



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

**PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS
PROCEDENTE DE VERTEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS
URBANOS**

MARIO FERNANDO PÉREZ ROSALES
Asesorado por Ing. Douglas Rosales Juárez

GUATEMALA, FEBRERO DE 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS
PROCEDENTE DE VERTEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS
URBANOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR**

MARIO FERNANDO PÉREZ ROSALES

**ASESORADO POR ING. DOUGLAS ROSALES JUAREZ
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE**

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Ingrid de Loukota
EXAMINADOR	Ing. Saúl Cabezas
EXAMINADOR	Ing. Marvin Hernández
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS
PROCEDENTE DE VERTEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha Febrero del 2004.

Mario Fernando Pérez Rosales

ACTO QUE DEDICO

A:

DIOS	Por ser la fuerza y guía de mis pasos.
MIS PADRES	Mario Alfonso y Doris por ser mi ejemplo de toda la vida.
MI HERMANO	Gustavo
MI ESPOSA	María Desiree
MIS ABUELOS	Fernando, Lidia y Dominga
MI FAMILIA	Tíos, tías, primos.
MIS AMIGOS	Víctor, Eddie, Luis, Antonio, Erick, Ramón y Mark.
MI SOBRINA	Isabel Marie

A todas aquellas personas que ayudaron de una u otra forma para la realización de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

A:

Dr. José Luis García del Departamento de Ingeniería Química, Tecnología de Alimentos y Tecnologías del Medio Ambiente de la Universidad de Cádiz y al Dr. Rafael Castañeda de la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad de Cádiz, por su apoyo incondicional y por compartir su conocimiento para la realización de este trabajo, además de brindarme la experiencia de realizar este trabajo en sus aulas y laboratorios.

Ing. Douglas Rosales Juárez por su aportación en la realización de éste trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XV
RESUMEN	XIX
OBJETIVOS	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. INTRODUCCIÓN A LOS RECURSOS ENERGÉTICOS	1
1.1. Problemática Energética Mundial	1
1.2. Energías renovables	5
1.2.1. Tipos de Energía Renovable	6
1.2.1.1. Energía Hidroeléctrica	6
1.2.1.2. Energía Solar	8
1.2.1.2.1. Energía Solar Térmica	8
1.2.1.2.2. Energía Solar Fotovoltaica	10
1.2.1.3. Energía Eólica	11
1.2.1.4. Energía Mareomotriz	13
1.2.1.4.1. Energía Térmica Mareomotriz	14
1.2.1.5. Energía Geotérmica	15
1.2.1.6. Energía de la Biomasa	16
1.3. Situación Mundial	18
1.4. Situación en Centro América	20
1.4.1. Administración y Estructura Energética Renovable	23
1.4.2. Problemática de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU)	26

1.5. Situación en Guatemala	29
1.5.1. Situación Actual de la Generación de Energía Eléctrica	29
1.5.2. Problema actual de los Residuos Sólidos Urbanos	32
1.6. Visión a Futuro de los Recursos Renovables en Guatemala	33
2. EL BIOGÁS	37
2.1. ¿Qué es el Biogás?	37
2.2. Composición del Biogás	39
2.2.1. Metano	40
2.2.2. Dióxido de Carbono	42
2.3. Propiedades del Biogás	43
2.4. Biometanización de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos	44
2.4.1. Fases de Fermentación Anaerobia	44
2.4.1.1. Hidrólisis	46
2.4.1.2. Acidogénesis	46
2.4.1.3. Acetogénesis	47
2.4.1.4. Metanogénesis	48
2.4.1.4.1. Metanogénesis Acetoclástica	50
2.4.1.4.2. Metanogénesis Hidrogenotrófica	50
2.5. Factores Ambientales con Influencia en la Digestión Anaerobia	50
2.5.1. Temperatura	51
2.5.2. pH	52
2.5.4. Nutrientes	52
2.5.5. Toxicidad	53
2.6. Potencial de Biogás en Guatemala	53
2.6.1. Clasificación de los Residuos Sólidos Urbanos	55
2.6.2. Recolección y Transporte de Residuos Sólidos Urbanos	58

2.7. Análisis de Tecnología de Construcción de Vertederos y su Aplicación en el caso Guatemalteco	60
2.7.1. Vertederos para Residuos Sólidos Urbanos no seleccionado	63
2.7.2. Vertederos para Residuos Sólidos Urbanos Triturados	63
2.7.3. Otros Vertederos	64
2.7.3.1. Vertedero como Unidades de Tratamiento Integral	64
2.7.3.2. Vertederos Diseñados para Maximizar la Producción de Gas	64
2.7.4. Normas par la Instalación de un Vertedero Controlado	65
2.8. Técnica de Recuperación del Vertedero del Trébol en las Zonas 3 y 7	66
2.9. Aprovechamiento Energético del Biogás en Vertederos	69
3. UTILIZACIÓN DEL BIOGÁS PARA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU)	73
3.1. Producción de Energía a partir de FORSU	73
3.2. Proceso de Desgasificación y Funcionamiento del Sistema	75
3.2.1. Equipos y /o Unidades	77
3.3. Aspectos de la Producción de Electricidad por Biogás	79
3.4. Sistema de Cogeneración por medio de Motores de Combustión Interna	82
3.5. Combustibles Gaseosos en Motores de Combustión Interna	86
3.6. Cálculo de Biogás Generado y Capacidad de Generación a	90

Instalar	
3.6.1. Cálculo de emisión de los principales gases del biogás, CH ₄ y CO ₂	90
3.6.2. Cálculo de las Emisiones, Ejemplo Práctico Caso del Relleno Sanitario del Trébol ubicado entre las zonas 3 y 7 de la Ciudad de Guatemala	96
3.7. Ejemplos de Proyectos Existentes	103
4. ASPECTOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR MEDIO DE BIOGÁS	107
4.1. Evaluación Económica	107
4.1.1. Inversiones en los Equipos	111
4.1.2. Rentabilidad Económica	113
4.2. Impacto Económico a Mediano y Largo Plazo	114
4.3. Impacto Ambiental	117
4.4. Beneficios e Inconvenientes	121
5. OTRAS ALTERNATIVAS DE GESTIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	125
5.1. Gestión de Residuos Sólidos Urbanos	125
5.2. Modelos de Gestión	126
5.3. Elementos Necesarios para la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos	128
5.4. Fases de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos	128
5.4.1. Prerrecogida	128
5.4.2. Recogida	129
5.5. Alternativas de Eliminación y Gestión Final de los Residuos Sólidos Urbanos	130
5.5.1. Reciclaje	130
5.5.2. Compostaje	131

5.5.3. Incineración	132
5.5.4. Vertedero controlado	133
CONCLUSIONES	135
RECOMENDACIONES	137
BIBLIOGRAFÍA	139
ANEXO 1	146
ANEXO 2	159
ANEXO 3	161

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Porcentaje de Energía Primaria Total Mundial (TPES) 2001	18
2.	Porcentaje mundial de energía renovable 2001	19
3.	Tetraedro de Metano (CH ₄)	40
4.	Vías metabólicas en la fermentación anaeróbica	45
5.	Relación entre la termodinámica y la presión parcial de H ₂	48
6.	Condiciones de temperatura en la producción de Metano	52
7.	Ubicación del Relleno Sanitario del Trébol	55
8.	Desarrollo de un vertedero moderno	61
9.	Métodos de relleno	62
10.	Control permeable e impermeable de gases de vertedero	66
11.	Recuperación de vertedero existente	67
12.	Esquema de planta de biogás en un vertedero controlado	69
13.	Esquema de aprovechamiento energético de los RSU	70
14.	Esquema de aprovechamiento de biogás en un vertedero controlado	70
15.	Pozo típico de extracción de biogás con detalle en su salida	71
16.	Esquema de generación en un vertedero controlado	74
17.	Generación eléctrica con biomasa	79
18.	Esquema de energías y calor de una central de cogeneración	80
19.	Balance de energía típico en un motor diesel	81
20.	Esquema de cogeneración por medio de un MCI	84
21.	Comparación de CH ₄ captable a 70% en m ³ /h de 2005 a 2024	101

22.	Comparación de CH ₄ utilizable a 80% y optimizado a 90% en m ³ /h de 2005 a 2024	102
23.	Contenedores de Primer Modelo de Gestión	127
24.	Compost	132
25.	Vertedero controlado “Miramundo”	134
26.	Piscina de evaporación de lixiviados	149
27.	Tubería de captación de lixiviado	150
28.	Piscina de evaporación grande	151
29.	Control de movimiento de biogás	152
30.	Alfombra sintética con grava especial	153
31.	Control de biogás	155
32.	Grupo Electrónico Gas Palmero PPG-900	157
33.	Diagrama de disposición de vertedero controlado y planta de producción de energía eléctrica por medio de biogás generado por RSU	160

TABLAS

I.	Consumo de Energía Primaria Total Mundial (TPES) 2001	19
II.	Capacidad instalada en Centro América, Sistemas Nacionales Interconectados, 2001	22
III.	Capacidad instalada en el parque generador de Guatemala	29
IV.	Marco Energético Legal Actual Guatemalteco	30, 31
V.	Compuestos típicos del biogás	39
VI.	Propiedades del CO ₂	43
VII.	Materiales y porcentaje en peso del contenido de RSU en Guatemala	56

VIII.	Generación de RSU per cápita en Áreas Metropolitanas y ciudades con más de 2 millones de habitantes en América Latina (1997)	57
IX.	Estimaciones de crecimiento de población y RSU	58
X.	Transporte y recolección de Residuos Sólidos Urbanos	59
XI.	Impactos de las practicas de gestión de residuos, realizadas de forma incontrolada, sobre el Medio Ambiente	60
XII.	Opciones de uso potencial del biogás	75
XIII.	Rendimientos eléctricos	82
XIV.	Modelos de motores de cogeneración a biogás	88
XV.	Capacidades de generación grupo Motor- Generador Palmero PPG-900	88
XVI.	Datos técnicos grupo Motor – Generador Palmero PPG-900	89
XVII.	Valores estimados por EPA para las constantes	92
XVIII.	Factores de emisión de NO ₂ según distintos sistemas de control	95
XIX.	Estimación de Caudal Captable de 70% de CH ₄ en el Relleno Sanitario del Trébol de 2005 a 2024	101
XX.	Estimación de caudal de CH ₄ utilizable de 80% y optimizado a 90% en el Relleno Sanitario del Trébol de 2005 a 2024	102
XXI.	Resumen de capacidad de potencia a instalar y número de unidades de generación de energía eléctrica en el Relleno Sanitario del Trébol	103
XXII.	Datos técnicos Grupo Electrógeno Gas Palmero PPG-900	158

