
DE BIOGÁS PRODUCIDO POR LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN GUATEMALA**

Juan Pablo García Solares

Asesorado por el MSc. Ing. Mario Roberto Hernández Morán

Guatemala, junio de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE LA DETERMINACIÓN DEL 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

JUAN PABLO GARCÍA SOLARES

ASESORADO POR EL MSC. ING. MARIO ROBERTO HERNÁNDEZ MORÁN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, JUNIO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL I	
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León Paz
EXAMINADOR	Ing. Eduardo Federico Flores Salazar
EXAMINADOR	Ing. Mario Alberto Estrada Cuellar
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE LA DETERMINACIÓN DEL 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 Postgrados, con fecha de agosto 2014.

Juan Pablo García Solares



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / Ext. 86226

ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



000056

ADSE-MEAPP-0001-2015

Guatemala, 16 de marzo de 2015.

Director:
Víctor Manuel Monzón
Escuela de Ingeniería Química
Presente.

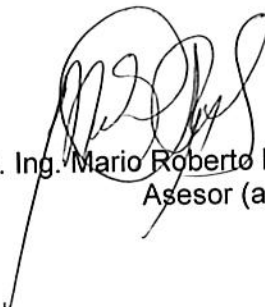
Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del (la) estudiante **Juan Pablo García Solares** con carné número **2003-12390**, quien opto la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la **Maestría en Energía y Ambiente**.

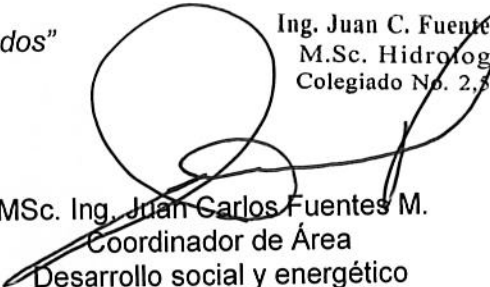
Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente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

Sin otro particular, atentamente,

"Id y enseñad a todos"


MSc. Ing. Mario Roberto Hernández M.
Asesor (a)

Mario Roberto Hernández Morán
Ingeniero Civil
Master en Ingeniería Sanitaria
Colegiado No. 4,518


MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes M.
Coordinador de Área
Desarrollo social y energético

Ing. Juan C. Fuentes M.
M.Sc. Hidrología
Colegiado No. 2,304


Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado

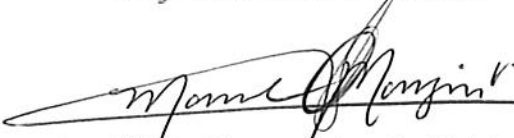
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
ESCUELA DE POST-GRADO
FACULTAD DE INGENIERIA
DE GUATEMALA

Cc: archivo
/la

Ref.EIQ.TG.077.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el informe de la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería del estudiante, **JUAN PABLO GARCÍA SOLARES**, ha optado por la modalidad de estudios de postgrado para el proceso de graduación de pregrado, que para ello el estudiante ha llenado los requisitos establecidos en el normativo respectivo y luego de conocer el dictamen de los miembros del tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Diseño de Investigación del Programa de Maestría en **ENERGÍA Y AMBIENTE** titulado "DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE LA DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE BIOGÁS PRODUCIDO POR LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN GUATEMALA". Procede a **VALIDAR** el referido informe, ya que reúne la coherencia metodológica requerida por la Escuela.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, junio de 2015

Cc: Archivo
Copia: Colegio de Ingenieros Químicos de Guatemala
VMMV/ale



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE LA DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE BIOGÁS PRODUCIDO POR LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN GUATEMALA**, presentado por la estudiante universitaria: **Juan Pablo García Solares**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'A. R. Sic García'.

Ing. Angel Roberto Sic García
DECANO



Guatemala, junio de 2015

/cc

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SIMBOLOS	IX
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XVII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
3.1. Descripción del problema	7
3.2. Formulación del problema	8
3.3. Preguntas de investigación.....	9
3.4. Delimitación del problema	10
4. JUSTIFICACIÓN	11
5. OBJETIVOS	13
6. ALCANCES.....	15
7. MARCO TEÓRICO	17
7.1. Biogás.....	17

7.2.	Biometanización por digestión anaeróbica.....	18
7.2.1.	Etapas de la digestión anaeróbica	18
7.2.2.	Parámetros del proceso	25
7.3.	Aplicaciones del biogás.....	35
7.3.1.	Tecnología para el aprovechamiento de biogás.....	37
7.3.2.	Aprovechamiento de la FORSU para la producción de biogás	44
7.3.3.	Generación de energía eléctrica	47
7.4.	Contexto del aprovechamiento energético del biogás.....	51
7.4.1.	Centroamérica.....	52
7.4.2.	México.....	52
7.4.3.	Estados Unidos	54
7.4.4.	Europa.....	55
7.4.5.	India	57
7.4.6.	China.....	58
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO	59
9.	METODOLOGÍA	61
9.1.	Tipo de estudio.....	61
9.2.	Variables e indicadores	61
9.3.	Fases	63
9.3.1.	Fase 1: recolección de datos e investigación documental.....	64
9.3.2.	Fase 2: análisis de datos	64
9.4.	Resultados esperados.....	66
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	67

11.	CRONOGRAMA.....	69
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO.....	71
13.	BIBLIOGRAFÍA.....	73
	ANEXOS.....	79

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Etapas de la fermentación anaeróbica	19
2.	Micrográficas de escaneo de electrones de diversas especies de arqueobacterias metanogénicas	20
3.	Metanogénesis a partir del acetato	24
4.	Influencia de la presión parcial de hidrógeno en la liberación de energía durante la acetogénesis y metanogénesis a partir de CO ₂ y H ₂	28
5.	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).....	30
6.	Variación de los distintos parámetros en función del tiempo para un digestor de carga única o <i>batch</i> y otro de carga continua.....	33
7.	Incremento de la producción de biogás por trituración.....	34
8.	Opciones para la utilización de biogás	35
9.	Necesidad de tratamiento del biogás en función del uso	36
10.	Diagrama de flujo de pretratamiento por trituración	38
11.	Diagrama de flujo de digestores de mezcla completa	39
12.	Tipos de reactores de mezcla completa.....	40
13.	Diagrama de flujo de biodigestores de flujo pistón.....	41
14.	Esquema del modelo de digestor de cúpula móvil	42
15.	Esquema del modelo de digestor de cúpula fija.....	43
16.	Perfil de biodigestor de polietileno	44
17.	Esquema global del procesamiento de la basura urbana.....	46
18.	Generadores	48

19.	Principio de funcionamiento de motor Stirling	49
20.	Proceso de electricidad con biogás por medio de una turbina.....	50
21.	Esquema de microturbina de gas	50
22.	Tipos de celdas de combustible.....	51
23.	Potencial de aprovechamiento de biogás proveniente de rellenos sanitarios	53
24.	Potencial de metano a partir de fuentes de biogás seleccionadas en EE. UU.....	54
25.	Crecimiento de la producción de biogás en Alemania	55
26.	Producción de biogás en la UE en 2011 (kTEP).....	57
27.	Diagrama de flujo de metodología para determinar el potencial de biogás	65
28.	Cronograma.....	69

TABLAS

I.	Composición de biogás derivado de diversos tipos de desechos	17
II.	Características de las arqueobacterias metanogénicas.....	23
III.	Contenido en nitrógeno y relación C/N en varios desperdicios.....	26
IV.	Intervalos de temperaturas en que trabajan las bacterias anaeróbicas. .	29
V.	Valores de las concentraciones de inhibidores comunes.	32
VI.	Comparativa de los sistemas de domo fijo y flexibles.....	44
VII.	Producción de biogás en función del substrato utilizado	46
VIII.	Valores para generadores de potencia	47
IX.	Potencial de aprovechamiento de biogás proveniente de rellenos sanitarios (México).....	53
X.	Potencial de aprovechamiento de biogás proveniente de rellenos sanitarios (EE. UU.)	54
XI.	Compañías de metanización representativas en Europa.....	56

XII.	Producción de biogás en la Unión Europea, en 2011 (en kTEP)	56
XIII.	Parámetros de generación de energía eléctrica para la digestión anaerobia	62
XIV.	Biogás potencial a partir de varias formas de desecho sólido biodegradable a 35 °C	63
XV.	Producción de FORSU, por año, en Guatemala (2001-2009).....	67
XVI.	Recursos necesarios para la investigación	71

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo	Significado
CHCOO	Acetato
H ₂ S	Ácido sulfhídrico
H ₂ O	Agua
S ⁰	Azufre elemental
CBA	Canasta básica alimentaria
Ca	Calcio
c	Centésima (prefijo)
CN	Cianuro
Zn	Cinc
Cu	Cobre
Cl	Cloro
CH ₃ NH ₃ Cl	Cloruro de metilamina
PB	Coefficiente de productividad de biogás
Cr	Cromo
DQO	Demanda química de oxígeno
CO ₂	Dióxido de carbono
ΔG°	Energía libre de Gibbs
HCOO ⁻	Formiato
GEI	Gases efecto invernadero
g	Gramos
°C	Grados Celsius
H ⁺	Hidrógeno iónico
H ₂	Hidrógeno molecular

Fe°	Hierro elemental
NH⁺	Ión amonio
J	Joule
k	Kilo (prefijo)
L	Litros
Mg	Magnesio
M	Mega (prefijo)
PAFC	Membrana de ácido fosfórico
MCFC	Membrana de carbonato derretido
SOFC	Membrana de sólido oxidado
PEFC	Membrana polímero - electrolito
CH₄	Metano
CH₃OH	Metanol
CH₃NH₃⁺	Metilamina
CH₃SH	Metilmercaptano
m	Metros
m³	Metros cúbicos
μ	Micro (prefijo)
mg	Miligramos
ml	Mililitros
M€	Millones de euros
CO	Monóxido de carbono
M	Molar
MCIA	Motores de combustión interna alternativa
Ni	Níquel
N₂	Nitrógeno gaseoso
n.d.	No disponible
NO_x	Óxido de nitrógeno
O₂	Oxígeno gaseoso

pH	Potencial de hidrógeno
RMC	Reactores de mezcla completa
C/N	Relación carbono / nitrógeno.
RSM	Residuos sólidos municipales
RSU	Residuos sólidos urbanos
Na	Sodio
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
SH₂	Sulfuro de hidrógeno
TRH	Tiempo de retención hidráulico
ton	Toneladas
TEP	Toneladas equivalentes de petróleo
ATP	Trifosfato de adenosina
W	Watt
We	Watts equivalentes
W-h	Watt hora

GLOSARIO

AMSA	Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán.
Biogás	Es el nombre con que se le conoce al gas resultante de la descomposición de la biomasa.
Biol	Abono orgánico resultante de la biometanización anaerobia.
Biomasa	Materia de origen biológico.
Biometanización	Producción de metano a partir de materia de origen biológico.
CEDECAP	Centro de Demostración y Capacitación de Tecnologías Apropriadas.
CSTR	<i>Completely stirred tank reactor</i> (Reactor de tanque completamente agitado).
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	Residuo que se considera inútil y se dispone en un basurero.
Desecho orgánico	Desecho de origen vegetal o animal.
Doméstico	Relacionado con el hogar.
Energía	Capacidad de realizar un trabajo.
FORSU	Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.
GWP	<i>Global warming potential</i> (Potencial de calentamiento global).
IARNA	Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente.
IDAE	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
INE	Instituto Nacional de Estadística.
Inhibidor	Agente químico que impide o ralentiza una reacción química.
LandGEM	Modelo de Emisiones de Biogás de los EE.UU.
LMOP	<i>Landfill methane outreach program</i> (Programa de alcance de metano de relleno sanitario).

NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory.</i>
Potencial de hidrógeno	Logaritmo inverso de la concentración de hidrógeno en una solución.
Sener	Secretaría de Energía.
Sustrato	Es la superficie en la que una planta o animal vive.
Solución	Es una mezcla homogénea de dos o más sustancias.
Soluto	Es la sustancia que se disuelve en un solvente.
Solvente	Es una sustancia en la que se diluye un soluto.
Sustancia	Materia homogénea de composición química definida.
Tiempo de retención Hidráulico	Magnitud de tiempo que permanece el sustrato dentro del reactor.
Reactor	Equipo donde ocurre una reacción química.
Relación carbono/nitrógeno	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 las urbes guatemaltecas, específicamente de la denominada fracción orgánica. La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) está conformada, en su mayoría, por restos vegetales, completándose con desperdicios animales. La separación en origen de este componente mejora notablemente la calidad y cantidad de gas producido. Asimismo, se deben tomar en cuenta parámetros como proporción carbono/nitrógeno, dilución, sustrato, temperatura, pH, tiempo de retención, inhibidores, agitación y tamaño de partícula para que el producto tenga las cualidades esperadas.

La tecnología utilizada para el aprovechamiento de biogás es otro factor determinante para la producción del mismo. En este caso se tomarán en cuenta tres maneras de calcular la cantidad de energía eléctrica: motor de combustión interna, microturbina y dato teórico de producción de potencia eléctrica

1. INTRODUCCIÓN

Con el propósito de desarrollar conocimiento útil en el tema energético nacional, específicamente relacionado con la producción de biogás 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 de la cantidad de biogás tanto a nivel micro (doméstico) como macro (industrial o municipal) y pretende dar fundamentación a la generación de energía, optimizando recursos y reduciendo desechos.

Paralelamente, en el ámbito económicosocial, ayudará a crear conciencia sobre la utilidad de los desechos orgánicos y su correspondiente separación, ya que representan energía, ahorro y mejores condiciones sanitarias que conllevan a mejoras en la salud poblacional, además del desarrollo de una industria energética.

La investigación se fundamenta en referencias relacionadas con los temas de biomasa, biogás y manejo de desechos, tanto a nivel nacional como internacional.

El contenido describe de forma progresiva toda la base teórica para obtener, con la mayor fiabilidad, los datos de potencial energético resultante. Se detalla, primero, el planteamiento del problema y la formulación de preguntas orientadas, los cuales dieron origen a los objetivos tanto general como específico de este estudio.

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.

La metodología identifica claramente cada uno de los pasos tomados para poder 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.

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.

2. ANTECEDENTES

En Guatemala no existe, en la actualidad, un programa de aprovechamiento de biogás a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), solamente han habido proyectos inconclusos para la recuperación del gas en el vertedero de la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA) (Hernández, 2008), así como estudios en el vertedero de la zona 3 de la ciudad de Guatemala (SCS Engineers, 2005), el proyecto en el beneficio de café Finca El Cascajal (Quiñonez, 2014), la planta de generación de biogás en la fábrica de embutidos Toledo y pequeños proyectos independientes basados en biodigestores domiciliarios (Dávila, 2009).

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, aunque ya se había firmado el contrato, no se había concretado por falta de fianza de cumplimiento del mismo (Hernández, 2008).

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 US\$ 2 014 400,00 sin incluir inflación (SCS Engineers, 2005, p. 76).

Uno de los proyectos con resultados muy satisfactorios ha sido llevado a cabo por la Asociación Nacional del Café (Anacafe) en la Finca El Cascajal. Este proyecto inició en 2011, conjuntamente con otros 18 en la región centroamericana, a través de un programa del Gobierno de Holanda e Hivos. El proyecto se hace a través de tecnología para el tratamiento y manejo de aguas residuales y conlleva la generación de créditos de carbono. Los resultados indican una producción máxima de hasta 950 m³/día, durante la cosecha 2012-2013 (Quiñonez, 2014, p. 8).

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 2010, en la República de Guatemala se generaron 361 815 toneladas de restos de alimentos y solo en la ciudad de Guatemala 144 414 ton (2009), 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.

Dentro de las publicaciones relacionadas con el cálculo del potencial de biogás 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 poder 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.

Por su parte, en Chile, para la estimación de producción de metano se consideró el promedio por persona al 2010, el censo realizado en 2002 y se

tomó como valor teórico 60 m³ 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).

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. Descripción del problema

Ante la problemática energética que se avecina por la escasez y altos costos del petróleo, existe la necesidad de encontrar fuentes alternativas de energía que, a su vez, sean factibles económicamente.

Otro 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
- Abono orgánico (biol)

La deforestación por la necesidad de utilizar leña como fuente energética y el cambio de uso que se le da al suelo, es una problemática que se puede reducir si se aprovecha el biogás generado por los desechos sólidos urbanos, usándolo para cocinar, sistema empleado en la actualidad por algunas comunidades en Sololá (Larrañaga, 2012, p. 13).

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, elemento 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.

3.2. Formulación del problema

Una alternativa energética que involucra el aprovechamiento de los desechos sólidos orgánicos, la reducción de la deforestación y el cuidado del medio ambiente son fortalezas del biogás como fuente de energía.

El tiempo de producción, que toma entre diez y treinta días (Asís, 2006, p. 3); el monitoreo de aspectos técnicos como la proporción de agua y clasificación de basura, la falta de una cultura o programa nacional de aprovechamiento y separación de desechos, son debilidades para el aprovechamiento de biogás en el contexto guatemalteco (ARECA, 2009, p. 13).

Los desperdicios de alimentos representan el 21 % (INE, 2009) de todos los residuos sólidos de Guatemala. No existen datos en cuanto a proporción de restos vegetales/restos animales, sin embargo, el potencial es considerable y, tomando en cuenta las tendencias de alimentación en la actualidad y la canasta básica alimentaria (CBA), el desecho orgánico es el de mayor cantidad.

Las propuestas de solución van desde biodigestores domiciliarios hasta plantas municipales de generación de energía.

Existe la posibilidad del rechazo de nuevas tecnologías por parte de la sociedad guatemalteca, debido al costumbrismo y tradicionalismo remanentes, así como la falta de educación ambiental. La pereza de clasificar la basura puede ser una amenaza. El mal olor es otro factor que incomoda en el desarrollo de esta tecnología (Abbasi, 2012, p. 105).

En la actualidad guatemalteca no existe una legislación ni un proyecto nacional que involucre el aprovechamiento de los desechos sólidos orgánicos urbanos con fines energéticos. Hay proyectos independientes de la iniciativa privada que involucran la producción de biogás, pero no se ha estudiado la capacidad de producción energética de la FORSU a nivel del país.

3.3. 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 cuál es el potencial de los próximos 10 años a partir de las estimaciones y modelos matemáticos apropiados?

Auxiliares:

- ¿Qué potencia eléctrica se puede obtener a partir de la cantidad de biogás producida?

- ¿Cuánto volumen de biogás aprovechable se podría llegar a producir en los próximos 10 años en Guatemala?
- ¿Es posible hacer un modelo matemático que prediga la tendencia de producción de biogás a nivel nacional?
- ¿Cuánto volumen de biogás se podría obtener en un hogar en Guatemala?

3.4. Delimitación del problema

El problema del desaprovechamiento de los desechos sólidos orgánicos y, por consiguiente, del biogás es nacional. Para analizarlo, se tomarán en cuenta datos estadísticos del país, provenientes del órgano estatal que maneja de manera oficial esta información (INE).

Este estudio se limitará a la estimación del potencial de producción de biogás en los próximos 10 años. La información será enmarcada en los desechos sólidos del área urbana del país, al ir de la mano con datos oficiales.

Se calculará solamente una estimación, ya que es muy difícil obtener datos exactos sin un programa de separación de desechos sólidos en funcionamiento.

4. JUSTIFICACIÓN

Los desechos sólidos son un problema global y son considerados como un desperdicio sin utilidad que se acumula (Williams, 2005).

En la actualidad, se debe aprovechar esta materia con potencial energético, en especial la fracción de encontrar materia orgánica de rápida descomposición que produce biogás, el cual puede utilizarse para producir energía en los dispositivos conocidos como biodigestores (Carrillo, 2006, p. 28).

Asimismo, al haber alcanzado ya el pico del petróleo, se avecinan incrementos en el precio de los combustibles fósiles, amarrados a la escasez de los mismos; siendo imperativa la necesidad de encontrar fuentes alternativas de energía (Kumar, 2012, p. 151). Con el aprovechamiento del biogás proveniente de los desechos sólidos orgánicos se beneficiará a la población en general, principalmente en los aspectos económico, salud y medioambiental (Herrera, 2004, p. 11).

El presente informe pretende dar luces acerca de la cantidad de energía aprovechable que se desperdicia diariamente en Guatemala al no utilizar el biogás proveniente de la FORSU. De aprovecharse, se diversificaría la matriz energética nacional, dependiendo en menor medida de los combustibles fósiles.

Acorde a los lineamientos de la maestría en Energía y Ambiente, este estudio se encuentra en el eje de investigación de la gestión y políticas energéticas ambientales; insertado en la línea de investigación de economía,

política y planificación energética; dentro del tema de opciones de aprovechamiento de energías.

Debe recalcar que no es necesaria una inversión cuantiosa para llevar a cabo este trabajo de graduación.

5. OBJETIVOS

General:

Estimar el potencial de biogás proveniente de la fracción orgánica de los desechos sólidos urbanos en Guatemala en los próximos diez años, a partir de un modelo matemático basado en las estimaciones del INE sobre la generación nacional de desechos sólidos urbanos.

Específicos:

1. Calcular el volumen estimado de biogás que se puede obtener de la FORSU en Guatemala.
2. Cuantificar el potencial de generación de energía eléctrica a partir del volumen estimado de biogás.
3. Generar proyecciones matemáticas a 10 años, de la producción de volumen de biogás y de energía eléctrica a nivel nacional y por departamento.
4. Estimar el potencial mínimo de biogás en un hogar guatemalteco.

6. ALCANCES

El presente estudio genera información útil para la población guatemalteca, en forma de estimación, relacionada con la utilidad energética de la materia orgánica residual, la cual es concebida en la conciencia colectiva como solamente un desecho.

Desde la perspectiva teórica, el modelo generado mostrará la tendencia en el comportamiento de la producción potencial de biogás, dando un panorama de cantidad aprovechable que es de suma utilidad para el desarrollo de proyectos energéticos y de manejo de desechos sólidos urbanos.

A partir de los resultados obtenidos se puede beneficiar a la población del país, creando políticas públicas para producción de energía eléctrica, aprovechamiento del calor para cocinar o de los múltiples beneficios que involucra la separación de desechos orgánicos. De igual forma, abrirá una puerta para futuras investigaciones en el tema a nivel nacional, ya que es una temática no desarrollada y en proceso de crecimiento.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. 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**

Componente	Fórmula química	Desechos agrícolas	Desechos cloacales	Desechos industriales	Desechos sanitarios	Propiedades
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 %	Contaminante, 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, L. & Matos, A. (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).

7.2. 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).

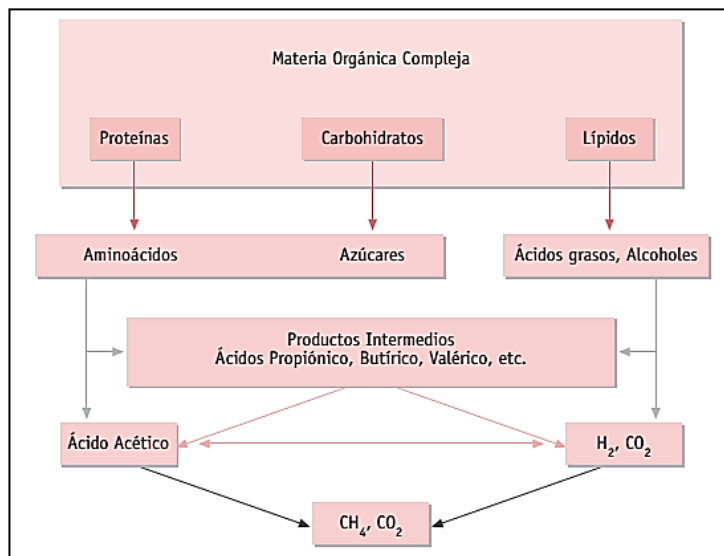
7.2.1. Etapas de la digestión anaeróbica

La hidrólisis descompone los polímeros y los lípidos en compuestos básicos como los monosacáridos y aminoácidos, la acidificación forma ácidos de composición simple y la metanización forma metano y dióxido de carbono, constituyentes principales del biogás, siendo el metano el componente de mayor interés en el tema energético (Gaspar & Matos, 2010).

- Hidrólisis: es un proceso extracelular en el cual sustancias orgánicas complejas y particuladas (celulosa, polisacáridos, proteínas, entre otros) se rompen en compuestos simples solubles (ácidos grasos, glicerol). Es una etapa muy importante para el proceso de fermentación, porque las

bacterias fermentativas no pueden absorber compuestos orgánicos complejos directamente dentro de sí mismas (Kumar, 2012, p. 154).

Figura 1. **Etapas de la fermentación anaeróbica**



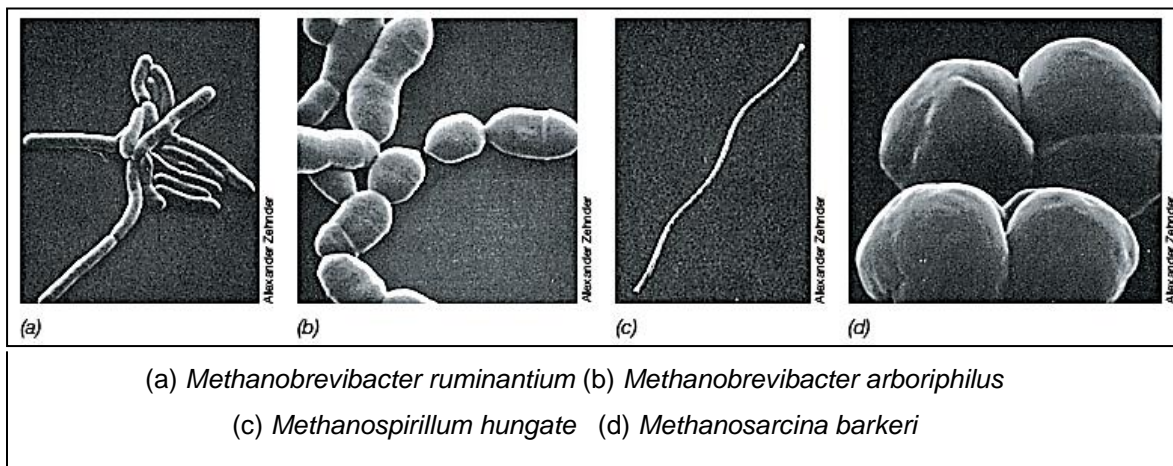
Fuente: Cuesta, M. (2011). *Situación actual de biogás y su aprovechamiento*. p. 156.

- Acidogénesis o etapa de fermentación: consiste en la degradación de los compuestos resultantes de la hidrólisis, por medio de la acción de bacterias acidogénicas y fermentativas. Lleva a la formación de una mezcla de alcoholes, hidrógeno, ácidos grasos volátiles, dióxido de carbono, entre otros (Pérez, 2006, p. 47).
- Acetogénesis: en esta etapa, las bacterias acetogénicas metabolizan los productos intermedios tales como el ácido propiónico y butírico. Dentro de los productos se encuentra el ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno, los cuales posteriormente pueden ser aprovechados por bacterias metanogénicas. La concentración de hidrógeno necesita

especial atención, ya que a elevada presión de hidrógeno, se reduce la formación de acetato, produciéndose ácido butírico, propiónico o etanol en lugar de metano (el compuesto de interés) (Cuesta, 2011, p. 21).

- Metanogénesis: las bacterias reductoras de CO_2 más importantes son las metanogénicas, un grupo de arqueobacterias anaeróbicas estrictas que emplean el H_2 como donante de electrones. Pertenecen al dominio *Archaea*, phylum *Euriarchaeota*. Seis órdenes filogenéticos han sido identificadas: *Methanosarcinales*, *Methanobacteriales*, *Methanomicrobiales*, *Metanococcales*, *Methanopyrales* y *Methanocellales* (Rosenzweig, 2011, p. 382).

Figura 2. **Micrográficas de escaneo de electrones de diversas especies de arqueobacterias metanogénicas**



Fuente: Madigan, M. (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).

Se identifican tres grupos, uno comprende a los substratos:



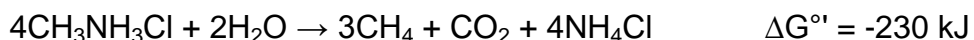
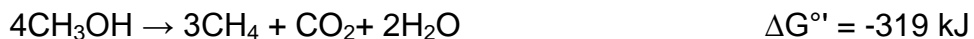
Los valores de energía libre se dan en condiciones de 25 °C, pH 7 y soluciones acuosas con actividad de 1. El metano se forma por la reducción de dióxido de carbono debida al hidrógeno proveniente de sustratos usados por la bacteria o por el cultivo mixto con bacterias sintróficas.

Otro sustrato es el acetato:



La transformación de acetato a metano es un proceso ecológico muy importante en biodigestores y en medios anóxicos de agua dulce, donde no hay una competencia grande por el acetato con otras bacterias (Carrillo, 2004, p. 20).

En substratos con grupo metilo, este se reduce a metano:



Algunas moléculas del sustrato trabajan como donantes de electrones y se oxidan a CO_2 , mientras que otras se reducen y son receptores. En el crecimiento de compuestos de metilo, el poder reductor también puede provenir del H_2 .



Algunas especies de metanógenos crecen sobre otros alcoholes y el piruvato también actúa algunas veces como donante de electrones para la reducción de CO_2 . La síntesis de ATP está relacionada con la fuerza impulsora de protones en el paso final de la reducción (la conversión de CH_3^- a CH_4) cuya energía es capturada por la ATPasa transportadora de protones de la membrana (Madigan, 2012, p. 565).