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
%	Porcentaje
USD	Dólares de Estados Unidos
CO ₂	Dióxido de Carbono
MW	Mega Watt
KWh	Kilo Watt-hora
KW	Kilo Watt
TW	Tera Watt
°C	Grado Centígrado
m	Metro
GWh	Giga Watt-hora
KV	Kilo Voltios
W	Watt
CH ₄	Metano
H ₂ S	Ácido Sulfhídrico o Sulfuro de hidrogeno
NH ₃	Amoniaco
H ₂ O	Agua
H ₂	Hidrógeno
CO	Monóxido de Carbono
N ₂	Nitrógeno
O ₂	Oxígeno
Kcal/g	Kilo Caloría / gramo
Kcal	Kilo caloría
g/mol	gramo / mol
kg/m ³	Kilogramo / metro
ppm	partes por millar

kPa	Kilo Pascal
mol/kg*bar	mol / kilogramo*bares
kcal/m ³	Kilo caloría / metro cúbico
KWh/m ³	Kilo Watt-hora / metro cúbico
l	Litro
Kg	Kilogramo
m ³	metro cúbico
K	Potasio
Ca	Calcio
Mg	Magnesio
CH ₃ COOH	ácido acético
Km ²	Kilómetros cuadrados
Kg/hab/día	Kilogramo / habitante / día
Tn	Tonelada
cm	centímetro
mm	milímetro
H ₂ SO ₄	ácido sulfúrico
PN6	presión de trabajo a 6 bares
F	energía de combustible
W	energía eléctrica generada
Q _u	calor útil
P	Perdidas
η _{el}	rendimiento eléctrico
η _t	rendimiento de calor útil
KVA	Kilo Volt Amperio
RPM	revoluciones por minuto
Lo	potencial de generación de CH ₄ en m ³ /Tn de RSU vertida.
R	media anual de RSU en Tn/año
K	Ratio de generación de CH ₄ en 1/año

C	tiempo desde la clausura del vertedero en años
T	tiempo desde la primera deposición de basura en años
DOC	fracción de carbón orgánico degradable en la basura
DOCf	porción de DOC que se convierte a gas
F	fracción de CH ₄ en el gas gestionado
MCF	cantidad de CH ₄ en el biogás
Q _{CH₄}	caudal de metano
Q _{CH₂}	caudal de dióxido de carbono
U _{mp}	emisión del contaminante p no controlado
MW _p	peso molecular de p
Q _p	ratio de emisión de p, m ³ /año
T	temperatura del vertedero
NO ₂	Dióxido de Nitrógeno
CM _{CH₄}	emisiones controladas del CH ₄
UM _{CH₄}	emisiones de no controladas del CH ₄
η _{col}	eficiencia de recogida de gas
η _{cnt}	eficiencia del sistema de control
CM _{CO₂}	emisiones controladas de CO ₂
UM _{CO₂}	emisiones no controladas de CO ₂
UM _{CH₄}	emisiones de no controladas de CH ₄
m ³ /h	metro cúbico / hora
I _o	inversión inicial
I _b	inversión en equipos de biogás
I _f	inversión en equipos de combustibles fósiles
A	ingresos anuales
E	número de unidades energéticas

P_f	precio combustible fósil
PCI_f	poder calorífico inferior combustible fósil
P_b	precio biogás
PCI_b	poder calorífico inferior biogás
PR	Período de recuperación
N_2O	óxido nitroso
HFC	hidrofluorocarbonos
SF_6	hexafloruro de azufre
PFC	perfluorocarbonos

GLOSARIO

AIE	Agencia Internacional de Energía
AMM	Administrador del Mercado Mayorista
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
Biogás	Combustible gaseoso obtenido por fermentación anaerobia de residuos biodegradables
BM	Banco Mundial
CEAC	Consejo de Electrificación de América Central
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CND	Centro Nacional de Despacho
CNDC	Centro Nacional del Despacho de Carga
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica
Combustión	Reacción entre el oxígeno y un material combustible, que, por desprender energía, suele causar incandescencia o llama.
Compost	Fertilizante natural procedente de residuos orgánicos.
Compostaje	Proceso biológico aeróbico, que por el que se obtiene compost.
Densidad	Relación entre la masa y el volumen de una sustancia o cuerpo.
Desgasificación	Extracción o pérdida de gases disueltos.
EPA	US Environmental Protection Agency
ESI	Evaluación de Impacto Socioeconómico
ETESA	Empresa de Transmisión Eléctrica, S.A.
Fermentación Anaerobia	Descomposición de materia orgánica en ausencia de oxígeno
FORSU	Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos

Gestión	Dirección, administración de una empresa, negocio, etc.
Incineración	Reducción a cenizas de algo mediante combustión en exceso de oxígeno
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IEMA	Impuesto a las Empresas Mercantiles y Agropecuarias
INTA	Instituto de Técnica Aeroespacial
ISR	Impuesto Sobre la Renta
IVA	Impuesto del Valor Agregado
Lixiviado	Líquido y sus componentes en suspensión, que ha percolado o drenado a través de la masa de residuos.
MARN	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales
MCI	Motor de combustión interna
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
MEM	Ministerio de Energía y Minas
MER	Mercado Eléctrico Regional
Metano	Hidrocarburo gaseoso, incoloro, inodoro, poco soluble e inflamable, producido por la descomposición de sustancias orgánicas, siendo uno de los componentes del biogás.
MME	Mercado Mayorista de Electricidad
NCC	Normas de Coordinación Comercial
NCO	Normas de Coordinación Operativa
NEAST	Normas de Estudios de Acceso al Sistema de Transporte
NPI	National Pollutant Inventory
NTAUCT	Normas Técnicas de Acceso y Uso de la Capacidad de Transporte
NTDOID	Normas Técnicas de Diseño y Operación de las Instalaciones de Distribución

NTDOST	Normas Técnicas de Diseño y Operación del Servicio de Transporte de Energía Eléctrica
NTCSTS	Normas Técnicas de Calidad del Servicio de Transporte y Sanciones
NTSD	Normas Técnicas del Servicio de Distribución
OMC	Organización Mundial del Comercio
OPEP	Organización de Países Exportadores de Petróleo
OPS	Organización Panamericana de la Salud
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PPA	Power Purchase Agreement
PPP	Plan Puebla Panamá
PCF	Prototipo Fondo de Carbón
Reciclaje	Proceso en el que materiales de residuo son recolectados y transformados en nuevos materiales que pueden ser utilizados o vendidos como nuevos productos o materias primas.
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SNI	Sistema Nacional Interconectado
TEP	Tonelada Equivalente de Petróleo
TPES	Reserva de Energía Primaria Total
UT	Unidad de Transacciones
SWERA	Solar and Wind Energy Resource Assessment
Vertedero	Instilación física utilizada para deposición de Residuos Sólidos Urbanos.
Vertedero Controlado	Instalación física diseñada para minimizar el impacto ambiental de la deposición de Residuos Sólidos Urbanos.
HDPE	Alta densidad de polietileno

RESUMEN

Los combustibles fósiles constituyen el recurso energético más común, actualmente, sin embargo, su alta dependencia en el desarrollo económico y su uso desmedido se ha convertido en una problemática, debido a su escasez y a la contaminación ambiental que produce su utilización.

Lo anterior, ha motivado la necesidad de optar por opciones de fuentes renovables que satisfagan de igual manera la necesidad energética y, a su vez, que garanticen un desarrollo sostenible.

Al problema de contaminación ambiental que ocasionan los combustibles fósiles, se suma la problemática de la producción descontrolada de residuos sólidos urbanos, que crece debido a la economía de consumo y a los desarrollos tecnológicos creando la necesidad de gestionarlos, controladamente, además del aprovechamiento posterior a su producción.

En este sentido, mediante la alternativa del vertedero controlado se mitiga el problema transformando la fracción orgánica de dichos residuos, mediante fermentación anaerobia, en un subproducto (biogás) que, energéticamente, es aprovechable, compuesto, principalmente, de metano y dióxido de carbono.

Debido al poder calorífico del biogás es posible su aprovechamiento mediante combustión, dependiendo de su captación, quemándolo y transformándolo en energía eléctrica mediante motores de combustión interna, sustituyendo a los combustibles tradicionales.

Su producción en un vertedero controlado se dá como un objetivo secundario, puesto que su principal fin es de carácter medioambiental y no energético.

Creando conciencia en la población, de una gestión controlada de los residuos urbanos, se puede, entonces, pensar en un aprovechamiento energético del biogás, como una fuente de un recurso renovable.

OBJETIVOS

General

Incentivar el aprovechamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos, RSU; por la producción de biogás, para utilizarlo como combustible en la generación de energía eléctrica a través de motores de combustión interna, en instalaciones con fines no energéticos, como un vertedero controlado, ayudando al Desarrollo Sostenible, como una fuente de Energía Renovable que no afecte al medio ambiente al producir energía eléctrica disminuyendo, además, el volumen de Residuos Sólidos Urbanos.

Específicos

1. Determinar de manera sistemática el aprovechamiento de la biometanización de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos en la generación de energía eléctrica en las condiciones actuales de Guatemala.
2. Introducir el concepto de Vertedero Controlado como un escenario para la producción de biogás y su aplicación en la problemática actual guatemalteca de los Residuos Sólidos Urbanos, RSU.
3. Promocionar el uso de las Energías Renovables y en especial el aprovechamiento de los RSU como un método de preservación del medio ambiente.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de preservar el medio ambiente y la inminente urgencia de ser cada día menos dependientes del petróleo y otros combustibles fósiles, crea la necesidad de búsqueda de recursos energéticos alternativos menos contaminantes que puedan ser explotados como una opción para la generación de energía eléctrica produciendo un impacto ambiental mínimo.

Debido a las condiciones actuales en las que por un lado, las reservas mundiales de combustibles fósiles empiezan a caer a niveles críticos, no garantizando el seguro suministro energético a corto plazo. Así mismo, el uso de éste tipo de combustibles tiene grandes implicaciones ambientales. Los países desarrollados y dependientes de los hidrocarburos han aunado esfuerzos orientados al uso de las fuentes renovables de energía con el propósito de liberar su alta dependencia de los combustibles fósiles y garantizar una energía propia para continuar con su sostenimiento y desarrollo económico.

Sumándose a los problemas medioambientales, debido a la utilización de combustibles fósiles, la expansión de la economía basada en el consumo y los extraordinarios avances técnicos experimentados; surge la problemática de los Residuos Sólidos Urbanos que empieza a tomar proporciones críticas y a generar un gravísimo impacto en el medio ambiente.

Es, entonces, donde nace la necesidad de gestionar los residuos de la sociedad de una forma que sea compatible con las preocupaciones ambientales y, si es posible, energéticas. Es en éste caso, donde la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos -FORSU- juega un papel importante.

Los métodos de gestión controlada de los RSU incluyen el reciclaje, el compostaje, la incineración y el vertedero controlado, siendo éste último interesante por el aprovechamiento que brinda su gestión controlada; la cual contempla la producción de biogás. Éste se produce debido a la fermentación anaerobia de la FORSU; considerado como una fuente de recurso renovable.