El CO_2 es la fuente principal de carbono cuando las bacterias crecen de forma autotrófica. El crecimiento de casi todos es estimulado por el acetato y en algunas especies por aminoácidos. Todas las bacterias metanogénicas utilizan NH^+ como fuente de nitrógeno, pero algunas especies fijan N_2 (*Methanosarcina*, *Methanococcus*). El níquel, componente de la coenzima metanogénica F_{430} , es requerido por todas estas bacterias y también se encuentra en las enzimas hidrogenasa y CO deshidrogenasa.

Estas arqueobacterias también necesitan hierro y cobalto para crecer. Los metanógenos tienen coenzimas exclusivas, unas portadoras de C_1 (metanofurano, metanopterina, coenzima M, F_{430}) y otras intervienen en reacciones de óxidoreducción como donantes de electrones (F_{420} y 7-mercapto heptanoil treonina fosfato o HS-HTP).

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

Grupo	Género	Morfología	Sustratos
I	<i>Methanobacterium</i>	Bacilos alargados	H ₂ + CO ₂ , HCOO ⁻
	<i>Methanobrevibacter</i>	Bacilos cortos	H ₂ + CO ₂ , HCOO ⁻
	<i>Methanosphaera</i>	Cocos	CH ₃ OH + H ₂
II	<i>Methanothermus</i>	Bacilos	H ₂ + CO ₂ (reduce S ⁰)
III	<i>Methanococcus</i>	Cocos irregulares	H ₂ + CO ₂ , HCOO ⁻ , piruvato + CO ₂
IV	<i>Methanomicrobium</i>	Bacilos cortos	H ₂ + CO ₂ , HCOO ⁻
	<i>Methanogenium</i>	Cocos irregulares	H ₂ + CO ₂ , HCOO ⁻
	<i>Methanospirillum</i>	Espirilos	H ₂ + CO ₂ , HCOO ⁻
	<i>Methanoplanus</i>	Placas	H ₂ + CO ₂ , HCOO ⁻
V	<i>Methanosarcina</i>	Cocos grandes y en paquetes	H ₂ + CO ₂ , CH ₃ OH, CH ₃ COO ⁻
	<i>Methanobolus</i>	Cocos irregulares	CH ₃ OH, metilaminas
	<i>Methanoculleus</i>	Cocos irregulares	H ₂ + CO ₂ , HCOO ⁻ , alcoholes
	<i>Methanohalobium</i>	Cocos irregulares	CH ₃ OH, metilaminas
	<i>Methanococcoides</i>	Cocos irregulares	CH ₃ OH, metilaminas
	<i>Methanohalophilus</i>	Cocos irregulares	CH ₃ OH, metilaminas, metilsulfuros
	<i>Methanotherix</i>	Cocos irregulares	CH ₃ COO ⁻
VI	<i>Methanopyrus</i>	Bacilos en cadenas	H ₂ + CO ₂ (crece a 110°C)
VII	<i>Methanocorpusculum</i>	Cocos irregulares	H ₂ + CO ₂ , HCOO ⁻ , alcohols

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

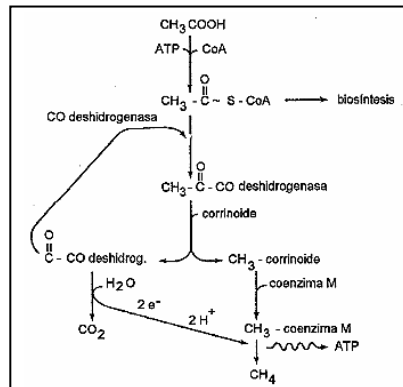
La reducción de CO₂ por lo general depende del H₂. El formiato, el CO y el Fe⁰ sirven como donantes de electrones. En el caso del Fe⁰, éste se oxida a Fe⁺⁺ y los electrones liberados se unen con protones para formar H₂, que es el donador inmediato en la metanogénesis. También, en unos pocos metanógenos, los alcoholes pueden aportar electrones. En la reducción, el metanofurano activa el CO₂ que posteriormente es llevado a formilo. Después, el grupo formilo se transfiere del metanofurano a la metanopterina reducida.

Luego, es deshidratado y reducido en dos etapas distintas a metileno y metilo. El grupo metilo se transfiere de la metanopterina a la coenzima M. La metilcoenzima M se reduce por la metil reductasa con la participación de F₄₃₀ y HS-HTP que actúa como donador de electrones. Los productos de la reacción

son: metano y CoM-S-S-HTP. La CoM y el HS-HTP se regeneran por reducción con H₂. En condiciones estándar, el cambio de energía libre durante la reducción de CO₂ a CH₄ con H₂ es -131 kJ/mol, pero debido a la acción de la concentración de los reactantes, baja a cerca de -30 kJ/mol. La concentración de hidrógeno en las zonas metanogénicas no es mayor a 10 μM (Carrillo, 2004, p. 26).

Las reacciones por vía del acetyl-CoA están relacionadas estrechamente con la producción de metano a partir de compuestos de acetato y metilo. Los compuestos de metilo (como el metanol) se catabolizan para dar corrinóide-CH₃. Este complejo dona el grupo metilo a la coenzima M (CoM) para dar CH₃-CoM, del cual se obtiene el CH₄ por reducción con electrones que provienen de la oxidación de otras moléculas de metanol a CO₂.

Figura 3. **Metanogénesis a partir del acetato**



Fuente: Carrillo, L. (2004). *Energía de biomasa*. p. 26.

El crecimiento de los metanógenos acetotróficos se da debido a la vía del acetyl-CoA que se usa directamente para la biosíntesis (y también es fuente de energía). El acetato activa a acetato-CoA que reacciona con la CO-

deshidrogenasa. Después, el grupo metilo del acetato se transfiere a la enzima corrinoide para dar un resultante CH_3 -corrinoide. El metilo es transferido a la metanopterin reducida y luego a la coenzima M para dar CH_3 -CoM. La reducción a metano ocurre con los electrones generados de la oxidación del CO a CO_2 por la CO-deshidrogenasa (Madigan, 2012, p. 565).

7.2.2. 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 cofermentar 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
Restos de matadero mezclados	7 – 10	2
Heces de pato	---	8
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
Cadillo	2,6	19
Alfalfa	2,4 – 3,0	16 – 20
Algas marinas	1,9	19
Paja cortada	1,1	48
Restos de lino	1,0	58
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, L. (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).

- 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.

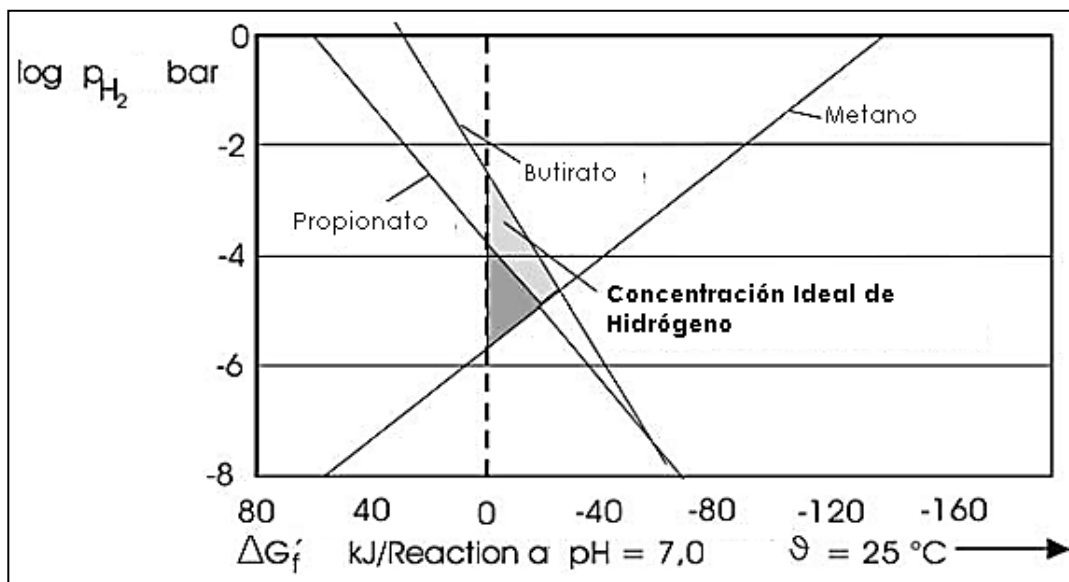
En los procesos anaeróbicos, las medidas utilizadas más comúnmente para describir la concentración de desechos es la demanda química de oxígeno (DQO) expresada en g O₂/Litro y el contenido de sólidos volátiles (SV) expresado en g SV/Litro. La DQO describe la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar 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.

Figura 4. **Influencia de la presión parcial de hidrógeno en la liberación de energía durante la acetogénesis y metanogénesis a partir de CO₂ y H**



Fuente: Deublein, D. (2008). *Biogas from waste and renewable resources*. p. 101.

La degradación de ácido propiónico puede ser tomada como medida de productividad, ya que esta descomposición es muchas veces el factor limitante para la fermentación anaeróbica en la práctica.

- 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 de 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, M. y otros. (2011). *Situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento*. p. 23.

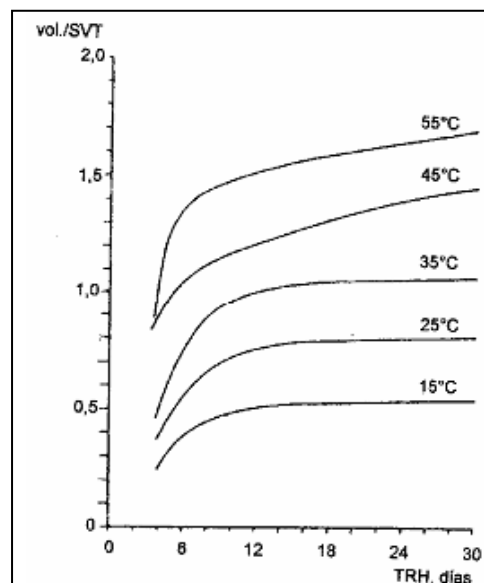
La temperatura tiene un efecto directo en las propiedades fisicoquímicas de todos los componentes dentro del biodigestor, además afecta la termodinámica y cinética de los procesos biológicos. La temperatura determina si una reacción específica es favorable (Kumar, 2012, p. 157).

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 5. **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).

- 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

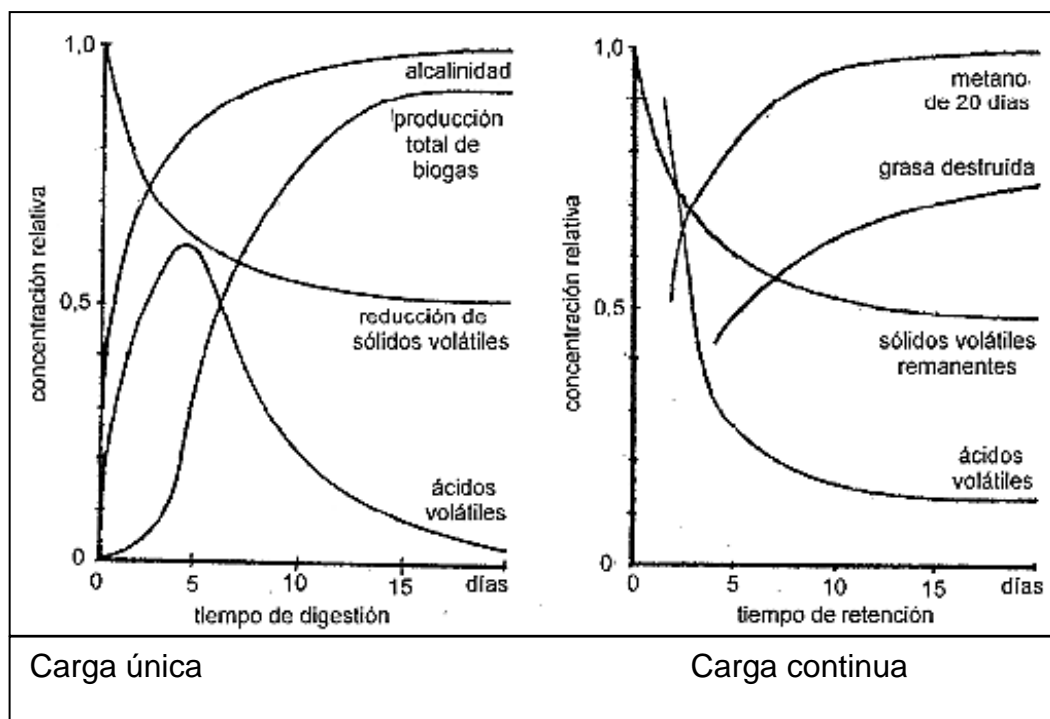
Nota: estos valores se dan con la finalidad de orientar, ya que las bacterias se pueden adaptar con el tiempo a condiciones más desfavorables.

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 sobredimentación 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.

Figura 6. **Variación de los distintos parámetros en función del tiempo para un digester de carga única o *batch* y otro de carga continua**

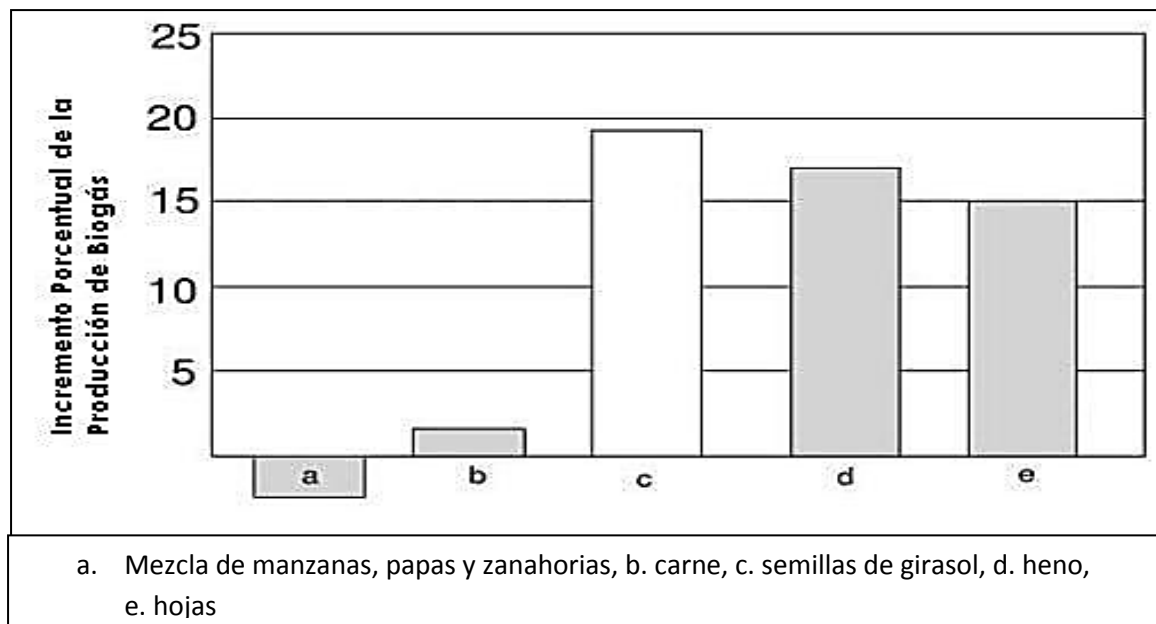


Fuente: Carrillo, L. (2004). *Energía de Biomasa*. p. 32.

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).

- 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 7. **Incremento de la producción de biogás por trituración**



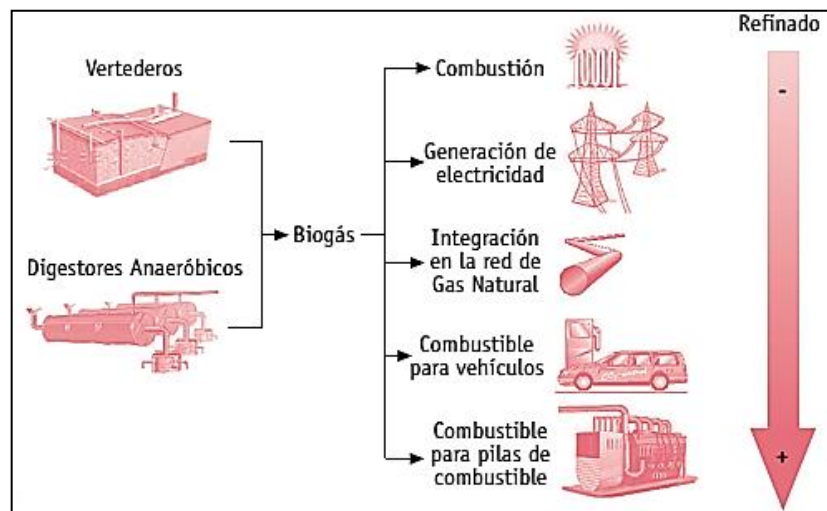
Fuente: Deublein, D. (2008). *Biogas from waste and renewable sources*. p. 104.

7.3. 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 8. Opciones para la utilización de biogás

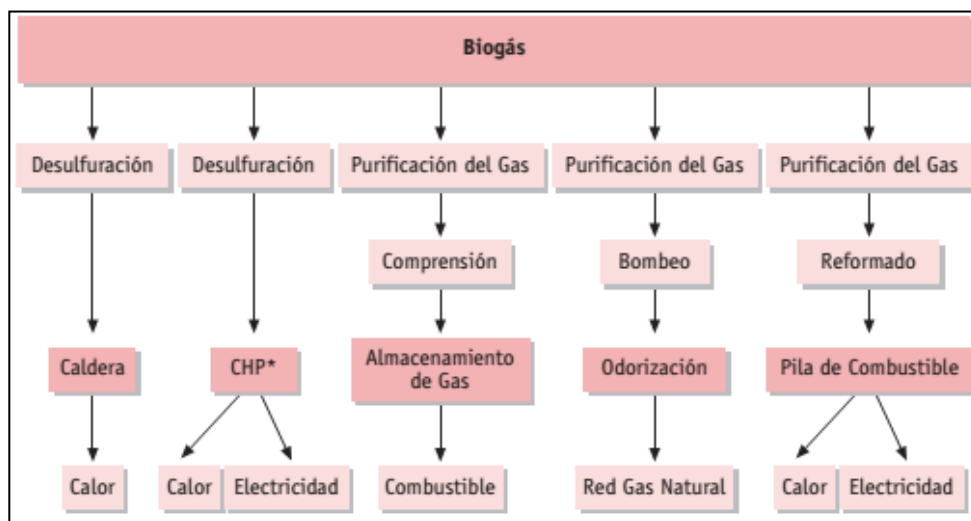


Fuente: Cuesta, M. y otros (2011). *Situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento*. p. 76.

En la actualidad, 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 CO₂, NH₃, SH₂, agua y partículas sólidas (Cuesta, 2011, p. 77).

Figura 9. 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.

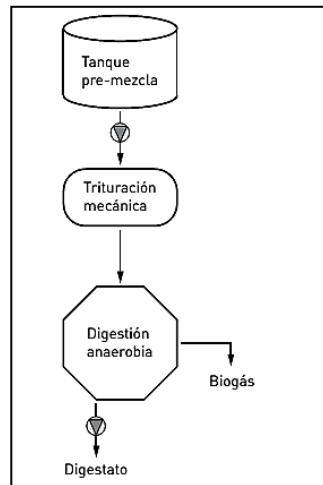
7.3.1. Tecnología para el aprovechamiento de biogás

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).

- Tecnología de pretratamiento: su objetivo es hacer los sustratos más biodegradables y, de esta manera, aumentar la producción de biogás y reducir el tiempo de residencia. Estos sistemas se clasifican en mecánicos, térmicos, químicos y biológicos (Pascual, 2011, p. 25).
 - Mecánicos: su objetivo es reducir el tamaño de las partículas y de esa manera lograr mayor biodegradabilidad de la materia orgánica. Entre estas tecnologías se incluyen la trituration, maceración y la homogenización a alta presión.

La trituration es el pretratamiento mecánico más utilizado en plantas agroindustriales. La mayor parte de equipos en el mercado tienen un mecanismo de corte con cuchillas rotatorias. Se recomienda llegar a un tamaño de partícula entre 10 y 15 cm, y entre 2 y 4 cm para materiales lignocelulósicos. La optimización de la producción de biogás puede oscilar entre 5 y 30 %.

Figura 10. Diagrama de flujo de pretratamiento por trituración

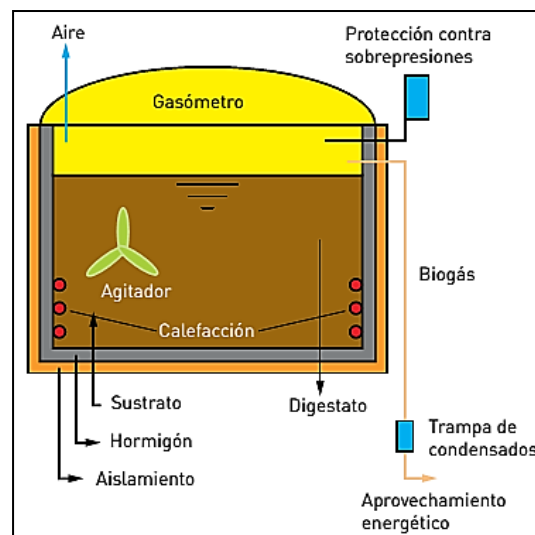


Fuente: Pascual, A. y otros. (2011). *Situación y potencial de generación de biogás. Estudio técnico per 2011-2020*. p. 28.

- Térmicos: tiene por objetivos de agilizar la degradación de algunas macromoléculas, aumentar la solubilidad de la materia orgánica e higienizar la misma para eliminar microorganismos patógenos. Esta tecnología incluye a los pasteurizadores y el uso de corrientes de vapor a presiones elevadas. Los residuos más apropiados son subproductos de origen animal.
 - Químicos: tiene por objetivos de romper las moléculas poco biodegradables mediante el uso de ácidos o bases fuertes, o tratamientos como la ozonización. También se pueden utilizar para ajustar el pH o para aumentar su capacidad tampón.
 - Biológicos: con la ayuda de estos se puede aumentar la biodegradabilidad mediante la inoculación con bacterias o enzimas.

- Biodigestores: existen de mezcla completa, de flujo pistón, de expansión continua, *plug* y de contacto, de una o dos etapas, así como los dependientes de la temperatura (mesofílicos o termofílicos).
- Biodigestores de mezcla completa (RMC): su principal característica es la concentración equilibrada en todos los puntos del volumen de fermentación. Esta mezcla uniforme de microorganismos y sustrato se logra por un sistema de agitación que puede ser de hélices o palas. Su capacidad máxima es de 2 500 m³ para mantener la temperatura y homogeneidad de la biomasa. La alimentación de sustrato puede ser continua, semicontinua o *batch*. Regularmente, la materia seca dentro del digestor no debe exceder el 10 % y la mezcla no debe superar el 20 % de ST. Es el tipo de biodigestor más utilizado en Europa.

Figura 11. **Diagrama de flujo de digestores de mezcla completa**

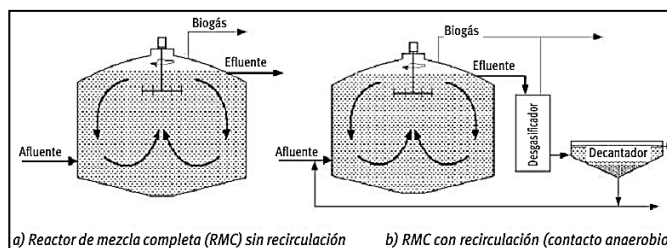


Fuente: Pascual, A. y otros. (2011). *Situación y potencial de generación de biogás. Estudio técnico per 2011-2020*. p. 30.

Existen dos versiones de RMC:

- Sin recirculación: consiste únicamente de un digestor con su correspondiente sistema de agitación y los sistemas de extracción del biogás y biol.
- Con recirculación: también llamado reactor anaerobio de contacto, es el equivalente a un sistema de lodos activados para el tratamiento de aguas residuales. Agrega un desgasificador y un decantador para el efluente del reactor, recirculando la biomasa decantada al interior del reactor principal; así se evita la necesidad de reinoculación en el tanque y se optimiza el aprovechamiento del biogás al no existir pérdidas en el efluente. Además, en este tipo de reactor, la producción de lodos es menor, mejorando el aprovechamiento del biogás. Debido a la necesidad de separar los microorganismos en el decantador, este sistema solo es aplicable a aguas residuales de alta carga orgánica (de ingenios azucareros, cerveceras, entre otros) (IDAE, 2007, p.25).

Figura 12. **Tipos de reactores de mezcla completa**

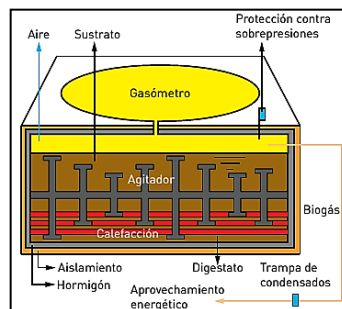


Fuente: IDEA. (2007). *Biomasa: digestores anaerobios*. p. 26.

Los RMC en general se utilizan para residuos líquidos muy concentrados, ya que la salida de los efluentes produce un lavado de la biomasa, y porque las condiciones de agitación influyen de manera negativa en el crecimiento de los microorganismos responsables de la reacción, cuya velocidad de multiplicación es baja (IDAE, 2007).

- Biodigestores flujo pistón: su principal distintivo es que en cada sección transversal del digestor, la concentración de toda sustancia varía. Son de forma cilíndrica o de paralelepípedo, construidos en acero u hormigón. Su capacidad es hasta de un máximo de 1 000 m³. La alimentación puede ser continua o semicontinua. Regularmente se construyen con agitación lenta por medio de mezcladores de palas, que adicionalmente favorecen la salida (diseños horizontales). También se construyen diseños verticales cuyo mezclado puede realizarse de forma mecánica (con palas) o hidráulica (inyección de biogás a presión en la base del biodigestor). Permite 20 – 40 % de sólidos totales. Su tiempo de retención es menor comparado con los de mezcla completa porque el rendimiento de biodegradación es mayor.

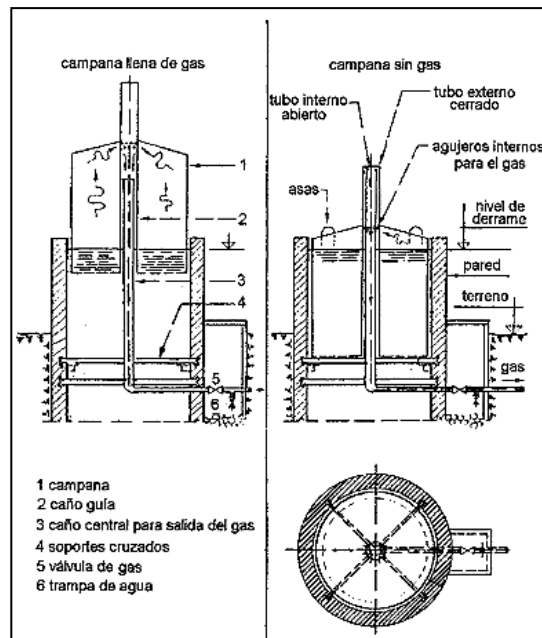
Figura 13. Diagrama de flujo de biodigestores de flujo pistón



Fuente: Pascual, A. y otros. (2011). *Situación y potencial de generación de biogás. Estudio técnico per 2011-2020*. p. 31.

- Biodigestor de cúpula móvil (modelo hindú): está compuesto por cuerpo cilíndrico, gasómetro, foso de alimentación y foso de salida. Se construyen con ladrillos de arcilla quemada y cemento. El domo cilíndrico está hecho de láminas de metal y se mueve hacia arriba o hacia abajo, ya sea que almacene o libere biogás.

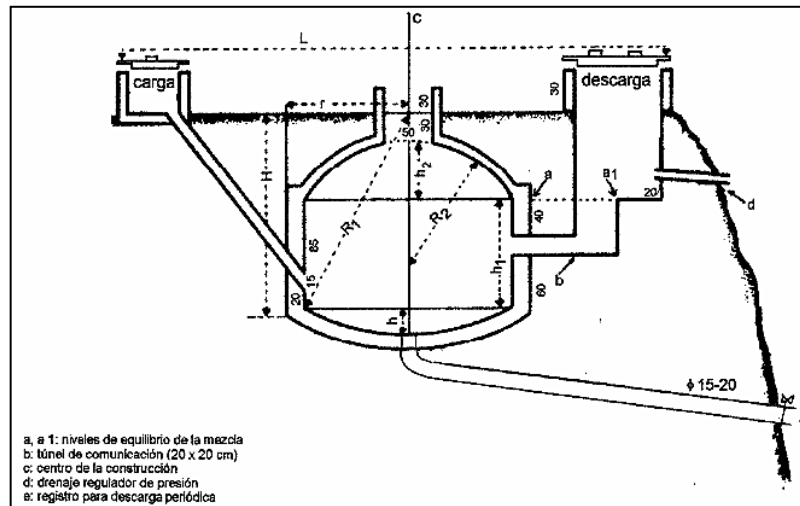
Figura 14. **Esquema del modelo de digestor de cúpula móvil**



Fuente: Carrillo, L. (2004). *Energía de biomasa*. p. 37.