Debido a la composición y poder calorífico del biogás, se puede aprovechar su carácter no contaminante en nuevas aplicaciones energéticas que contribuyan a un desarrollo sostenible, constituyendo una alternativa hacia el uso de combustibles fósiles para fines energéticos. Éste tipo de combustible es capaz de sustituir de manera sustancial a combustibles fósiles como la gasolina y el diesel en la alimentación de motores de combustión interna, los cuales pueden servir para generación de energía eléctrica, entre otras aplicaciones.

Por la producción diaria de RSU, en Guatemala, se hace necesaria una gestión controlada de los residuos en las ciudades y poblaciones afectadas por ésta problemática. Ésta gestión permite el aprovechamiento del gas producido para la posible generación de energía eléctrica para su uso en la planta de producción de biogás o para abastecer las necesidades energéticas poblaciones cercanas al punto de producción.

1. INTRODUCCION A LOS RECURSOS ENERGÉTICOS

1.1. Problemática Energética Mundial

Los recursos energéticos son los elementos que se encuentra en la naturaleza y que al transformarlos se convierten en algún tipo de energía, con la cual los países del mundo intentan cubrir sus necesidades energéticas, las cuales son la base de la civilización industrial actual; sin ella, la vida moderna dejaría de existir. Durante la década de 1970, el mundo empezó a ser consciente de que éstos recursos tienen un límite. Desde el descubrimiento del petróleo el mundo ha sido vulnerable a trastornos en el suministro de éste y sus derivados, los cuales desde mediados del siglo pasado se han convertido en la principal fuente de energía (1-3).

A partir de la explotación y la perforación comercial de los pozos petroleros; las compañías petroleras americanas hicieron que la industria estadounidense creciera rápidamente. A esto se sumaron para la búsqueda de éste recurso energético países de Europa, siendo Inglaterra el primero en encontrarlo en Oriente Medio por lo que empezó a haber refinerías y compañías que exportaban queroseno utilizándolo para la iluminación; luego el desarrollo del motor de combustión interna y del automóvil creó un enorme mercado nuevo para otros derivados importantes, la gasolina y el combustible diesel; asimismo el gasóleo de calefacción como sustituto del carbón en muchos mercados energéticos. Para 1949, se empiezan los primeros avances de unificación de criterios del principal recurso energético mundial, para luego en 1960 crear la Organización de los Países Exportadores de Petróleo (OPEP) siendo conformada por los principales países exportadores de entonces: Venezuela, Irán, Irak, Kuwait y Arabia Saudita (2).

A principios de la década de 1970 sucedieron acontecimientos de trascendencia global en el sector bursátil del petróleo y tras la guerra entre árabes e israelíes, los países árabes productores de petróleo recortaron su producción mundial. Cuando unos pocos países productores comenzaron a subastar parte de su crudo se produjo un alza desenfrenada que alentó a los países miembros de la OPEP, que eran ya 13, a subir el precio de toda su producción de petróleo a niveles hasta 8 veces superiores a los precios de años anteriores.

El panorama petrolero mundial se calmó gradualmente, ya que la recesión económica mundial provocada por el aumento de los precios del petróleo recortó la demanda de crudo. Más tarde, a finales de la misma década dio inicio una segunda crisis del petróleo cuando la producción y exportación iraní de petróleo cayeron hasta sus niveles más bajos. En la siguiente década, 1980, con el estallido de la guerra entre Irán e Irak se dió un nuevo incremento al precio del petróleo; subiendo el crudo hasta 19 veces el precio promedio de 1970.

Se volvió a producir una recesión económica y otros países ajenos a la OPEP, tales como México, Brasil, Egipto, China, la India; entre otros, aumentaron su producción haciendo bajar los precios mundiales. De este modo la antigua Unión Soviética, un país ajeno a la OPEP, logró una producción en 1989 que llegó a ser aproximadamente el 12% de la producción mundial.

A pesar de que el precio internacional del petróleo se ha mantenido bajo y hasta cierto punto estable desde 1989, la preocupación por posibles trastornos en el suministro ha seguido siendo el foco de la política energética mundial de los países industrializados.

La subida del precio a corto plazo que tuvo lugar tras la invasión iraquí a Kuwait reforzó la preocupación del problema energético mundial; debido a que las grandes reservas de petróleo se encuentran en Medio Oriente, al ser la principal fuente de petróleo en el futuro previsible.

En la actualidad la Agencia Internacional de Energía (AIE) ha realizado una proyección en la inversión mundial, en las siguientes tres décadas, desde el 2001 al 2030; realizando estimaciones que prevén inversiones en las infraestructuras energéticas primarias que se estima alcancen hasta 16 billones de USD en todo el mundo; las cuales serán necesarias para la demanda mundial y para la sustitución de las instalaciones existentes que quedarán obsoletas o las instalaciones que a futuro se quedarán agotadas. El análisis es en base a la Perspectiva Energética Mundial 2002 en la que se estima un crecimiento del mercado mundial de 2/3 durante las tres próximas décadas y equivalente al 1.7% del crecimiento anual de la demanda energética mundial (3-1).

Según el Informe Mundial de Inversión de la AIE del 2003, se estima que el sector eléctrico será el de mayor inversión, abarcando las ramas de generación, transmisión y distribución alcanzando los 10 billones de USD, que significará el 60% de la inversión energética global; y si se toma en cuenta el recurso fósil como medio de combustible para las centrales eléctricas a futuro se puede alcanzar hasta el 70% de la inversión total estimada. Siguiendo la misma temática se estima una inversión en el sector del gas de un 19% del total y la misma cantidad en porcentaje de inversión para el petróleo y sus derivados, finalmente la inversión en la industria del carbón será de un 2% de la totalidad.
(3-2)

Según la AIE el porcentaje de inversión en el sector eléctrico pretende alcanzar al menos un tercio, del 60% total, en el tema de las energías renovables aprovechando los recursos naturales mundiales, esto significará al menos 720 mil millones de USD, siendo la mitad de la inversión de generación de energía eléctrica prevista.

Según las políticas de ahorro de energía y las políticas medio ambientalistas que se esfuerzan por reducir las emisiones de gases causantes del efecto invernadero se plantean actualmente nuevas tecnologías de aprovechamiento del recurso natural por lo que en países industrializados o de economías estables, que normalmente gozan de un acceso total a la electricidad, los gobiernos ven la energía renovable como un medio de limitar o suprimir las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, el desarrollo acelerado de las energías renovables en los países industrializados puede facilitar la transferencia de tecnología hacia los países en desarrollo y favorecer así su desarrollo económico (3-4).

Por su parte en los países en desarrollo, que normalmente tienen servicios de electricidad deficientes y pobres, la energía renovable ofrece una alternativa a las necesidades energéticas locales que pueden alimentar regiones de poblaciones pequeñas o bien poco densas que se encuentren en áreas rurales. También puede contribuir al parque energético que alimenta las redes eléctricas para satisfacer la demanda de electricidad en rápido crecimiento en zonas urbanas. Además las energías renovables aseguran la sostenibilidad del medio ambiente y desarrollan países difundiendo tecnologías energéticas alternas.

1.2. Energías renovables

La energía es utilizada por el hombre para satisfacer gran parte de sus necesidades básicas en forma de calor, electricidad y en muchas formas más; por lo que la disponibilidad de los recursos energéticos actuales es uno de los factores más importantes en el desarrollo del hombre.

El consumo masivo de los derivados del petróleo, hidrocarburos, el gas y el carbón; ha estado produciendo a lo largo de los años alteraciones en la atmósfera a nivel mundial. Los niveles de Dióxido de Carbono, (CO_2) que se detectan actualmente son significativamente mayores que los que existían a mediados del siglo pasado al principio de la utilización de estos combustibles

Los combustibles fósiles conllevan al efecto invernadero, que está produciendo ya un incremento en las temperaturas promedio mundiales; también son causantes de la llamada lluvia ácida, que en los bosques cercanos a las áreas altamente industrializadas causan grandes daños al suelo, a la flora y la fauna (4).

Así también en las grandes ciudades, la combinación de las emisiones de gases de combustión, con algunos otros fenómenos naturales, como las inversiones térmicas, la humedad y la radiación solar produce algunos efectos fatales para la salud humana, como el smog, las altas concentraciones de ozono y, en general, la concentración de componentes indeseables en la atmósfera.

Tanto por razones económicas, escasez de hidrocarburos; de infraestructura, falta de suministros en las redes eléctricas nacionales; como ecológicas, alteración de la atmósfera y del suelo; es necesario e imperativo el desarrollo de nuevas alternativas energéticas, que sean compatibles con el sostenimiento ambiental y que se encuentren más al alcance de las comunidades, permitiendo la diversificación energética de una generación de energía eléctrica alterna.

Las energías renovables, se entienden como energías que, administradas en forma adecuada, pueden explotarse ilimitadamente ya que su cantidad disponible en el mundo no disminuye a medida que se aprovechan, son también llamadas energías alternativas, blandas o limpias; y engloban una serie de fuentes energéticas alternas y equivalentes a las fuentes de energía tradicional con lo cual se pretende producir un impacto ambiental mínimo, además de no agotar su existencia con el paso del tiempo.

1.2.1. Tipos de Energía Renovable

Estas energías renovables comprenden: la energía hidroeléctrica, la energía eólica, la energía solar térmica, la energía solar fotovoltaica, la energía mareomotriz, la energía geotérmica, la energía de la biomasa y su derivada: el biogás (5-ix).

1.2.1.1. Energía Hidroeléctrica

La energía hidroeléctrica se considera como la energía que se obtiene a partir del agua de los ríos. Es pues una fuente de energía renovable, ya que de forma indirecta teniendo al Sol como origen, el calor evapora el agua en la superficie terrestre y la de los lagos y ríos formando nubes, que a su vez se transformarán en lluvia o en nieve.

El mayor aprovechamiento de esta energía se realiza en los saltos de agua de las presas; el agua se encuentra generalmente retenida en un embalse el cual es un gran depósito que se forma, generalmente, de manera artificial, cerrando un valle mediante un dique o presa en el que quedan retenidas las aguas de un río.

El agua almacenada puede ser utilizada posteriormente para el riego, abastecimiento de poblaciones o para la producción de energía eléctrica por medio de una central hidroeléctrica, éste último es el uso más común en Guatemala en donde actualmente la capacidad instalada en éste tipo de energía es 630 MW; en donde la hidroeléctrica más grande es la Hidroeléctrica Chixoy ubicada en el departamento de Alta Verapaz, con 300MW de capacidad, iniciando operaciones en 1983 (6).