- Biodigestor de cúpula fija (modelo chino): está compuesto de un cuerpo cilíndrico, dos domos esféricos, foso de alimentación, foso de descarga y apertura de inspección. El biogás se colecta en la cámara superior y el desecho se descompone en la cámara inferior.

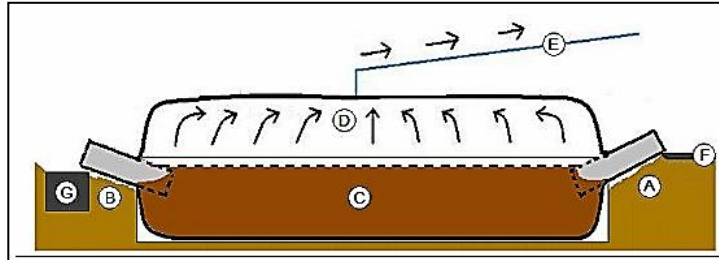
Figura 15. Esquema del modelo de digester de cúpula fija



Fuente: Carrillo, L. (2004). *Energía de biomasa*. p. 36.

- Sistemas flexibles o de polietileno: es una unidad tubular sellada fabricada con bolsas de polietileno que tiene una entrada de materia orgánica y una salida para el biol. En este tipo de biodigestor, la digestión y la recolección del gas se hacen en un solo aparato. Para que funcione de manera óptima debe ser hermético, debe tener acceso para mantenimiento, debe ser aislado térmicamente y debe tener una válvula de seguridad. Es similar a una sobrefunda de almohada con extremo abierto, que se convierte en un túnel invernadero. La bolsa plástica atrapa el calor, manteniendo la temperatura entre 25 y 36 °C. Mientras los microorganismos digieren el sustrato, se forman burbujas que inflan el digester, siendo el proceso ayudado por el calor del sol.

Figura 16. Perfil de biodigestor de polietileno



a) tubería de entrada, b) tubería de salida, c) tanque de digestión, d) cámara de colección de gas, e) tubería de salida de gas, f) recipiente de entrada para la carga, g) recipiente de recolección de biol.

Fuente: CEDECAP (2007). *Biodigestor de polietileno: construcción y diseño*. p. 56.

Tabla VI. Comparativa de los sistemas de domo fijo y flexibles

	Sistema de domo Fijo	Sistema flexible
Tiempo de instalación (días)	21	1
Tiempo de retención (días)	45	15
Temperatura (°C)	19	36
Durabilidad (años)	20+	10

Fuente: IFAD (2012). *Flexi biogas systems: inexpensive, renewable energy for developing countries*. p. 4.

7.3.2. Aprovechamiento de la FORSU para la producción de biogás

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). La digestión anaeróbica es la forma más limpia de tratarlos, ya que los

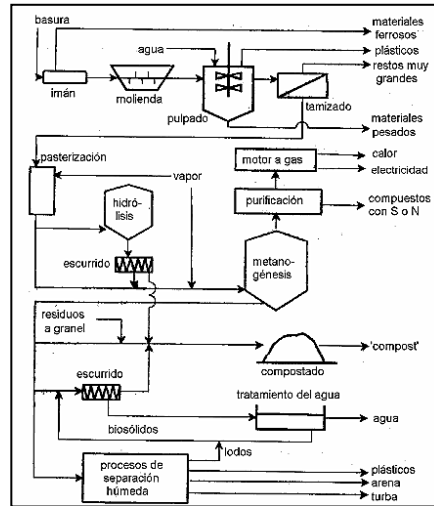
otros métodos practicados son la incineración y compostaje, que son consumidores netos de energía o dañinos al medio ambiente.

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 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).

Figura 17. Esquema global del procesamiento de la basura urbana



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

Tabla VII. 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.

La FORSU puede ser aprovechada para la producción de biogás en vertederos controlados o rellenos sanitarios. En este caso, los desechos sólidos se descargan, se extienden y compactan para evitar bolsas de aire en su interior, cubriéndose después con tierra u otros materiales adecuados, formando de esta manera capas regulares y sucesivas de espesores variables. (Pérez, 2006, p.60).

7.3.3. Generación de energía eléctrica

Generalmente, cuando se produce energía eléctrica también se produce calor en paralelo. A estos generadores se les llama plantas de cogeneración. Pueden funcionar 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.

El biogás también se puede quemar y utilizarlo para producir vapor que hace funcionar a un motor. Asimismo, existen estaciones de potencia a base de vapor y gas. La corriente eléctrica y calor producidos pueden suministrar al mismo biodigestor y edificaciones aledañas. La potencia eléctrica se puede suministrar a la red pública (Deublein, 2008, p. 361).

Los generadores están disponibles en el mercado tanto a nivel planta piloto como a escala industrial. Pueden ser sincrónicos o asincrónicos, siendo los primeros los más utilizados.

Tabla VIII. Valores para generadores de potencia

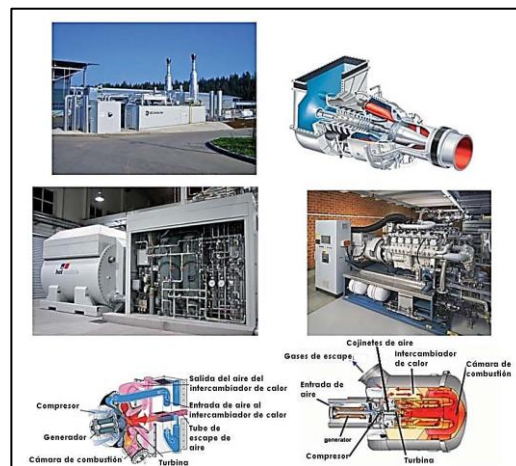
Característica	Motor gasolina	Motor diésel	Motor Stirling	Celda	Turbina gas	Microturbina gas
Capacidad (kW)	< 100	> 150	< 150	1-10000	---	30 – 110
Inversión (US\$/ kW)	1200	1300	1600	Muy alto	1 200	600 – 900
Costo mantenimiento	Alto	Bajo	Muy alto	Muy alto	Muy bajo	Muy bajo
Eficiencia eléctrica (%)	30-40	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 a biogás	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). Previo a su utilización, se debe limpiar de impurezas que puedan afectar el mantenimiento y rendimiento. 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).

Figura 18. **Generadores**

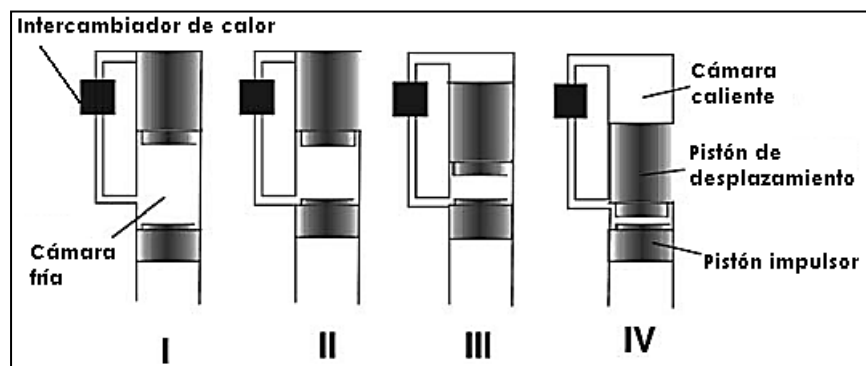


Cogeneración (1ª fila izquierda), turbina de gas (1ª fila derecha), celda de combustible Siemens SGT-100 (2ª fila izquierda), motor diésel (2ª fila derecha), microturbina Turbec 100 (3ª fila izquierda) y microturbina Capstone (3ª fila derecha).

Fuente: Deublein, D. (2008). *Biogas from waste and renewable sources*. p. 362.

- 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 19. **Principio de funcionamiento de motor Stirling**



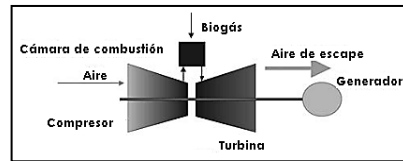
I) El gas impulsor se encuentra sin compresión en la cámara fría; II) el pistón impulsor se mueve hacia arriba, el gas impulsor se comprime y se fuerza hacia la cámara caliente mientras es calentado en un intercambiador de calor externo; III) el gas impulsor calentado presiona el pistón de desplazamiento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

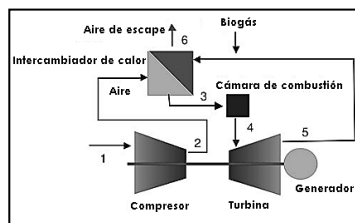
Figura 20. **Proceso de electricidad con biogás por medio de una turbina**



Fuente: Deublein, D. (2008). *Biogas 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.

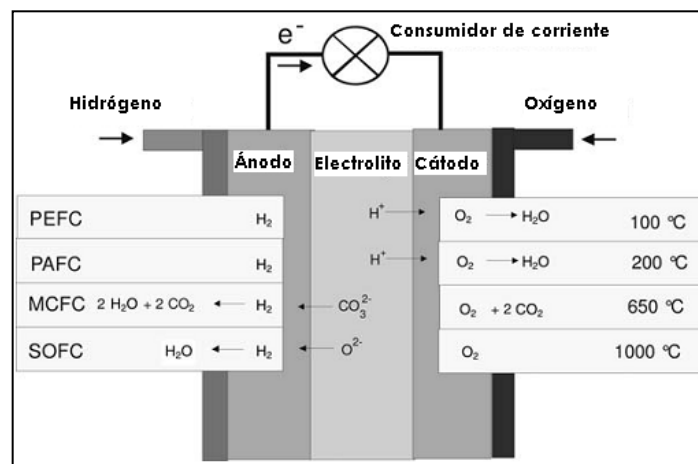
Figura 21. **Esquema de microturbina de gas**



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. En la actualidad, solamente existen pocas plantas piloto en operación que generan electricidad a partir de biogás con esta tecnología.

Figura 22. 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.

7.4. Contexto del aprovechamiento energético del biogás

La composición del substrato condiciona la proporción de las diferentes poblaciones bacterianas. El correcto funcionamiento del proceso anaerobio implica el mantenimiento del equilibrio entre las diferentes fases. Las bacterias acidogénicas son las que mayores velocidades de crecimiento presentan, siendo del orden de 5 veces superiores a las metanogénicas (Henze et al 1995).

7.4.1. **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 (k) y el potencial de generación de metano (Stege, 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.


7.4.2. **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

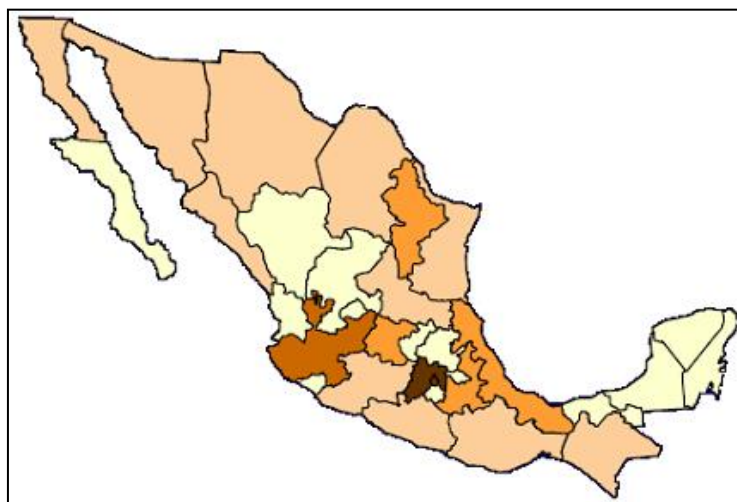
energía eléctrica. El aprovechamiento térmico tiene una capacidad de generación entre 1 597 y 1 994 MW.

Tabla IX. **Potencial de aprovechamiento de biogás proveniente de rellenos sanitarios (México)**

	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 23. **Potencial de aprovechamiento de biogás proveniente de rellenos sanitarios**



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

7.4.3. Estados Unidos

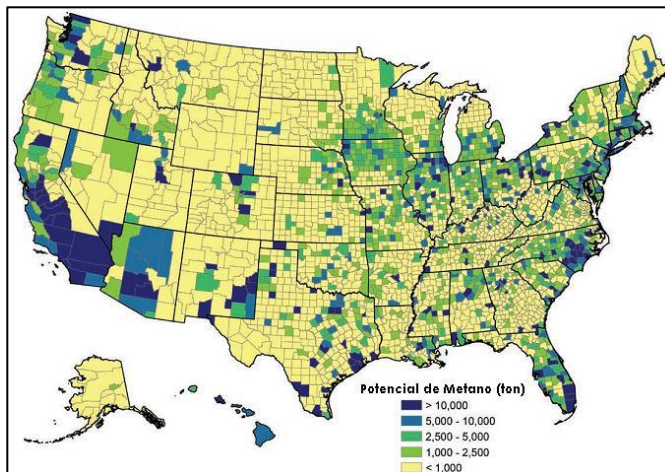
El metano potencial que se puede producir a partir de material de relleno sanitario, estiércol animal, aguas residuales y desechos orgánicos se calcula en alrededor de 7,9 millones de toneladas por año, lo que equivale a aproximadamente 420 billones de pies cúbicos (NREL, 2013, p.1).

Tabla X. **Potencial de aprovechamiento de biogás proveniente de rellenos sanitarios (EE. UU.)**

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

Nota: NREL. (2013). *Biogas potential in the United States* p. 1.

Figura 24. **Potencial de metano a partir de fuentes de biogás seleccionadas en EE. UU.**

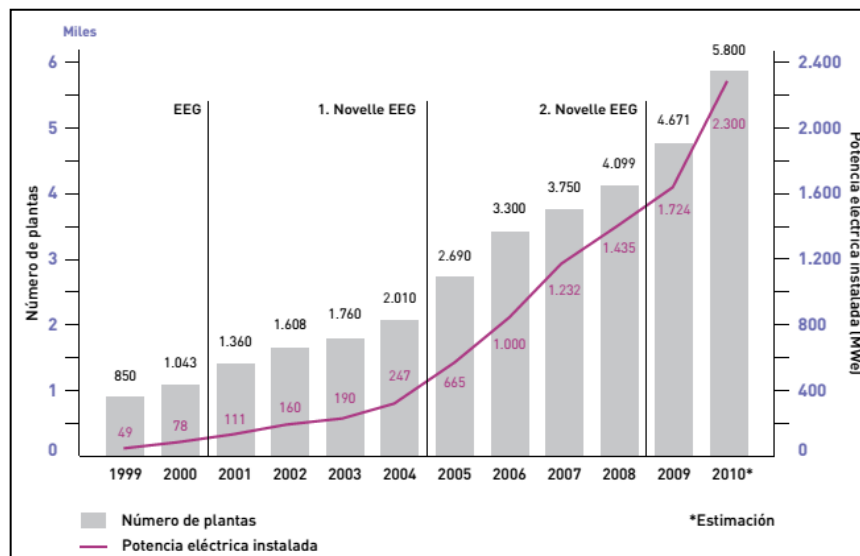


Fuente: NREL. (2013). *Biogas potential in the United States*. p. 88.

7.4.4. 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 25. **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 trenes que funcionan 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).

Tabla XI. **Compañías de metanización representativas en Europa**

Empresa	País	Capacidad eléctrica instalada en 2011 (en MWe)	Empleados en 2011	Volumen de Negocios (en M€)
MT-Energy	Alemania	142	500	198
EnviTec Biogas AG	Alemania	331	470	244
Biogas Nord AG	Alemania	131	180	78,9
Schmack Biogas	Alemania	165	454	n.a.
UTS Biogastechnik	Alemania	350	125	n.a.
BTS Italia	Italia	80	87	10,5
Agri.capital	Luxemburgo	69	n.a.	n.a.
Sebigas	Italia	53	20	n.a.
Malmberg Water	Suecia	100	145	47
Xergi	Dinamarca	43	n.a.	n.a.

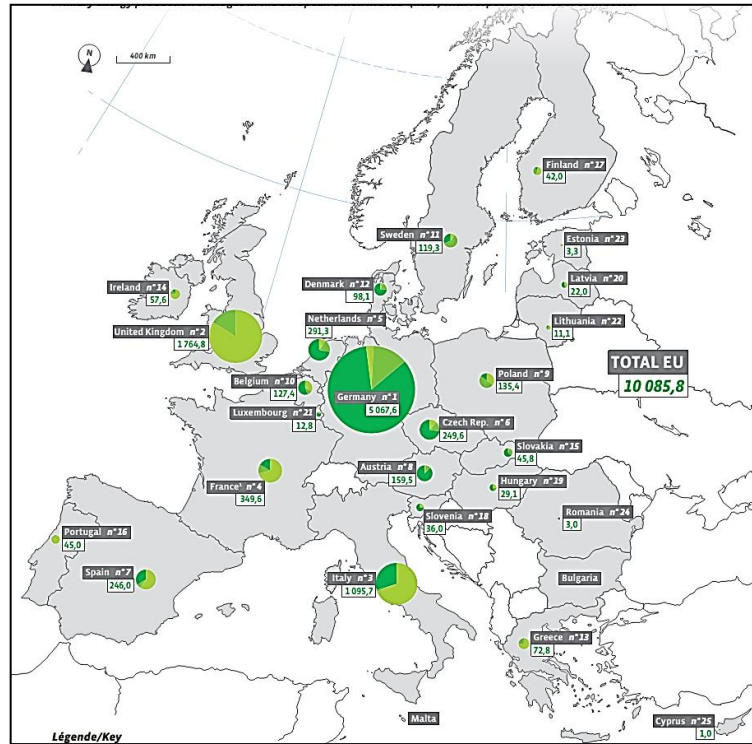
Fuente: EurObserv'ER. (2012). *Biogas barometer*. p. 5.

Tabla XII. **Producción de biogás en la Unión Europea en 2011 (en kTEP)**

País	Gas de Vertedero	Gas de lodos de aguas residuales	Otros tipos de biogás	Total
Alemania	149	504,2	4 414,2	5 067,6
Reino Unido	1 482,4	282,4	0	1 764,8
Italia	755,6	16,2	323,9	1 095,7
Francia	249,7	41,9	58	349,6
Holanda	31,5	51,5	208,3	291,3
República Checa	31,8	38,8	179,9	249,6
España	148,1	15,3	82,6	246
Austria	4,3	16,4	138,8	159,5
Polonia	47,5	67,8	20,1	135,4
Bélgica	41,9	14,6	70,9	127,4
Suecia	12,4	68,9	37,9	119,3
Dinamarca	5,2	19,6	73,2	98,1
Grecia	55,4	16,1	1,4	72,8
Irlanda	43,8	8,2	5,6	57,6
Eslovaquia	3	13,6	29,3	45,8
Portugal	42,3	1,8	0,9	45
Finlandia	23,9	13,4	4,8	42,1
Eslovenia	7,1	2,7	26,2	36
Hungría	7,3	6,4	15,5	29,2
Latvia	7,8	2,4	11,8	22
Luxemburgo	0,1	1,4	11,3	12,8
Lituania	5,9	3,1	2,1	11,1
Estonia	2,2	1,1	0	3,3
Romania	0	0	3	3
Chipre	0	0	1	1

Fuente: EurObserv'ER. (2012). *Biogas barometer*. p. 3.

Figura 26. Producción de biogás en la UE en 2011 (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. (2012). *Biogas barometer*. p. 3.

7.4.5. 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.

7.4.6. **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.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS

ORIENTADORAS

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Biogás

1.2. Biometanización por digestión anaeróbica

1.2.1. Etapas de la digestión anaeróbica

1.2.2. Parámetros del proceso

1.3. Aplicaciones del biogás

1.3.1. Tecnología para el aprovechamiento de biogás

1.3.2. Aprovechamiento de la FORSU para la producción de biogás

1.3.3. Generación de energía eléctrica

1.4. Contexto del aprovechamiento energético del biogás

1.4.1. Centroamérica

1.4.2. México

1.4.3. Estados Unidos

1.4.4. Europa

1.4.5. India

1.4.6. China

2. METODOLOGÍA

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

9.1. Tipo de estudio

Este trabajo está compuesto por tres partes:

- La primera es una investigación descriptiva, porque es una recopilación de información relacionada con el tema central y la descripción del sistema.
- La segunda es de cálculo de potenciales energéticos a partir de la FORSU.
- La tercera es de generación de proyecciones matemáticas a 10 años del potencial energético.

9.2. Variables e indicadores

Las variables a trabajar serán:

- Cantidad de biomasa: este parámetro se medirá a partir de información estadística histórica relacionada a la producción de la FORSU. Asimismo, se determinarán cantidades domiciliarias mínimas teóricas basadas en la canasta básica alimentaria.

Esta información se encuentra disponible para descarga gratuita en la página web del INE (www.ine.gob.gt) y se puede consultar en el anexo III. Se tomarán

en cuenta datos desde el año 2001 con fines de proyecciones matemáticas a diez años.

- Volumen de biogás: este dato se podrá determinar a partir de la masa de la FORSU y relacionándola con el dato teórico de producción de biogás por cada tonelada de residuos orgánicos.

Tabla XIII. **Parámetros de generación de energía eléctrica para la digestión anaerobia**

Generación de biogás (m ³ /t)	120
Poder calorífico del biogás (kcal/m ³)	5 000
Rendimiento (motores)	38 %
Rendimiento (producción kWh/t materia orgánica en base seca)	55 %
Horas operativas anuales	7 200

Fuente: Grau, Almengol & Oriol Farré (2011). *Situación y potencial de valorización energética directa de residuos*. Estudio Técnico per 2011 – 2020. p. 82.

Asimismo, para determinar el potencial domiciliar mínimo en Guatemala, se utilizará como base la canasta básica alimentaria y el potencial de producción de biogás y metano de los residuos orgánicos que se generan. Estos datos se encuentran en los anexos II y III.

Tabla XIV. **Biogás potencial a partir de varias formas de desecho sólido biodegradable a 35°C**

Desecho Sólido Biodegradable	Biogás Obtenido de Digestión por Lotes (L/kg, peso seco)	Metano en Biogás (%)
Banano (fruta y tallo)	940	53
Papa	880	54
Maíz	350–500	50
FORSU	380	48

Fuente: Abbasi, Tasneem. (2012). *Biogas energy*. p. 106.

- **Potencia energética:** a partir del volumen de biogás calculado se puede obtener el potencial de energía eléctrica que se podría producir. Para ello se tomarán tres casos, los cuales pueden ser consultados en el anexo IV:
 - El consumo de biogás de un motor generador Grupo Electrónico Gas Palmero PPG-900.
 - El consumo de combustible de una microturbina Turbec T00, la cual es la tecnología óptima en la actualidad.
 - Dato teórico de producción de potencia eléctrica que proveen Grau y Farré (Tabla 13).

9.3. Fases

A continuación se presentan las fases de recolección de datos e investigación documental.

9.3.1. Fase 1: recolección de datos e investigación documental

En esta fase se recopila toda la información importante relacionada con biogás y su respectivo uso a nivel mundial, incluyendo los factores relacionados al contexto guatemalteco.

Se obtendrán datos de carácter cualitativo y cuantitativo que se encuentren disponibles en Guatemala. De igual manera, se harán comparaciones entre distintas fuentes bibliográficas, con el fin de obtener datos confiables.

Los datos de cantidad de masa de la FORSU en Guatemala ha sido calculada por el INE (anexo I).

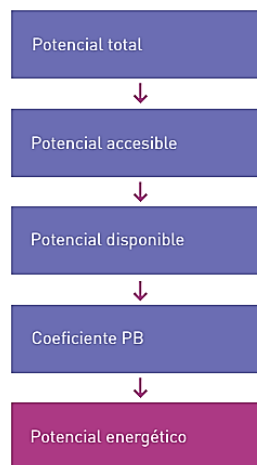
9.3.2. Fase 2: análisis de datos

Luego de recabar la información necesaria, se procederá a determinar el volumen potencial de biogás que se puede obtener de la FORSU en cada urbe de Guatemala, clasificadas por departamento.

Para valorar el potencial de biogás, se empezará por determinar el dato de potencial total; el cual corresponde a toda la FORSU que se genera. Luego, se calculará el potencial accesible, el cual se define como la cantidad de desechos que es posible recolectar. Seguidamente, se estimará 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.

Habiendo obtenido los datos de potenciales, se procederá a calcular el potencial energético previsto por medio de datos bibliográficos. Se han elegido tres estimaciones, dos de ellas con generadores existentes en el mercado actual y otra con datos proporcionados por la IDAE de España.

Figura 27. **Diagrama de flujo de metodología para determinar el potencial de biogás**



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

Se elaborarán tablas y gráficas que indiquen los valores de volumen de biogás y potencial energético para una interpretación práctica y objetiva de los datos investigados, cada uno de ellos por departamento.

Finalmente, se obtendrán correlaciones matemáticas a 10 años con los datos oficiales a disposición desde el año 2006 (INE), disponibles en el anexo I.

Las herramientas que se utilizarán para el desarrollo del presente trabajo son:

- Computador
- Internet
- Software de manejo de datos estadísticos (Microsoft Excel)
- Procesador de palabras (Microsoft Word)
- Software de lectura de archivos PDF (Foxit Reader)
- Software de métodos estadísticos de análisis (IBM SPSS Statistics)

9.4. Resultados esperados

Se espera establecer una base de datos confiable, que representará la capacidad de producción de biogás en Guatemala a partir de los residuos sólidos orgánicos urbanos.

Como resultado, se obtendrá el volumen de biogás y su potencial energético, los cuales se obtienen a partir de la masa de la FORSU en las distintas regiones del país; por lo que se generarán datos tanto a nivel nacional como por departamento.

Basado en datos históricos recopilados por el INE, se desarrollará un modelo matemático que permitirá estimar el potencial de generación energética a partir de biogás en Guatemala a diez años, siguiendo la tendencia en aumento que ha manifestado en relación directa con el crecimiento demográfico.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Los resultados serán obtenidos por medio de la metodología estandarizada que 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.

No será necesario hacer pruebas experimentales, porque la información sobre la cual se basa este trabajo de graduación ya se encuentra disponible en las fuentes bibliográficas.

La producción de FORSU en la República de Guatemala se estima en, aproximadamente, el 21 % de los residuos domiciliarios producidos a nivel nacional. Para determinar el potencial energético de biogás, se partirá de los siguientes datos:

Tabla XV. **Producción de FORSU, por año, en Guatemala (2001-2009)**

Año	Producción de FORSU (Ton)
2001	277,413
2002	283,511
2003	290,444
2004	297,518
2005	303,431
2006	312,054
2009	361,815

Fuente: elaboración propia.

A partir de la masa de la FORSU se calcula el volumen de biogás a producirse y luego se traza la curva con los datos existentes por año. Al tener la gráfica, se determinará el comportamiento de la misma por medio del coeficiente de correlación y se elegirá el modelo matemático con mayor bondad de ajuste.

Para el análisis estadístico, se empleará el software IBM SPSS Statistics, el cual provee todos los detalles que determinarán la confiabilidad de los datos y darán luces sobre la tendencia en la generación de desechos sólidos y su relación con la producción de biogás.

11. CRONOGRAMA

Las actividades detalladas en la siguiente tabla se desarrollarán durante 4 meses a partir del inicio de la investigación.

Figura 28. Cronograma

ID	Nombre de la tarea	Inicio	Final	Duración	2014				2015		
					Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3
1	Fase 1. Recolección de Datos e Investigación Documental	03/02/2014	16/02/2015	54,2w							
2	Fase 2. Análisis de Datos	23/02/2015	12/06/2015	16w							

ID	Nombre de la tarea	Inicio	Finalización	Duración	2014				2015		
					Q1	Q2	Q3	Q4	Q1		
1	Recopilación de datos	03/02/2014	02/06/2014	86d							
2	Orden y selección de información	02/06/2014	31/07/2014	44d							
3	Establecer datos a utilizar	03/07/2014	16/02/2015	163d							

ID	Nombre de la tarea	Inicio	Finalización	Duración	2015	
					Q1	Q2
1	Planteamiento de modelos matemáticos	23/02/2015	20/03/2015	20d		
2	Integración de datos en modelos	20/03/2015	17/04/2015	21d		
3	Análisis estadístico	20/04/2015	08/05/2015	15d		
4	Informe final	12/05/2015	12/06/2015	24d		

Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Ya que en su mayoría los recursos informáticos utilizados son de dominio público y gratuito, el estudio es factible y comprobable.

Se debe considerar el tiempo invertido que se traduce en aproximadamente 12 meses de trabajo.

Tabla XVI. **Recursos necesarios para la investigación**

Recurso	Costo
Recurso humano	
Asesor	Q 2 500,00
Estudiante	Q 0,00
Materiales, equipo e insumos	
Energía eléctrica	Q 300,00
Internet	Q 600,00
Computadora	Q 0,00
Impresora	Q 0,00
Tinta para impresora	Q 300,00
Hojas de papel bond	Q 100,00
IBM SPSS Statistics	Q 4 635,00 (US\$ 618,00)
<i>Total</i>	<i>Q 8 435,00</i>

Fuente: elaboración propia.