Los países con gran potencial hidroeléctrico, como Costa Rica, Guatemala y Panamá (7-4), obtienen la mayor parte de la electricidad en centrales hidroeléctricas por sus grandes ventajas, entre las se pueden destacar las siguientes:

- Es una fuente renovable que no genera calor ni emisiones contaminantes que provoquen lluvia ácida, efecto invernadero u otros.
- Es propia de cada región y, por consiguiente, evita importaciones de suministro al exterior.
- Es eficaz, dado que proporciona al sistema potencia y producciones de electricidad importantes.
- Requiere inversiones muy cuantiosas que se realizan normalmente en regiones rurales muy deprimidas económicamente.

Aunque pueda tener ciertos inconvenientes, como los que se citan:

- Las fuentes hidráulicas suelen estar lejos de las grandes poblaciones, por lo que es necesario transportar la energía eléctrica producida a través de costosas líneas de transmisión.
- Se llevan a cabo con grandes inversiones por la difícil localización de fuentes hidráulicas.

Sin embargo la energía hidroeléctrica sigue siendo la más empleada entre las fuentes de energía renovable para la producción de energía eléctrica a nivel mundial.

1.2.1.2. Energía Solar

La energía solar es la energía que llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética procedente del Sol, es limpia, renovable, abundante y está disponible en la mayor parte de la superficie terrestre.

El aprovechamiento de la energía solar puede hacerse por dos vías: térmica y fotovoltaica.

1.2.1.2.1. Energía Solar Térmica

El efecto térmico producido en la energía solar hace posible su utilización directamente mediante diferentes dispositivos artificiales para concentrarlo y hacerlo más intenso, transfiriéndolo a los fluidos para su calentamiento o en si para su utilización.

La energía solar al ser interceptada por una superficie absorbente se degrada, apareciendo el efecto térmico.

Esto se consigue sin mediación de efectos mecánicos, es decir de una forma pasiva que es una forma de aprovechamiento que capta la energía solar, la almacena y distribuye de forma natural, utilizando también procedimientos de ventilación natural. Su principio se basa en las características de los materiales empleados en la construcción, formando parte inseparable de las estructuras de edificios o casas a alimentar, como cristales (captan la energía solar y funcionan reteniendo el calor como efecto invernadero), masa térmica (almacena energía construida por elementos estructurales), reflectores (producen incrementos en la radiación en invierno) (8-23).

La energía solar puede captarse también mediante elementos mecánicos, o de forma activa. Suelen utilizarse para calentar un fluido, aire o agua; basándose en la captación de la energía solar a través de colectores y su transferencia a un sistema de almacenamiento, a baja temperatura.

También suelen utilizarse colectores de captación de energía del orden de 100 a 250 °C, de media temperatura y para aplicaciones que requieren de temperaturas superiores a 250 °C, fundamentalmente para la producción de energía eléctrica es necesario precisar de una mayor concentración de la radiación de la energía solar y entonces es de alta temperatura.

En la actualidad, existen proyectos de energía solar térmica en Bélgica, Francia, Alemania, Grecia, Irlanda, España, Portugal, Italia y el Reino Unido entre otros (8-14).

1.2.1.2.2. Energía Solar Fotovoltaica

El aprovechamiento de la energía proveniente del sol consiste en transformar la energía luminosa procedente del sol en energía eléctrica, mediante la exposición al sol de ciertos materiales convenientemente tratados, y la posterior recogida de la electricidad generada. Estos materiales tratados suelen ser usualmente silicio purificado con arena mediante procedimientos complejos (9-27).

A grandes rasgos los sistemas que aprovechan la energía solar fotovoltaica constan de un generador, que son paneles fotovoltaicos, un acumulador, que almacenan la energía y la utilizan al ser necesaria, y un regulador, que es el elemento de control entre el generador y el acumulador, y los equipos que consumirán la energía almacenada.

Actualmente en Guatemala ya se está utilizando éste tipo de energía a través de sistemas aislados y no conectados al Sistema Nacional Interconectado (SNI) su uso ha cobrado auge en pequeñas comunidades rurales de ciertos departamentos como Alta Verapaz, Baja Verapaz, Zacapa, Quiché, El Progreso y Petén; siendo su aplicación más común en la actualidad la electrificación rural, pues en viviendas aisladas a la red, se hace muy interesante la utilización de la energía solar fotovoltaica, ya que asegura una distribución eléctrica con autonomía propia, evitando altos costos en construcción de líneas de transmisión para llevar el suministro eléctrico convencional (10).

Comparada con las fuentes convencionales de energía, la energía solar presenta una excelente ventaja medioambiental.

Algunas ventajas de la energía solar son:

- Es inagotable a escala humana y no contaminante.
- Los sistemas fotovoltaicos no requieren abastecimiento de combustible, evitando la emisión a la atmósfera de CO₂, son totalmente silenciosos, apenas requieren mantenimiento y tienen una vida útil mucho más larga, los paneles solares tienen una duración bastante amplia,
- La electricidad se produce en el mismo lugar donde se consume, eliminando la necesidad de instalar tendidos eléctricos, que suponen un importante costo económico
- Resultan fáciles de integrar y adaptar en las edificaciones rurales.

Pero algunos inconvenientes pueden ser:

- Exige disponer de sistemas costosos de captación.
- Está determinada por las condiciones atmosféricas de las variaciones diarias y estacionales

1.2.1.3. Energía Eólica

El término de energía eólica proviene del griego Eolo, el cual es el nombre del dios griego del viento. Desde la antigüedad el ser humano ha utilizado ésta energía para su uso personal como en: barcos de vela para navegación, molinos para extracción de agua de pozos y recientemente en la generación de electricidad, se estima que de 1 a 2% de la energía proveniente del sol es convertida en energía eólica y se estima que el sol irradia 100 billones de KWh de energía a la Tierra (11).

La fuente de energía eólica es el viento, siendo una transformación de energía cinética de la atmósfera en energía mecánica utilizada para la producción de energía eléctrica mediante aerogeneradores (5-240).

Algunas ventajas de la energía eólica pueden ser:

- No contamina, es inagotable y frena el agotamiento de combustibles fósiles.
- Contribuye a evitar también el cambio climático, pues al generar energía eléctrica no existe proceso de combustión o una etapa de transformación térmica la que supone un procedimiento muy favorable a los problemas de contaminación.
- No produce gases tóxicos.

Algunas desventajas de este tipo de energía pueden ser:

- Dependencia de las condiciones del viento.
- Desde el punto de vista estético, la energía eólica produce un impacto visual inevitable, pudiendo producir una alteración clara sobre el paisaje.

La aplicación de éste tipo de energía ha sido poco explotada en Guatemala, debido a que a pesar de que existen sitios con potencial eólico no se posee la tecnología necesaria para su aprovechamiento. Existieron proyectos para la utilización de ésta energía en áreas rurales del país, además de estudios para determinar dicho potencial, pero hoy en día no están activados.

Caso contrario al de España, en los que el trabajo en el campo de la energía eólica se remonta a la década 1970 en donde el Centro de Estudios de la Energía promovió una serie de estudios encaminados a la construcción de una planta experimental de 100 kW.

El proyecto se inició con un estudio previo de los recursos eólicos realizado en el Instituto de Técnica Aeroespacial (INTA) y desde entonces se han construido muchos parques eólicos, por ejemplo en Tarifa, Cádiz (12).

Desde entonces, la energía eólica en España está creciendo; por lo que debido al potencial eólico español, es claramente uno de los más importantes de Europa, y ha reactivado la economía realizando inversiones para crear nuevas infraestructuras de éste tipo de parques (13-85).

1.2.1.4. Energía Mareomotriz

Esta fuente natural de energía se debe al movimiento de las olas en el mar, y esta ligada a la energía cinética del viento; ya que al cubrir tres cuartas partes de la superficie del planeta los mares y océanos constituyen una gran fuente de energía (5-259).

Este tipo de energía ha estado en movimiento desde hace millones de años cuando se empezó a formar la Tierra, pero no fue hasta 1960 en el estuario del río Rance, en Francia en donde se construyó la primer central de este tipo, con una capacidad instalada de 240 MW y posteriormente una central experimental en el mar de Barentz en Kislaya, antigua Unión Soviética, donde la capacidad instalada fue de 400 kW conectados a la red (5-7).

Las olas se forman únicamente en puntos determinados del planeta y desde ellos se propagan radialmente, algunos de los países que se consideran importantes para el aprovechamiento de este tipo de energía son Canadá, Estados Unidos, Francia, Rusia, Inglaterra, Corea del Sur y también, por su ubicación, las islas de Azores, situadas en las cercanías del Estrecho de Gibraltar y a unos 1800 kilómetros al oeste de él, en donde existe un área ciclónica casi permanente (14-2).

Se estima que la potencia media de las olas globales podría alcanzar hasta 3 TW, sin embargo, su conversión en forma de energía utilizable es técnica y económicamente difícil e implica una gran inversión.

Posee ventajas como:

- Creación de energía limpia.
- Posee una fuente de recurso casi inagotable y con gran potencial de explotación.
- Su producción de electricidad posee bases similares a las de la energía hidroeléctrica.

Pero entre sus desventajas se pueden mencionar:

- El alto costo de inversión inicial.
- Requiere de estructuras bastante sólidas, que soporten la fuerza del mar, complejas y costosas, para proporcionar la estabilidad hidrodinámica necesaria y así obtener un rendimiento razonablemente alto.

1.2.1.4.1. Energía térmica mareomotriz

La conversión de energía térmica mareomotriz es un método de convertir en energía útil la diferencia de temperatura entre el agua de la superficie y el agua que se encuentra a 100 m de profundidad. En las zonas tropicales como las costas de Guatemala ésta diferencia varía entre 20 y 24° C, siendo suficiente una diferencia de 20° C para su aprovechamiento. Las posibilidades de esta técnica se han potenciado debido a la transferencia de tecnología asociada a las explotaciones petrolíferas fuera de la costa (14-5).

Las posibilidades de futuro de la energía térmica mareomotriz no son de consideración como fuentes eléctricas, por su baja estabilidad.

1.2.1.5. Energía Geotérmica

La energía geotérmica está considerada como un tipo de energía no convencional, y se presenta como una fuente de calor en forma de agua caliente o vapor de agua en alta temperatura, producida en el interior de la tierra en zonas activas de la corteza terrestre. Este calor producido es debido al resultado de desintegraciones radio activas en el núcleo de la tierra; las cuales pueden ser aprovechadas para la producción de energía eléctrica para un desarrollo energético futuro en el autoabastecimiento energético (5-289).

En la actualidad los países que están produciendo electricidad a partir de las reservas geotérmicas son Estados Unidos, Nueva Zelanda, Italia, México, las Filipinas, Indonesia y Japón (15), pero la energía geotérmica está siendo también utilizada en muchos otros países, como un recurso natural para los países en vías de desarrollo, tal es el caso de Guatemala que con 33 MW instalados a su red eléctrica la utiliza ya como una alternativa a los sistemas de energía convencionales, basados en el petróleo. Otro caso importante es el Salvador que para 1985 ya tenía 95 MW instalados y para 2001 ha crecido de manera notable hasta alcanzar una capacidad de 161.20 MW, siendo el país Centroamericano con mayor capacidad instalada en este tipo de energía (7-42).

Posee ventajas como:

- Constituye una fuente de energía natural.
- Puede ser un recurso natural bien utilizado para los países en desarrollo.
- Para su aprovechamiento no se requieren grandes extensiones de terreno.

Entre sus desventajas se puede mencionar:

- Elevado costo al principio para determinar el potencial geotérmico y su duración.
- No hay muchos lugares donde la energía geotérmica puede usarse como una fuente de energía.
- Debe haber la certeza de que exista una cantidad segura de magma.

La utilización principal de ésta fuente natural de energía es la producción de energía eléctrica.

1.2.1.6. Energía de la Biomasa

La biomasa vista desde el punto de vista energético se define como la materia orgánica, de origen vegetal o animal, incluyendo los materiales procedentes de su transformación natural o artificial; los cuales son susceptibles de ser utilizados con fines energéticos (16-13).

Los desechos orgánicos son utilizables, principalmente, mediante transformaciones químicas, siendo conocidas las aplicaciones en digestores anaerobios para desechos orgánicos y la producción de biogás procedente de residuos sólidos urbanos. Sin embargo, la creciente innovación tecnológica de materiales y equipos está afianzando nuevos sistemas de aprovechamiento de los residuos ganaderos y forestales, y consolida una buena perspectiva a futuro en la línea de los biocombustibles, de modo que pueda ser compatible una agricultura sostenible con un diseño de producción energética con miras ambientales.

La biomasa, al igual que el resto de las energías renovables (salvo la geotermia) provienen de la energía solar. En términos generales se puede plantear el aprovechamiento de la biomasa sólida destinándola a aplicaciones térmicas, en forma líquida se destinaría a su utilización en motores de vehículos y los derivados gaseosos de la biomasa a la producción de electricidad en sistemas de cogeneración (16-11).

El aprovechamiento de la biomasa actualmente en Guatemala lo realiza la industria azucarera la cual utiliza el bagazo de la producción de azúcar, como combustible para producción de energía eléctrica, por medio de la quema en calderas. Hasta el 2003 se tenía una capacidad instalada de 200.7 MW, los cuales se ampliarán por proyectos referentes al aprovechamiento de éste recurso.

De acuerdo a sus aplicaciones, la energía de la biomasa se divide en dos grupos generales; de estos, el primero está orientado hacia las aplicaciones domésticas e industriales consideradas como tradicionales o comunes y el otro grupo constituye las aplicaciones recientes de estudio que conllevan a técnicas de transformación de materia para usos energéticos, con fines económicos y de política ambientalista.

Algunas de sus ventajas son:

- Recurso regenerativo cultivable en países en vías de desarrollo.
- Actualmente está cobrado interés mundial.
- Posee gran variedad de recursos.
- Tratamiento de desechos urbanos consiguiendo limpieza ambiental.

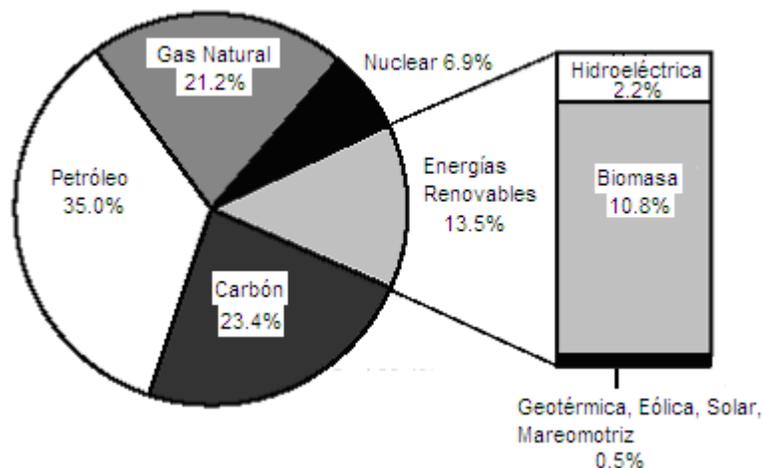
Como desventajas comunes de la biomasa se pueden citar:

- No es en todos los casos uniforme y posee baja densidad, por lo que se debe producir cerca de su lugar de utilización para minimizar el recorrido en transporte.
- El costo inicial puede ser económicamente alto.

1.3. Situación Mundial

En el mundo está creciendo la necesidad de energías renovables para contrarrestar la utilización de la energía a partir de combustibles fósiles, a pesar de que actualmente la energía renovable crece a pasos agigantados aún ocupa un porcentaje bajo respecto de las fuentes de energía convencional, teniendo los siguientes datos según la Agencia Internacional de Energía (AIE) en la Reserva de Energía Primaria Total (TPES), el cual refleja en la Figura 1 la siguiente utilización energética a principios de siglo (17-6):

Figura 1 Porcentaje de Energía Primaria Total Mundial (TPES) 2001 (18-3)



Fuente: Renewables information, Página 3.

La estadística actual mostrada en la Tabla I permite mostrar una diferencia del 72.80% entre la energía convencional y la energía renovable, pero se estima que la producción de energía eléctrica a partir de recursos renovables crezca mundialmente (18-3).

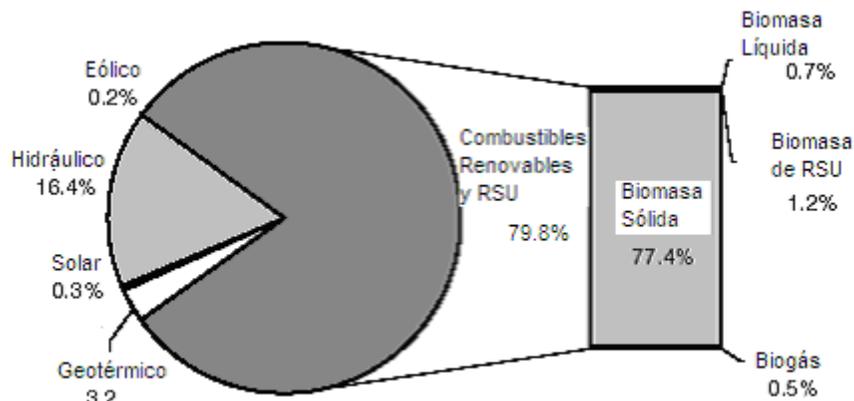
Tabla I Consumo de Energía Primaria Total Mundial (TPES) 2001

Tipo de Energía según TPES	Porcentaje Anual Mundial
Carbón, Petróleo, Gas Natural y Nuclear	86.40%
Hidroeléctrica	2.2%
Biomasa	10.9%
Solar Fotovoltaica, Solar Térmica, Geotérmica, Eólica, Mareomotriz	0.5%

Fuente: Renewables information, Página 3.

Con los valores actuales de los tipos de energía se ve la clara situación de las energías renovables a nivel mundial; ésta situación está cambiando rápidamente y cada año los países del primer mundo desarrollan proyectos nuevos enfocados al desarrollo sostenible utilizando recursos renovables como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Porcentaje Mundial de Energía Renovable (18-3) 2001



Fuente: Renewables information, Página 3.

Los porcentajes mundiales expuestos anteriormente reflejan las porciones de combustibles fósiles que se utilizan actualmente y la energía renovable que se dispone en la actualidad, gráficamente se expone la distribución a nivel mundial.

1.4. Situación en Centro América

Actualmente Centro América intenta unificar criterios energéticos, y con la participación integral de los países del Istmo en el proyecto Plan Puebla Panamá (PPP) se intenta consolidar el ámbito de desarrollo, siendo uno de los más importantes el de la conexión de la red eléctrica Centro Americana con más de 300 MW de potencia a intercambiar entre 8 países y 1,830 kilómetros en líneas de transmisión (19-16).

De los 32 millones de habitantes de Centro América, cerca de 12 millones no tienen acceso a servicios de energía modernos. Es probable que la población se duplique en los próximos 15 a 18 años, para alcanzar 70 millones de habitantes (20-2).

Un estudio publicado en el 2002 por la AIE informa acerca de la proporción relativa de las energías renovables en la Reserva de Energía Primaria Total (TPES) en la región Centro Americana, indicando lo siguiente (20-2):

- La fracción de energías renovables en la TPES, se extiende desde cerca de un 28% en Panamá, hasta 42% en Costa Rica y porcentajes aún más altos en el norte de la región como en Guatemala, Nicaragua y Honduras. Solamente El Salvador presenta valores menores por el orden del 5% debido a sus limitaciones geográficas y de recursos.

- La fracción de energías renovables en la TPES incluyendo solamente los componentes hidroeléctrico, geotérmico, eólico y solar de las energías renovables varía a través de la región. Costa Rica, con un porcentaje cerca de 31.20%, tiene una presencia más significativa de energía hidroeléctrica, geotérmica y eólica en la TPES. Mientras que en el resto de países: El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua y Panamá, el porcentaje de energías renovables está en un rango desde un 2.60% hasta un 10%.

A principios de éste siglo, el consumo total de electricidad en la región Centro Americana fue cercano a los 28,000 GWh, de los cuales el 48.90% fue hidroeléctrico, 8% geotérmico, 42.40% fue generación térmica basada en combustible fósil y el 0.70% restante fue eólico o bien cogeneración con biomasa producido en la industria azucarera (20-2).

La capacidad instalada de la región para la producción eléctrica en 2001 fue de 7,399.20 MW, de los cuales el 50.30 % fue obra de inversión del sector privado de la región y el 49.70% fue capacidad de suministro basado en los recursos energéticos renovables del Istmo.

En el mismo año, la estructura de la generación eléctrica fue diferente en cada país; Costa Rica, se sitúa como el país con mayor parque de generación de energía renovable con un 98.40% de su generación total, seguida por El Salvador con un 53.10%, Panamá se sitúa con un 48.60%, Honduras sigue con un 48%, Guatemala con un 42.50 % y por último se encuentra Nicaragua con un 16.50%.

PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS PROCEDENTE DE
VERTEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

La capacidad actual instalada en los países Centroamericanos se muestra en la Tabla II y la demanda de la región Centro Americana continúa creciendo anualmente y se estima que su crecimiento sea del 5 al 6% anual. Por ésta tendencia se espera que para el 2014, el consumo de energía sea de 77,000 GWh, es decir que crezca 2.75 veces el nivel de consumo de electricidad en el 2001 (20-2).