13. BIBLIOGRAFÍA

1. Abbasi, T. Tauseef, S. & S.A. Abbasi, s. (2012). *Biogas energy*. EE. UU.: Springer.
2. Asís, H. Dopazo, F. & Gianoglio, p. (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. Centro de Demostración y Capacitación de Tecnologías Apropriadas (2007). *Biodigestor de polietileno: construcción y diseño*. Perú: CEDECAP.
6. Chamy, R. & Vivanco, F. (2007). *Potencial de biogás*. Chile: Proyecto Energías Renovables No Convencionales en Chile.
7. Cuesta, M. Martín, F. Crespo, G y Villar, (2011). *Situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento*. Informe de Vigilancia Tecnológica Madrid No. 17. Madrid: Fundación Madri+d para el Conocimiento.

8. Dávila, José (2009). *Energía limpia a través del uso de biodigestores y su importancia*. Redfia, No. 9, 5 – 6.
9. Deublein, D. & Steinheuser, A. (2008). *Biogas from waste and renewable sources*. Alemania: WILEY-VCH.
10. EurObserv'ER (2012). *Biogas barometer*. Francia: systèmes solaires, le journal des énergies renouvelables No. 212.
11. Gaspar, L. & Matos, A. (2010). *Producción de biogás por digestión anaeróbica de residuos vegetales*. Perú: Universidad Peruana Unión.
12. Grau, A. & Farré, O. (2011). *Situación y potencial de valorización energética directa de residuos. Estudio técnico per 2011 – 2020*. España: IDAE.
13. Gunaseelan, V. (2004). *Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks*. Biomass & Bioenergy Vol. 26. India: Elsevier.
14. 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.
15. Herrera, R. (2004). *Cómo y por qué separar la basura*. (2ª Ed.). México: Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.
16. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (2012). *Perfil ambiental de Guatemala 2010-2012: vulnerabilidad local y creciente construcción de riesgo*. Guatemala: URL.

17. Instituto Nacional de Estadística (2013). *Canasta básica estructurada*. <http://www.ine.gob.gt/np/CBA/>
18. Instituto Nacional de Estadística (2010). *Compendio estadístico ambiental 2010*. Guatemala: INE.
19. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2007). *Biomasa: digestores anaerobios*. España: IDAE.
20. International Fund for Agricultural Development (2012). *Flexi biogas systems*. Italia: IFAD.
21. Klass, D. (1998). *Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals*. EEUU: Academic Press.
22. Kumar, S. (2012). *Biogas*. Croacia: InTech.
23. Larrañaga, M. (2012). *Oferta y demanda de leña en la República de Guatemala*. Guatemala: FAO.
24. Madigan, M., Martinko, J., Stahl, & D. Clark D. (2012). *Brock biology of microorganisms*. EEUU: Pearson Education Inc.
25. Martínez, C. Oechsner H., Brulé, M. & Marañón, E. (2014). *Estudio de algunas propiedades fisico-mecánicas y químicas de residuos orgánicos a utilizar en la producción de biogás en Cuba*. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias Vol. 23. Cuba: UCLV.
26. National Renewable Energy Laboratory (2013). *Biogas potential in the United States*. EEUU: NREL.

27. Pascual, A. Ruiz, B. Gómez, P. Flotats, X. & Fernández, (2011). *Situación y potencial de generación de biogas. Estudio Técnico per 2011 – 2020*. Madrid: IDAE.
28. Pérez, M. (2006). *Producción de energía eléctrica a partir de biogás procedente de vertederos de residuos sólidos urbanos*. Guatemala: USAC.
29. Petersson, A. Thomsen, M., Haugaard-Nielsen, H., & Thomsen, A. (2007). *Potential bioethanol and biogas production using lignocellulosic biomass from winter rye, Oilseed Rape and Faba Bean*. Biomass & Bioenergy Vol. 31. Dinamarca: Elsevier.
30. 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.
31. Quiñonez, M. y Sánchez, L. (2014). *Experiencia finca El Cascajal*. El Cafetal, No.38, 6-8.
32. Reay, D. Smith, P. & van Amstel, A. (2010). *Methane and climate change*. Reino Unido: Earthscan.
33. Rosenzweig, A. & Ragsdale, S. (2011). *Methods in methane metabolism, Part A: methanogens*. Methods of Enzymology Vol. 494. EEUU: Elsevier.

34. Secretaría de Energía (2012). *Prospectiva de energías renovables 2012 – 2026*. México: SENER.
35. 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*. EEUU: SCS Engineers.
36. Stege, A. & Murray, D. (2007). *Manual de usuario modelo centroamericano de biogás*. Versión 1.0. EEUU: LMOP.
37. Van Nes, W. (2006). *Asia hits the gas*. Renewable Energy World Magazine Vol. 9 No. 1. EEUU: PennWell Co.
38. Williams, P. (2005). *Waste treatment and disposal*. Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd.

ANEXOS

ANEXO I

Datos estadísticos de producción de desechos sólidos en Guatemala

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 1. 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.

Tabla 2. **Guatemala: estimación de la composición de la basura domiciliar por departamento, por tipo de desecho, en 2009 (toneladas)**

DEPARTAMENTO	PAPEL Y CARTÓN	TRAPOS	MADERA Y FOLLAJE	RESTOS ALIMENTOS	CAUCHO, CUERO, PLÁSTICOS	METALES	VIDRIOS	SUELO Y OTROS
República	294.957	83.843	336.683	361.815	221.745	79.267	76.088	291.661
Guatemala	59.322	6.582	144.414	65.369	35.131	35.256	18.239	80.928
El Progreso	2.903	523	6.832	1.968	1.632	1.458	598	3.106
Sacatepéquez	1.975	652	4.471	3.522	1.915	1.790	1.701	2.803
Chimaltenango	9.462	2.917	12.028	20.906	11.056	2.545	2.436	18.954
Escuintla	14.309	5.049	11.421	22.094	17.869	5.560	4.080	12.626
Santa Rosa	6.391	2.255	5.101	9.867	7.981	2.483	1.822	5.639
Sololá	15.891	4.278	552	1.643	3.675	1.143	3.117	16.228
Totonicapán	20.443	5.348	719	4.172	4.934	1.841	4.191	20.442
Quetzaltenango	24.899	8.300	1.186	3.557	6.403	1.423	5.691	33.910
Suchitepéquez	8.366	684	14.786	27.084	8.314	57	240	8.778
Retalhuleu	3.713	-	9.948	16.248	4.638	11	89	5.687
San Marcos	17.258	6.992	35.786	31.610	15.589	5.768	3.161	18.760
Huehuetenango	14.542	7.571	7.766	31.264	17.880	2.486	2.927	10.642
Quiché	21.384	5.322	3.930	44.799	24.830	2.956	3.481	7.092
Baja Verapaz	6.734	1.730	7.996	3.414	5.284	1.309	1.543	1.169
Alta Verapaz	27.244	7.007	32.517	13.869	21.489	5.243	6.249	4.758
Petén	6.799	3.058	6.885	3.632	5.584	2.363	3.088	832
Izabal	10.678	628	11.934	12.562	10.050	1.256	628	2.512
Zacapa	6.708	114	9.833	7.257	3.994	804	621	595
Chiquimula	6.192	12.361	891	6.504	1.560	2.151	8.758	10.852
Jalapa	4.329	1.053	3.236	13.075	5.075	589	1.494	9.698
Jutiapa	5.416	1.419	4.451	17.400	6.863	775	1.934	15.649

Fuente: INE. (2010). *Compendio estadístico ambiental 2010*. p. 107.

Tabla 3. **Guatemala: generación de residuos y desechos sólidos por sectores de la economía 2001 – 2006 (toneladas)**

Actividad	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Agricultura	17,504,222	17,968,016	18,141,819	18,969,089	19,452,734	19,075,981
Biodiversidad	744,554	764,064	1,346,789	703,894	856,564	766,366
Minería	20,938	24,877	27,247	26,434	20,696	19,466
Industria	62,233,185	71,742,841	65,054,607	89,214,621	79,187,994	92,446,900
Servicios	40,710	40,124	39,297	38,674	38,361	37,860
Hogares	1,321,016	1,350,053	1,383,067	1,416,754	1,444,909	1,485,973
Importaciones	1,921	1,549	1,748	3,396	2,025	1,664
Total	81,866,545	91,891,524	85,994,574	110,372,862	101,003,282	113,834,210

Fuente: INE. (2010). *Compendio estadístico ambiental 2010*. p. 110.

Anexo II

Canasta básica alimentaria

La canasta básica alimentaria (CBA) es el conjunto de alimentos, expresados en cantidades suficientes para satisfacer las necesidades de calorías de un hogar promedio. Representa un mínimo alimentario a partir de un patrón de consumo de un grupo de hogares de referencia y no una dieta en todos los nutrientes.

Tabla 4. **CBA Guatemala**

PRODUCTO	Cantidad diaria consumida, en gramos, por una familia de 5.38 integrantes	Medida	PRODUCTO	Cantidad diaria consumida, en gramos, por una familia de 5.38 integrantes	Medida
<i>LÁCTEOS</i>			<i>AZUCARES</i>		
Crema fresca sin envasar	58,28	250ml	Blanca granulada	452,06	460g
Queso fresco	34,46	460g	<i>GRASAS</i>		
Leche Pasteurizada	201,21	1000ml	Margarina	18,95	460g

Continuación de la tabla 4.

Leche en polvo	26,97	460g	Aceite corriente	80,70	750ml
<i>CARNES</i>			<i>VERDURAS</i>		
Pollo con menudos	135,59	460g	Güisquil	320,11	460g
Hueso con carne de res	127,85	460g	Ejote	38,35	460g
<i>HUEVOS</i>			Tomate	169,85	460g
Medianos	135,11	648g	Cebolla	62,58	460g
<i>FRIJOLES</i>			Papas	182,92	460g
Negros	339,71	460g	<i>FRUTAS</i>		
<i>CEREALES</i>			Bananos maduros	209,82	460g
Arroz de segunda	166,59	460g	Plátanos maduros	164,00	460g
Tortillas de maíz	2.214,77	460g	<i>OTROS</i>		
Pan francés corriente	235,40	460g	Café tostado y molido	53,80	460g
Pan dulce	92,30	460g	Sal común de cocina	53,80	115g
Pastas para sopa	110,93	460g	Bebida gaseosa	191,77	1000ml
TOTAL				5.877,88	

Fuente: INE. (2013).

<http://www.ine.gob.gt/sistema/uploads/2013/11/07/3RsJZoXthWSzS82JUse5C4J3nyCvSRur>.

pdf

ANEXO III

Potencial de biometano de frutas y vegetales seleccionados

Tabla 1. Potencial de biometano de muestras de desechos vegetales

Muestra	SV (% de ST)	Rendimiento Final de Metano (l/g SV)
<i>Lycopersicon esculentum</i> (Tomate)		
Var. pyriforme	92,5	0.211
Var. Comune	98,1	0.384
<i>Allium cepa</i> (Cebolla)		
Capas exteriores	88,2	0.4
<i>Solanum tuberosum</i> (Papa)		
Cáscara	90,9	0.267
<i>Coriandrum sativum</i> (Cilantro)		
Hojas	80,0	0.325
Tallos	85,7	0.309
Raíces	83,3	0.283
Planta completa	84,9	0.322
<i>Brassica oleracea</i> var. capitata (Repollo)		
Hojas	91,2	0.309
Tallo	91,8	0.291
<i>Brassica oleracea</i> var. botrytis (Coliflor)		
Hojas	82,0	0.190
Tallo	87,1	0.331
<i>Raphanus sativus</i> (Rábano)		
Var. rosado pálido	84,9	0.304
Var. blanco amarillento	81,7	0.293
<i>Pisum sativum</i> (Arveja)		
Vainas	91,8	0.390
<i>Daucus carota</i> (Zanahoria)		
Hojas	93,1	0.241
Pecíolo	91,3	0.309

Fuente: Gunaseelan, V. (2004). *Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks*. p. 398.

Tabla 2. Producción de metano determinada como rendimiento y porcentaje de rendimiento para centeno, colza y habas, comparando la conversión sin tratamiento y con pretratamiento con oxidación húmeda

	Tratamiento	Rendimiento de Metano (g/100g base seca)	% de Rendimiento Teórico
Centeno	Sin tratamiento	18,2	72
	Oxidación húmeda	24,4	96
Colza	Sin tratamiento	18,8	78
	Oxidación húmeda	20,4	85
Habas	Sin tratamiento	18,9	77
	Oxidación húmeda	18,4	75

Fuente: Petersson, A. y otros. (2007). *Potential bioethanol and biogas production using lignocellulosic biomass from winter rye, oilseed rape and faba bean* p. 817.

Tabla 3. Valores finales de potencial de producción de metano a partir de sustratos evaluados

	Rendimiento de Biogás (m³/kg STo)	Rendimiento de Metano (m³/kg STo)	Promedio
Maíz a	0,719	0,347	0,346
Maíz b	0,716	0,346	
Pan a	0,658	0,293	0,295
Pan b	0,648	0,298	
Papa a	0,636	0,311	0,304
Papa b	0,646	0,298	

Fuente: Martínez, C. y otros. (2014). *Estudio de algunas propiedades físico-mecánicas y químicas de residuos orgánicos a utilizar en la producción de biogás en Cuba*. p. 67.

ANEXO IV

Fichas técnicas de generadores

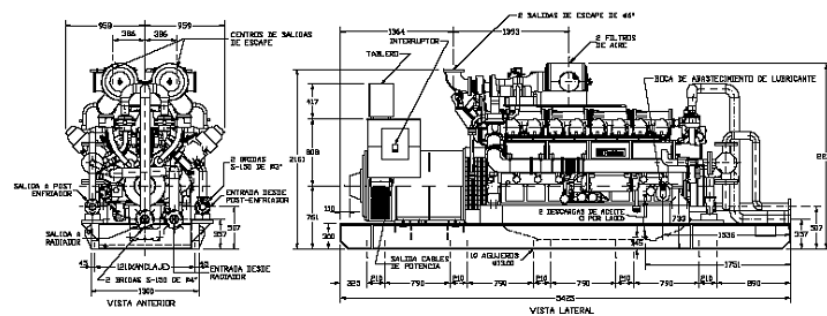
Figura 1. Grupo electrógeno gas Palmero PPG-900

PALMERO
Grupos Electrogenos

Perkins

Grupo Electrónico Gas Palmero PPG-900

DIMENSIONES GENERALES



Ancho: (mm)	Largo: (mm)	Alto: (mm)	Peso Neto: (Kg)
1300	5425	2233	11520

CAPACIDADES DE GENERACION

Servicio/Frecuencia	Prime	Standby Cont.	Standby Max.
440 V , 60 Hz	900 KVA 720 KW	900 KVA 720 KW	990 KVA 792 KW

Definición de Capacidades

Potencia "Prime": Corresponde al standard de potencia ISO 8528 para operación continua. Es aplicable para el suministro de potencia eléctrica a una carga variable por tiempo ilimitado en reemplazo de la energía de red comercial. Existe una capacidad de sobrecarga del 10% en este caso.-

Potencia "Standby Continua": Es aplicable según ISO 8528 para el suministro de energía en la eventualidad de una falla del suministro de energía de red, a una carga variable, por un número de horas ilimitado. Se dispone de un 10% de sobrecarga en este caso.-

Potencia "Standby Máxima": Corresponde a la potencia bloqueada según ISO 8528. Es aplicable como suministro de emergencia solo en áreas con redes bien establecidas, en el evento de una falla de red. No se dispone de capacidad de sobrecarga en este caso.-

Continuación de la figura 1.