Tabla II. Capacidad Instalada en Centro América, Sistemas Nacionales Interconectados 2001 (7-3)

Concepto	Unidad	Total Istmo	Costa Rica	El Salvador	Guatemala	Honduras	Nicaragua	Panamá
Capacidad Instalada	MW	7,399.20	1,718.90	1,191.90	1,672.10	921.50	633.20	1,261.70
Hidroeléctrica	MW	3,310.40	1,225.50	407.40	524.90	435.20	103.40	614.10
Geotérmica	MW	409.20	145.00	161.20	33.00	-	70.00	-
Térmica	MW	3,617.40	286.20	623.30	1,114.20	486.30	459.80	647.60
Eólica	MW	62.30	62.30	-	-	-	-	-
Capacidad Instalada Pública	MW	3,675.20	1,499.50	557.00	622.90	502.40	342.00	151.50
Capacidad Instalada Privada	MW	3,724.00	219.40	634.90	1,049.20	419.10	291.20	1,110.20
Demanda Máxima	MW	4,954.90	1,136.90	734.00	1,074.60	758.50	411.60	839.30

Fuente: Istmo Centroamericano, Página 3.

Para el 2005 la tendencia de crecimiento centroamericano en la producción de energía eléctrica será de 2,000 MW en potencia instalada; para lo que el 62% de ésta capacidad vendrá de combustibles fósiles de acuerdo con planes de expansión actuales del gobierno y de inversión privada y el resto será de energía renovable principalmente hidroeléctrico y geotérmico para un total de 760 MW (20-3).

A largo plazo, para el período 2006-2014, se estima que incrementos de capacidad de 5,000 MW a 5,700 MW serán necesarias. Diferentes modelos de simulación usados por el Consejo de Electrificación de América Central (CEAC) para este período indican una participación de recursos energéticos renovables del 50 al 63%, implicando que las inversiones anuales en proyectos de energía renovable deben, por lo menos, ser del orden de los 300 a 350 MW en la región, comparado a la tendencia actual de cerca de 160 MW por año (20-3).

1.4.1. Administración y Estructura Energética Renovable

El sector eléctrico en Centro América ha sufrido reformas que implementan contratos de compra y venta de energía (PPA por sus siglas en inglés); y se han reestructurado las negociaciones en el sector eléctrico en el cual se empieza a implementar un Mercado Eléctrico Regional (MER) en el Istmo, en donde a principios de siglo existían los mercados eléctricos en Guatemala, Nicaragua, El Salvador y Panamá. Solo Costa Rica y Honduras no han implementado éste tipo de acuerdos de mercado eléctrico abierto.

Existe una variedad de acuerdos de mercado e instituciones en el sector en toda la región. Cada país posee su propio operador del Sistema Eléctrico y del Mercado Mayorista de Electricidad (MME), definiendo a sus agentes o participantes como productores, comercializadores, grandes usuarios, distribuidores, transportistas y agentes externos. En Guatemala la entidad que se encarga de la coordinación en la operación de las centrales generadoras, interconexiones y la libre contratación de energía eléctrica entre los participantes del Mercado Mayorista es el Administrador del Mercado Mayorista (AMM) el cual posee el mayor número de participantes en la región con 75 (21).

El Mercado Mayorista de Energía Eléctrica en El Salvador lo administra la Unidad de Transacciones (UT) con 26 participantes; en Nicaragua el MME es administrado por el Centro Nacional del Despacho de Carga (CNDC) y posee 12 participantes. Por su parte Panamá administra su MME la Empresa de Transmisión Eléctrica, S.A. (ETESA) a través del Centro Nacional de Despacho (CND), contando con 15 participantes. Costa Rica es un país que no posee un Mercado Mayorista de Electricidad, funcionando como un servicio integrado con un alto número de Productores Independientes de Energía que en su mayoría son de energía renovable y Honduras tampoco posee administración del MME, funcionando con el servicio estatal y producción eléctrica privada (20-3).

La estructura renovable de Centro América posee un amplio potencial de recursos energéticos renovables, de los cuales actualmente se explotan en el Istmo los siguientes (20-4):

Recursos Hidroeléctricos que pueden ser considerados grandes y medianos pudiendo representar una potencia en la región de hasta 20,000 MW. Pero su uso actual se puede considerar pequeño, con una capacidad actual instalada de un poco mas de 3,400 MW. Este tipo de recurso ha sido de gran interés de los productores de electricidad del sector privado y sigue siendo el más explotado en la actualidad.

Recursos Eólicos que son asociados a los vientos tropicales, debido a gradientes de temperatura, en Centroamérica podría haber disponibilidad de hasta 410 MW en un nivel de desarrollo experimental. Actualmente el único país centroamericano que posee éste tipo de instalaciones conectados a su sistema es Costa Rica, que posee 66 MW.

La Energía Solar en la región ha sido motivo de estudio desde hace ya varios años especialmente en relación con los niveles radiación en superficie horizontal.

La disponibilidad de éste recurso en la región es útil para muchas aplicaciones de la energía solar, tanto fotovoltaica como térmica. Informes indican que el mercado fotovoltaico es muy productivo instalando anualmente de 300 a 400 KW, en áreas rurales debido a la falta de acceso de la energía eléctrica convencional. La mayoría de estos sistemas son independientes y gran parte de ellos son financiados por capital extranjero de Organizaciones No Gubernamentales que ayudan a cubrir necesidades básicas de energía.

Los Recursos Geotérmicos actualmente producidos en la región alcanzan un poco mas de 400 MW en los sistemas de electricidad. El potencial para algunos campos geotérmicos está por los 3,000 a 5,000 MW abarcando todos los países.

Los Recursos de la Biomasa son estudiados extensivamente como parte del desarrollo de balances energéticos para los países, actualmente su mayor aplicación se encuentra en la agroindustria azucarera, la cual está invirtiendo en su infraestructura para el aprovechamiento del bagazo de la caña de azúcar para su producción de energía eléctrica y al crecer a pasos agigantados se espera que a corto plazo se posea una capacidad por el orden de los 100 a 300 MW integrados a red eléctrica del istmo.

Los marcos de la política energética están comenzando a incluir los necesarios aspectos de sostenibilidad requeridos para definir y usar instrumentos de “formulación de política”, como leyes y reglamentos.

1.4.2. Problemática de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

En Centroamérica el problema de los residuos sólidos urbanos ha llegado a magnitudes casi incontrolables, debido a la poca cultura y educación relacionada con la recolección y tratamiento de la basura en la mayoría de habitantes de la región; adquiriendo una dimensión de carácter de emergencia nacional en cada país.

En la mayoría de poblaciones, incluyendo todas las capitales Centro Americanas se depositan los residuos sólidos urbanos en vertederos no controlados y ubicados a cielo abierto o al aire libre, de los cuales existen vertederos autorizados y vertederos clandestinos. Un fenómeno común es el de la alta producción o generación de desechos, propio de la sociedad actual, que se sitúa como un desafío a controlar por cada gobierno que por falta de recursos económicos y de planes oficiales para un tratamiento adecuado de los residuos recae en contaminación, nubes de humo negro, gases tóxicos como el metano, enfermedades y otras consecuencias que se resumen en contaminación ambiental.

El patrón de colecta, deposición y tratamiento de los RSU es prácticamente el mismo en la mayoría de países del Istmo y coincide con los mismos problemas de manejo de los RSU, los cuales son recolección, transporte, disposición, reciclaje y posible utilización futura, además de barrancos que hacen la función de vertederos abiertos, algunos reciben hasta 500 toneladas de desechos diarios o más, los cuales se reciclan artesanalmente por recolectores particulares. Y en la mayoría de los casos la basura no es tratada, apenas es cubierta con tierra, lo que permite que los lixiviados puedan filtrarse en los desagües del fondo de los mal llamado rellenos sanitarios.

Una definición teórica de relleno sanitario es *la técnica de eliminación final de los desechos sólidos en el suelo, que no causa molestia ni peligro para la salud y seguridad pública, tampoco perjudica el ambiente durante su operación ni después de terminado el proceso* (22-146).

La problemática de los RSU ha llamado la atención internacional y ha adquirido actualmente relevancia en organizaciones como en la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y en la Organización Mundial del Comercio (OMC) en donde se han abordado aspectos relativos a su conceptualización y clasificación, además de lo referente a la negociación de servicios y bienes de la infraestructura para los RSU.

En la actualidad el tema de los servicios ambientales presenta una serie de interrogantes, propuestas, dudas prácticas, espacios en las instituciones, limitaciones legales y un sin fin de problemas que se intentan resolver. A esto se suma las limitantes que, como países en vías de desarrollo, se deben afrontar, especialmente en cuanto a disponibilidad de información técnica actual, falta de personal, recursos técnicos y financieros, así como estudios especializados.

De tal manera en la actualidad se pretenden mejores servicios en las poblaciones tales como:

- Alcantarillado, tratamiento y eliminación de aguas residuales y fosas sépticas.
- Recolección, transporte, tratamiento y eliminación de desechos o residuos sólidos urbanos.
- Limpieza de gases de combustión, control de contaminantes del aire provenientes de fuentes móviles o estáticas generalmente producidas por la combustión de fósiles.

La producción de los desechos sólidos está generando una creciente demanda de los servicios municipales de limpieza, principalmente en las ciudades mas densamente pobladas. Las Municipalidades Centroamericanas, en general, no cuentan con el equipo adecuado o necesario, ni con la infraestructura pertinente para prestar este servicio y cumplir con las normas técnicas internacionales existentes en tal materia.

Expertos sobre el tema indican que del total de desechos sólidos depositados en vertederos, se colecta el 49% de los RSU y, de este porcentaje, se calcula que un 75% provienen del sector domiciliario y el 25% restante del comercio, hospitales e industria. En cada capital Centro Americana se puede generar hasta el 61% o más de la basura total de cada país (22-37).

En la problemática de la gestión de los desechos sólidos, se estima que los municipios recogen menos del 50% de los desechos y los depositan en un botadero o algún tipo de vertedero autorizado que normalmente ya ha sobrepasado su vida útil, el resto es depositado en botaderos ilegales los cuales se improvisan. Es común referirse como “botadero controlado” a aquel donde llega la basura, es clasificada de alguna forma y luego de ser triturada, se le echa tierra (22-104).

Este método de disposición final de la basura es en el 98% a cielo abierto, un 13% de estos depósitos no cumplen con los requisitos sanitarios básicos, y se puede decir que se encuentran en estatus de ilegalidad en cuanto al cumplimiento de normas ambientales de funcionamiento. Así mismo se presentan problemas como la ubicación cercana a la población, falta de tratamientos adecuados, carencia de segregación entre desechos sólidos urbanos y los peligrosos o tóxicos, y de la clasificación de basura orgánica e inorgánica

Las municipalidades pueden llegar a gastar en éste concepto hasta 6 millones de USD anuales (22-86), por lo que se ha buscado apoyo en el Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Debido a que la responsabilidad de la recolección, el tratamiento y la disposición, del manejo en general, de desechos sólidos recae en ellas, las cuales se saturan y endeudan por la prestación del servicio.

En algunas municipalidades, generalmente con escasos recursos, se subcontrata a una empresa privada. En la mayoría de los casos ésta no posee el equipo ni la técnica adecuada para realizar el servicio de recolección, tratamiento o disposición de desechos sólidos domésticos. A esto se suma la falta de supervisión y estricto control de parte de la municipalidad a la empresa que presta el servicio.

1.5. Situación en Guatemala

1.5.1. Situación Actual de la Generación de Energía Eléctrica

Actualmente Guatemala posee en su parque de generación la hidroeléctrica, turbina de vapor y de gas, motores de combustión interna, biomasa en calderas de Ingenios Azucareros y plantas geotérmicas, con los valores mostrados en la Tabla III (21):

Tabla III. Capacidad Instalada en el parque generador de Guatemala 2003

Tipo de Generación	Cantidad de Generadoras	Potencia en MW Datos de Placa	Potencia en MW Valores Efectivos
Hidroeléctricas	16	582.70	511.90
Turbinas de Vapor	4	195.00	174.90
Turbinas de Gas	9	218.50	187.30
Motores de Combustión Interna	10	648.50	610.20
Biomasa	8	200.70	182.70
Plantas Geotérmicas	2	36.70	33.00

Fuente: AMM, 2004.

Debido al tipo de parque generador que actualmente se posee en Guatemala se contempla desde hace algún tiempo generación alternativa que ayude a la sostenibilidad del medio ambiente y a reforzar la economía.

En la actualidad existen planes de interconexión de la red eléctrica con los países vecinos como México con la construcción de una de línea de transmisión en 400 KV entre las subestaciones de Tapachula (México) y Brillantes (Guatemala); con Belize se tiene la construcción de la línea de transmisión de 230 KV entre las subestaciones de Santa Elena (Guatemala) y Belize City (Belize) y la interconexión eléctrica con Honduras construyendo la línea entre las subestaciones de Panaluya (Guatemala) y Río Lindo (Honduras) (19-21).

Por su parte el marco regulatorio guatemalteco comprende de Leyes en Decretos aprobados por el Congreso de la República, Reglamentos avalados por Acuerdos Gubernativos, Resoluciones de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) y Normas Técnicas resueltas por el Administrador del Mercado Mayorista (AMM), como se muestran en la Tabla IV entre las que se citan las del Marco Legal para las actividades en el sector eléctrico guatemalteco las cuales comprenden la generación, la transmisión, la distribución y la comercialización de energía eléctrica (21):

Tabla IV. Marco Energético Legal Actual Guatemalteco (21, 23, 24)

Ley, Reglamento, Resolución o Norma	Decreto, Acuerdo Gubernativo o Resolución	Objetivo
Ley General de la Electricidad	DECRETO No. 93-96	Poseer un instrumento legal que establece las normas jurídicas fundamentales que facilitan la actuación de los diferentes sectores del sistema eléctrico y la optimización del crecimiento del subsector.
Reglamento de la Ley General de Electricidad	ACUERDO GUBERNATIVO NUMERO 256-97	Establecer normas en forma reglamentaria, para cuya finalidad es procedente dictar las respectivas disposiciones legales
Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista	ACUERDO GUBERNATIVO NUMERO 299-98	Establecer normas fundamentales que permitan el abastecimiento suficiente y confiable del servicio de energía eléctrica con precios accesibles a la población, garantizando su desarrollo económico y social.

Continuación Tabla IV

Ley, Reglamento, Resolución o Norma	Decreto, Acuerdo Gubernativo o Resolución	Objetivo
Resoluciones CNEE	Resolución CNEE 48-2000 Resolución CNEE 52-2000	Cumplir y hacer cumplir las leyes del sector eléctrico.
Normas de Coordinación Comercial (NCC)	Resoluciones AMM Nos. 157-01, 216-01, 216-02, 157-02, 217-01, 157-04, 157-05, 216-04, 157-06, 300-01, 157-08, 157-09, 157-10 y 307-02	Establecer parámetros en la normativa de comercialización de energía eléctrica.
Normas de Coordinación Operativa (NCO)	Resoluciones AMM Nos. 157-12, 157-13, 157-14, 157-15 y 157-16	Establecer parámetros de operación de energía eléctrica.
Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD)	Resolución CNEE No. 09-99	Establecer derechos y obligaciones de los prestatarios y usuarios del servicio de distribución, así como los índices e indicadores de referencia para calificar la calidad del servicio de distribución.
Normas de Estudios de Acceso al Sistema de Transporte (NEAST)	Resolución CNEE No. 28-98	Establece el contenido de los estudios eléctricos para sistemas de potencia de instalaciones nuevas, para solicitar autorización a la CNEE.
Normas Técnicas de Acceso y Uso de la Capacidad de Transporte (NTAUCT)	Resolución CNEE No. 33-98	Establece el tipo y contenido de los estudios eléctricos necesarios para solicitar el acceso al sistema de transporte de la CNEE.
Normas Técnicas de Diseño y Operación de las Instalaciones de Distribución (NTDROID)	Resolución CNEE No. 47-99	Establecer las disposiciones, criterios y requerimientos de diseño para asegurar el adecuado funcionamiento de las instalaciones de distribución.
Normas Técnicas de Diseño y Operación del Servicio de Transporte de Energía Eléctrica (NTDOST)	Resolución CNEE No. 49-99	Establecer los requerimientos para el diseño y operación de las instalaciones de transporte.
Normas Técnicas de Calidad del Servicio de Transporte y Sanciones (NTCSTS)	Resolución CNEE No. 50-99	Establece los índices de referencia para calificar la calidad del servicio de transporte de energía eléctrica en el punto de entrega.

Fuente: CNNE, 2004.

La estructura energética guatemalteca es una de las más fuertes en Centro América y esto ayuda al país a generar constantemente nuevos proyectos a corto o mediano plazo. Sus principales objetivos son conectarse al Sistema Nacional Interconectado (SNI), brindando un excelente servicio. Un reto importante actual en Guatemala ha sido la promulgación de una nueva ley que promueve el recurso propio de fuentes inagotables de energía, con la cual se desgravan impuestos haciendo atractiva la inversión inicial en proyectos relacionados con las energías renovables.

1.5.2. Problema actual de los Residuos Sólidos Urbanos

En 1960 se empezó a utilizar el barranco entre las zonas 3 y 7 como botadero de los desechos de la Ciudad de Guatemala. Allí se encuentra hoy el único relleno sanitario autorizado por la Municipalidad.

La Municipalidad calcula que en la ciudad se producen, aproximadamente de 1,500 a 2,000 toneladas de basura al día, pero en el relleno sanitario sólo se deposita el 70%. El resto de desechos se deposita en más de 500 basureros clandestinos o no autorizados (25-140).

A nivel del país, la disposición de los RSU en los 331 municipios, son en rellenos sanitarios, actualmente 15; botaderos controlados, 59 y botaderos a cielo abierto 219. El problema actual, en la mayoría estos botaderos es su ubicación, pues están distribuidos de la siguientes manera, en ríos, 35; en barrancos, 187; en planicies, 86 y en otros sitios, 23; por ejemplo a un costado de una carretera. Además de que existen los siguientes problemas: incendios en 109, plagas en 135, contaminación de mantos freáticos, y otros problemas en el resto (26-2).

En el relleno sanitario de la Ciudad de Guatemala hay cientos de personas que trabajan durante doce horas al día entre toneladas de basura, en busca de materiales que puedan vender a empresas que luego los reciclarán. Ellos se especializan en la recolección de materiales como aluminio, papel, vidrio, cartón o plástico.

El botadero es como un mercado, donde se venden y compran bienes y servicios de diversos tipos; donde hay cientos de mini empresarios cuyo negocio implica recolectar y vender materiales.

Otros se dedican a almacenar el material, por lo que es acumulado hasta que llegan los compradores con camiones y lo llevan a reciclar. En el caso de los metales, una buena parte se exporta para ser reciclado en el extranjero.

El Departamento de Limpieza de la Municipalidad de Guatemala se encarga de recolectar todos los desechos sólidos en las vías públicas, mercados, escuelas, dispensarios, hospitales y parques de la ciudad. Para cumplir con su misión, el Departamento cuenta con un sistema de transporte como camiones recolectores y más de 350 trabajadores que hacen barrido manual .

La Municipalidad recolecta, del 70% total de los desechos depositados en el relleno, aproximadamente el 33% y el restante 67% lo recolectan empresas privadas, los que cuenta con mas de 330 camiones autorizados para llevar la basura que extraen de casas particulares, empresas e industrias; organizados en cuatro organizaciones gremiales de extractores de basura (26-2).

1.6. Visión a Futuro de los Recursos Renovables en Guatemala

Uno de los principales mecanismos para el desarrollo económico, social y ambiental en los países en vías de desarrollo es la electricidad. Este tema es en Guatemala actualmente responsabilidad del Estado, que por medio del Ministerio de Energía y Minas (MEM) en el ámbito energético y por medio del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) en el medio ambiente han unificado esfuerzos para responsabilizarse por este desarrollo. A finales del mes de Noviembre de 2003 se llevó a cabo la XVI Reunión del Foro de Ministros de Medio Ambiente de América Latina y el Caribe, en Panamá; en donde también por medio del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), se consensó la generación sostenible de energía eléctrica y la expansión de las fuentes de energía renovable ya existentes (27-2).

Este foro reafirma la tendencia guatemalteca de la necesidad de energías alternativas, la cual se plasma en Octubre de 2003 en el Decreto 52-2003, por medio de la aprobación de la *Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable* por el Congreso de la República. La ley fue preparada por el Ministerio de Energía y Minas y provee incentivos económicos y fiscales, tales como la exención en el pago de impuestos de importación sobre equipo necesario para construir proyectos de generación de energía eléctrica utilizando recursos renovables, así como varios niveles de exención en el pago de impuestos de compañías e individuos que implementen tales proyectos, incluyendo una exención de diez años sobre el pago de impuesto sobre la renta. Se espera que esta nueva ley equilibre las condiciones para proyectos de energías renovables que están en competencia con proyectos basados en combustibles fósiles que reciben otro tipo de incentivos (28-3).

Esta iniciativa de ley obedece al potencial de fuentes renovables que se estima posee Guatemala; en la energía Hidroeléctrica se estima un potencial aproximado de 5,000 MW, del cual actualmente solo se utiliza el 11%, en el recurso geotérmico se considera un potencial de 1,000 MW, cuyo aprovechamiento es solo del 3% y en el potencial biomásico se puede ampliar a más pero solo se posee un parque de 200 MW. En la energía solar fotovoltaica se poseen pequeños sistemas conectados de forma independiente, en el año del 2003 se instalaron alrededor de 243 sistemas aislados en comunidades rurales, y por ser proyectos privados no se posee un dato específico de capacidad; referente a la energía eólica se poseen sistemas aislados en los departamentos de Huehuetenango con un total de 3,800 W, en Zacapa con 850 W, en El Progreso con 1,500 W y se encuentran en fase de factibilidad y pre-factibilidad alrededor de 31.2 MW en Escuintla, Zacapa y San Marcos (10).