DATOS TECNICOS			
Marca / Modelo de Motor	Perkins / 4016 TESI	Frecuencia: (Hz.)	60
Número de Cilindros	16 en "V"	Velocidad de Motor (RPM)	1200
Cilindrada: (l.)	61.123	Potencia Max. Volante: (KW)	880
Diámetro (mm.)	160	Velocidad de Pistón (m/s)	9.5
Carrera (mm.)	190	BMEP: (Mpa)	1.12
Relación de Compresión	9.5 : 1	Consumo de Comb.: (m ³ /KW.h)	0.28
Aspiración:	Turbo Sobrealiment.	Emisión de Calor de Escape (kW)	496
Post-enfriamiento	Aire / Agua	Emisión de Calor del Sist. Enf. (kW)	715
Refrigeración	Agua	Calor Total Irrradiado: (kW)	80
Presión Min. Gas (mbar)	15-50	Temperatura de Escape: (°C)	371
Regulador Velocidad	Electrónico	Caudal Aire de Enfriam.: (m ³ /min)	2654
Max. Impacto Carga (δf=10%)	33%	Caudal Aire de Combus.: (m ³ /min)	65.4
		Caudal Gases de Esc.: (m ³ /min)	148.3

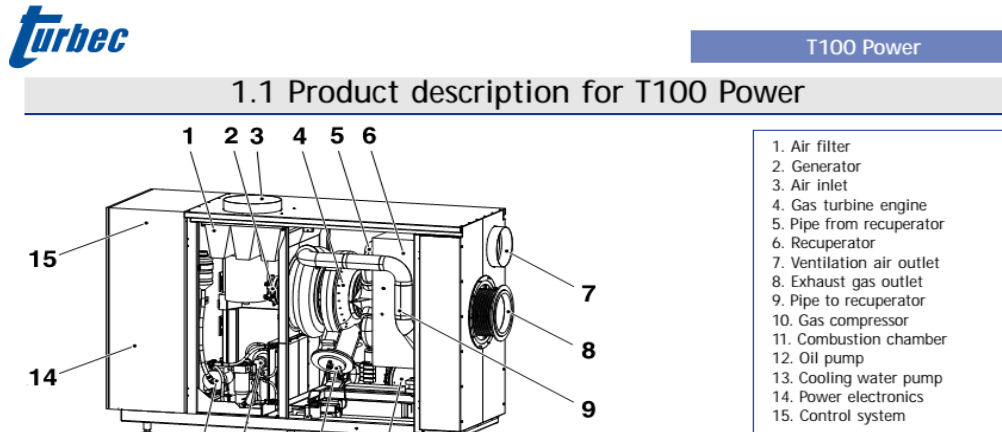
Marca de Generador	Stamford	Aislación:	H
Ejecución	Monocojinete	Tipo de Bobinado	6 Terminales
Coseno Fi	0.8	Paso de Bobinado	Acortado 2/3
Tipo	Brushless	Distorsión de Armónicas	≤1.5%
Sistema Regulación	Electrónico	Intensidad a 60 Hz.,440 V.	1181
Precisión Regul. Tensión	5%	Corr. Cortocircuito	>3.5 In
Rendimiento 60Hz. Plena C	95.1%	Reactancia Transit. 60Hz, 440 V.	22%
Protección	IP22	Reactancia Subtrans. 60 Hz, 440 V.	16%

Marca Interruptor Protección	Merlin Gerin	Protección	Electrón. Reg.-STR28 DE
Línea de Interruptores	Masterpact	Disparo por Cortocircuito	(3) x In
Modelo	C1251 N1	Poder de Corte	42000 A

Observaciones: Condiciones de referencia son: Temperatura ambiente: 27°C, altitud: 300m sobre nivel del mar. El consumo de combustible se basa en poder calorífico de 9000 Kcal/M³ y en 100% potencia prime por kw.h de salida eléctrica. Los caudales térmicos están basados en potencia máxima.

Fuente: Pérez, M. (2006). *Producción de energía eléctrica a partir de biogás procedente de vertederos de residuos sólidos urbanos.* p. 159.

Figura 2. Descripción técnica de la microturbina Turbec T100



1.1.1 Main components for T100 P

The Turbec T100 P consists of the following main parts:

- Gas turbine engine
- Electrical generator
- Electrical system
- Supervision and control system

Gas turbine engine

The gas turbine is a single shaft engine. The main components are:

- Housing
- Compressor
- Recuperator
- Combustion chamber
- Turbine

Housing

The electrical generator and the rotating components of the gas turbine are mounted on the same shaft. The parts are mounted in the same housing.

Compressor

The Turbec T100 uses a radial centrifugal compressor to compress ambient air. The pressure ratio is about 4.5:1. The compressor is mounted on the same shaft as the turbine and the electrical generator.

Recuperator

The electrical efficiency of the gas turbine is increased with a recuperator. The recuperator is a gas-to-air heat exchanger attached to the microturbine. The heat is exchanged from the hot exhaust gases to the compressed air that is fed to the combustion chamber.

Combustion chamber

The preheated compressed air is mixed with the fuel. During start up an electrical igniter in the combustion chamber ignites the mixture. The combustion chamber is of lean pre-mix emission type, achieving exhaust gases with low emissions of NO_x, CO and unburned hydrocarbons.

Turbine

The turbine drives the compressor and the generator. When the combustion gases leave the combustion chamber the temperature is approx. 950°C (1 742°F) and pressure is approximately 4.5 bar (65 psi). As the combustion gases expand through the turbine the pressure decreases to nearly atmospheric pressure and the temperature drops to approx. 650°C (1 202°F).

Electrical generator

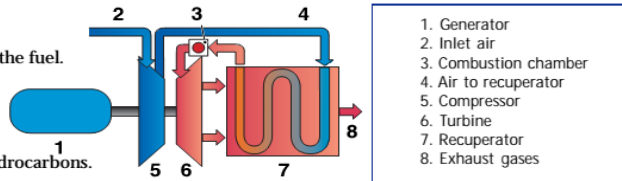
The electric power is generated by a permanent magnet rotating at high speed. The generator rotor is suspended by two bearings, one on each side of a permanent magnet. Further more, the generator acts as an electric starter. The generator is water-cooled, and designed for high conversion efficiency.

Electrical system

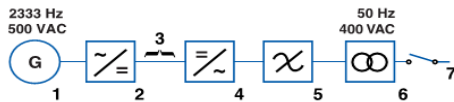
The high frequency AC power from the generator is rectified and converted to the desired grid voltage and net frequency. The AC power is rectified and converted to the electrical grid frequency. A line filter and a transformer stabilizes and smoothes the AC output. During start-up, power is taken from the grid and used for electric start of the gas turbine.

Supervision and control system

The Turbec T100 is controlled and supervised by an automatic control system that resides at the Power Module Controller (PMC) so the unit needs no personal attendance under normal operation. In case of grid distortion or system failure the system automatically shuts down and the fault is logged by the PMC. The PMC controls and supervises the start-up, running and rollout.



Continuación de la figura 2.



For this purpose a set of variables are monitored through sensors that measure:

- Turbine outlet temperature
- Power output
- Oil and water temperature
- Vibrations

In case of faults, the PMC executes one of the following actions:

- Normal stop
- Emergency shut down

The fault is presented on the display at the operator's panel to guide operating personell.

1.1.2 Auxiliary systems for T100 P

The auxiliary systems in the Power module are divided into the following systems:

- Lubrication system
- Cooling system
- Air intake and ventilation system
- Fuel gas system including fuel booster
- Buffer air system

Lubrication system

The purpose of the system is to lubricate the squeezed film bearings on the rotor shaft. The system consists of a closed piping system and an oil tank with an oil pump placed within the enclosure. A motor-driven pump circulates the lubrication oil. The lubrication oil circulates from the bearings to an oil-to-air cooler and is cooled below 50°C (122°F). The PMC monitors oil pressure and oil temperature before and after the bearings to obtain a reliable and continuous operation of the microturbine unit.

Cooling system

The generator is cooled with a separate closed cooling water system placed within the enclosure.

Air intake and ventilation system

A T100 installed indoors draws ambient air from an outdoor intake. As the air reaches the T100, the flow is divided into two partial flows. The main flow acts as combustion air in the microturbine. The secondary flow ventilates the excess heat out from the Power module. An induced draft fan placed on the outside wall creates a negative pressure inside the enclosure, for safety reasons and for cooling of the engine.

The ventilation air enters the T100 through an air duct. There are two air filters in the T100 system, the pre filter and fine filter. The pre filter (optional supply) is placed close to the outdoor intake of the air and the fine filter is placed close to compressor within the enclosure for filtering the combustion air.

T100 Power Module

- | | |
|------------------------------|----------------|
| 1. Generator | 5. Line filter |
| 2. Rectifier/Start converter | 6. Transformer |
| 3. DC bus | 7. Main switch |
| 4. Converter | |

Fuel gas system

The fuel gas system consists of a fuel control system and a fuel booster. It is necessary to use a fuel booster to raise the gas pressure when it is below 6 bar (g) (87 psig). The fuel gas is taken into the fuel booster and discharged to the fuel control system. In the combustion chamber, the fuel is mixed with preheated compressed air.

Buffer air system

The gas turbine compressor supplies the buffer air system with air to block the lubrication oil from entering the gas turbine engine and the generator. After the sealings, the air passes through an oil separator in which the oil mist is separated from the air and collected in the lubrication oil tank.

1.1.3 Technical data for T100 P

General identification

Type:	Microturbine
Manufacturer:	Turbec Spa, Italy
Model:	T100 P
Application:	Power generation
Usage:	Indoors (Option Outdoors)
Dimensions	
Width:	900 mm
Height:	1 810 mm
Length:	2 770 mm
Weight:	2 250 kg
Fuel:	Natural gas
Ambient inlet temperature:	-25°C to 40°C (-13°F to 104°F)
Ambient inlet humidity:	< 100 %
Surrounding air temperature:	-10°C to 40°C (14°F to 104°F)
Surrounding humidity:	< 100 %

Gas turbine

Compressor type:	Centrifugal
Turbine type:	Radial
Type of combustion chamber:	Lean pre-mix
Number of combustion chamber:	1
Pressure in combustion chamber:	4.5 bar (a) (65 psia)
Turbine inlet temperature:	950°C (1 742°F)
Number of shaft:	1
Nominal speed:	70000 rpm
Consumption of lubrication oil:	<3 litre/6 000 h operation (<0.8 gal/6 000 h operation)

Continuación de la figura 2.



1.2 Performance for T100 P

Performance notes

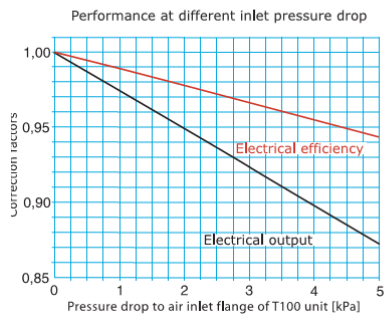
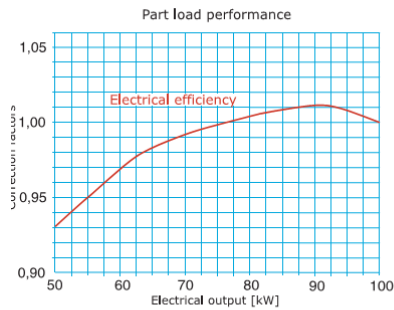
The performance data includes the T100 auxiliary consumption powered by T100, i.e. cooling water pump, fuel compressor, oil pump, induced draft fan. The data is based on the following conditions for new and clean equipment operating at ISO standard conditions:

Site elevation:	0 m above sea level
Ambient temperature:	15°C (59°F)
Relative humidity:	60%
Pressure drop to air inlet flange:	0 Pa (0 psi)
Pressure drop from exhaust gas flange:	0 Pa (0 psi)
Fuel type:	Natural gas
Data for LHV:	39 MJ/m ³ (1047 Btu/scf)
Fuel gas pressure:	Low pressure gas source (0.02 - 1.0 bar (g)) (0.3 - 14.5 psig)

1.2.1 Performance data

Electrical output:	100 kW (±3)
Electrical efficiency:	30 % (±1)
Fuel consumption:	333 kW (1 137 000 Btu/h)
Exhaust gas flow:	0.80 kg/s (6 350 lb/h)
Exhaust gas temperature:	270°C (518°F)
Noise level:	70 dBA at 1 meter (3.3 ft)

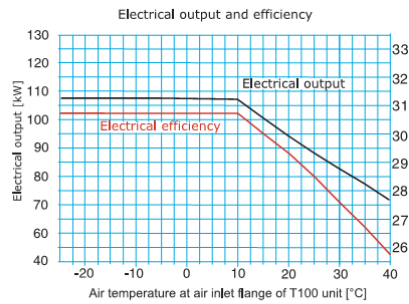
Volumetric exhaust gas emissions at 15% O₂; 100% load; at 15°C air temperature
 NO_x: < 15 ppm/v = 32 mg/MJ fuel
 CO: < 15 ppm/v = 18 mg/MJ fuel



T100 Power Module

1.2.2 Air inlet temperature influence

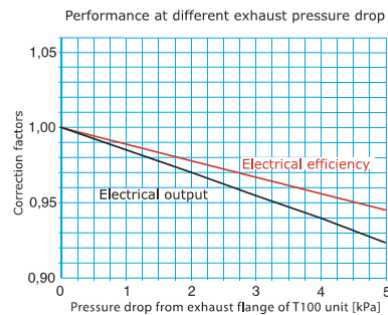
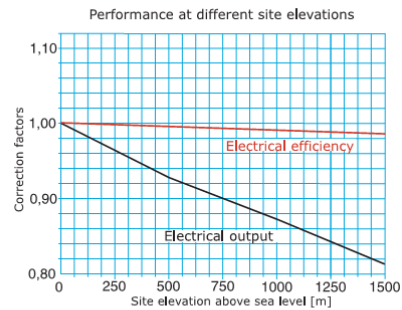
Chart presenting air inlet temperatures influence on T100 P microturbine performance based on low pressure gas sources 0.02 bar (g) (0.3 psig).



For high pressure gas source add approximately 5 kW electrical output and 1.5 % points electrical efficiency.

1.2.3 Corrections of performance

Charts presenting corrections of performance at different loads, site elevations, inlet pressure drop and outlet pressure drop.



Fuente: *Technical description microturbine Turbec T100*. Ensola AG (2006).