Con el afán de plantear iniciativas de proyectos se han planificado una serie de actividades para realizarse y darle seguimiento durante el período 2004 a 2005, con la ayuda de conjunta entre los ministerios del MEM y MARN con organizaciones internacionales.

Con la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) apoyando al Estado se fortalecen las políticas energéticas cuyo objetivos principales son mejorar las condiciones de sostenibilidad ambiental, mejorar el desarrollo de la economía nacional, realizar estudios, ejecutar proyectos y, en general, brindar toda la ayuda necesaria.

Se ha fundado el Centro de Información y Promoción de Energías Renovables y conjuntamente con ayuda del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) se tiene la iniciativa de la Evaluación de Recursos y Energía Solar y Eólica (SWERA por sus siglas en inglés) y también está el Desarrollo de Capacidades para el Mecanismo de Desarrollo Limpio. Por parte del Banco Mundial (BM) se tiene el siguiente proyecto en preparación por el Prototipo Fondo de Carbón (PCF): Energía Hidroeléctrica en Río Hondo Guatemala; y por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) se tiene el Proyecto en Etapa de Ejecución: Desarrollo de Recursos Geotérmicos para Proyectos de Generación de Electricidad. Además se tienen contempladas, al menos, la construcción de 7 centrales hidroeléctricas más y 3 campos geotérmicos; además de proyectos con capital privado y proyectos con capital de organizaciones de ayuda humanitaria (27-8).

2. EL BIOGÁS

2.1. ¿Qué es el Biogás?

Se sabe que el hombre conoce desde la antigüedad la existencia del biogás, ya que éste se produce en forma natural en los pantanos, de allí que se le ha llamado también “gas de los pantanos”.

En el año de 1808 Humphry Davy produce por primera vez gas metano, principal componente del biogás, en un laboratorio. Se toma éste acontecimiento como el inicio de la investigación en el biogás. Desde esos días hasta la actualidad se ha avanzado e investigado sobre el tema y actualmente se cuenta con instalaciones que van desde la pequeña escala doméstica hasta las aplicaciones agroindustriales y energéticas.

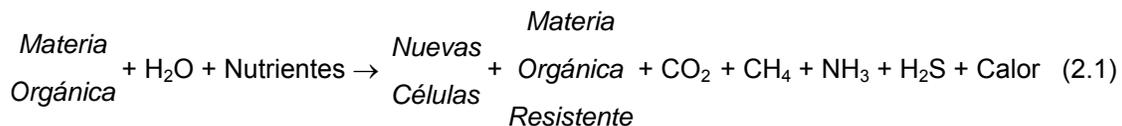
China es el país que ha llevado a la práctica el uso del biogás en una mayor escala; desde años atrás utilizan el biogás para cubrir necesidades de cocción e iluminación, a la vez que recuperan suelos degradados a través de siglos de cultivos. Otro país que ha hecho uso de éste gas es la India y, actualmente, Holanda, España, Noruega, Estados Unidos y Argentina investigan los complejos fenómenos bioquímicos que ocurren a través de los procesos de formación del biogás desarrollando todo tipo de proyectos.

El biogás es un combustible incluido dentro del conjunto de la biomasa, que en el caso del biogás de vertedero está constituido por un conjunto de gases formados como subproductos de la descomposición de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en condiciones anaeróbicas (fermentación en ausencia de oxígeno).

En un relleno sanitario, conocido también como vertedero controlado, la cantidad de gases producidos y su composición dependen del tipo de residuo orgánico, de su estado y de las condiciones del medio que pueden favorecer o desfavorecer el proceso de descomposición.

La descomposición de la materia orgánica en los vertederos controlados, que se realiza por la actividad microbiana anaeróbica, genera diversos subproductos, entre ellos el biogás. Por tanto, condiciones favorables de medio para la supervivencia de los microorganismos anaeróbicos pueden desarrollarse a temperaturas de entre 10 y 60 °C, teniendo su mejor desarrollo entre 30 y 40 °C, rango Mesofílico, o entre 50 y 60 °C, rango Termofílico. El pH entre 6.5 y 8.5 permite un buen desarrollo de los microorganismos teniendo su desarrollo óptimo entre 7 y 7.2 para el rango Mesofílico (29-7).

Los componentes principales del biogás son el Metano (CH₄) y el Dióxido de Carbono (CO₂), en proporciones aproximadamente iguales, constituyendo normalmente más del 97% del mismo (Ecuación 2.1)(30-110). Ambos gases son incoloros e inodoros, por lo que son otros gases, como el Ácido Sulfhídrico (H₂S) y el Amoníaco (NH₃) los que le otorgan el olor característico al biogás y permiten su detección por medio del olfato.



El gas metano se produce en los vertederos controlados en concentraciones dentro del rango de combustión, lo que confiere al biogás ciertas características de peligrosidad por riesgos de incendio o explosión y, por ésta razón, la necesidad de mantener un control sobre él.

2.2. Composición del Biogás

El biogás es una mezcla de gases, compuesta principalmente de Metano (CH₄) y Dióxido de Carbono (CO₂), pero también se encuentran otros gases en menores proporciones como Hidrógeno (H₂), Sulfuro de Hidrógeno (H₂S), Amoníaco (NH₃), Monóxido de Carbono (CO), Nitrógeno (N₂) y Oxígeno (O₂). Una muestra de las mismas se puede observar en la Tabla V (30-431).

Tabla V Compuestos Típicos del Biogás

Componente	Porcentaje Aproximado (%)
Metano (CH ₄)	45 a 60
Dióxido de Carbono (CO ₂)	40 a 60
Nitrógeno (N ₂)	2 a 5
Oxígeno (O ₂)	0.1 a 1.0
Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S)	0 a 1.0
Amoníaco (NH ₃)	0.1 a 1.0
Hidrógeno (H ₂)	0 a 0.2
Monóxido de Carbono (CO)	0 a 0.2
Constituyentes en Cantidades Traza	0.01 a 0.6

Fuente: George Tchobanoglous, Gestión Integral de Residuos Sólidos, Página 431.

El CH₄ es la base energética del biogás, el CO₂ es el segundo componente de importancia, siendo un componente no energético su proporción es función de la naturaleza del influente y/o de la técnica empleada en la fermentación (31-94).

El N₂ se debe a filtraciones de aire exterior en la fermentación o a arrastres por el influente, el O₂ es igualmente por filtraciones de aire, su presencia resulta tóxica para las bacterias metanógenas, su exceso en el biogás acarrea potenciales peligros de explosividad para concentraciones altas comprendidas entre 8 y 20% del volumen total (31-94).

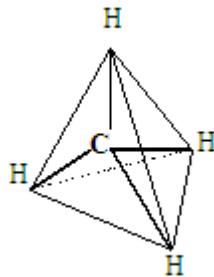
El H₂S es un gas combustible, pero su gran inconveniente es su alto poder corrosivo al formarse ácido sulfúrico en la mezcla con H₂O y toxicidad a partir de cierta concentración. La existencia de amoníaco es señal de que existe O₂ en el proceso y por lo tanto que se ha producido un proceso aerobio.

El H_2 es un componente energético, el cual denota una fermentación no estabilizada y poco optimizada al presentarse en exceso. Además se posee vapor de agua el cual es importante contaminante del biogás al mezclarse con el H_2S .

2.2.1. Metano

El metano es el resultado de la unión de un átomo de carbono con cuatro átomos de hidrógeno, su fórmula molecular es CH_4 . En éste las cuatro valencias van dirigidas hacia los vértices de un tetraedro como se muestra en la Figura 3 (32-935)

Figura 3. Tetraedro de Metano (CH_4) (32-936)



Fuente: Theodore Brown, Química la ciencia central, Página 936.

El CH_4 es un gas volátil e inflamable que, por su elevado contenido energético, 13.14 Kcal/g, es un combustible eficaz.

Por sus propiedades físicas éste gas fija la pauta para los demás miembros de la familia de alcanos; la molécula de metano es muy simétrica y debido a ésta característica molecular las polaridades de los enlaces individuales de carbono e hidrógeno se anulan, por lo que su molécula no es del todo polar. La fuerza de atracción que existe entre estas moléculas de carbono e hidrógeno es débil debido a la limitación de las fuerzas de atracción que mantienen unidas las moléculas no polares según las fuerzas de atracción de Van der Waals.

Por ésta debilidad de atracción entre moléculas resulta sencilla su separación mediante energía térmica por lo que a temperaturas relativamente bajas, comparadas con otras moléculas, se lleva a cabo la fusión y ebullición, siendo su punto de fusión a una temperatura de $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ y su punto de ebullición a un rango de temperatura entre -161.5 y $-161.6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Debido a esto se puede decir que el metano es un gas a temperaturas ordinarias. Cuando se encuentra en estado líquido es incoloro y menos denso que el agua y también menos soluble que ella, pero su propiedad particular es que es muy soluble con líquidos orgánicos como el alcohol y con combustibles como la gasolina con lo que su reacción a la combustión es muy buena.

Debido a sus propiedades químicas el metano es un gas considerado como bastante inerte debido a la elevada estabilidad de los enlaces de sus compuestos C - H y a su baja polaridad. No se ve afectado por ácidos o bases fuertes ni por oxidantes como el permanganato. Sin embargo, la combustión es muy exotérmica aunque tiene una elevada energía de activación.

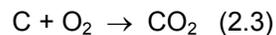
La reacción principal del metano es la combustión que es un proceso de oxidación pues la reacción entre el CH_4 en conjunto con oxígeno (Ecuación 2.2) (32-72) produce dióxido de carbono, vapor de agua y calor. En la combustión de hidrocarburos se requieren temperaturas elevadas, como las que proporcionan una llama o una chispa. Sin embargo, una vez iniciada, la reacción desprende calor, que a menudo es suficiente para mantener la alta temperatura y permitir que la combustión continúe. La cantidad de calor que se genera al quemar un mol de hidrocarburo a dióxido de carbono y agua se llama calor de combustión, la cual para el metano posee un valor de 212.80 Kcal . (32-72)



La capacidad del CH₄ de permitir una oxidación parcial controlada y su reacción catalítica con agua a temperatura elevada, lo convierte el metano en una fuente cada vez más importante de otros productos que no sean calor: de hidrógeno, empleado en la fabricación de amoníaco; de mezclas de acetileno, que a su vez, es el punto de partida para la producción a gran escala de muchos compuestos orgánicos

2.2.2. Dióxido de Carbono

El dióxido de carbono es una molécula con la fórmula molecular CO₂. Esta molécula linear está formada por un átomo de carbono que está unido a dos átomos de oxígeno (Ecuación 2.3), (32-851)



A pesar de que el dióxido de carbono existe principalmente en su forma gaseosa, también tiene forma sólida y líquida, solo puede ser sólido a temperaturas por debajo de los 78°C. El dióxido de carbono líquido existe principalmente cuando se disuelve en agua. Éste solamente es soluble en agua cuando la presión se mantiene y cuando la presión desciende intenta escapar al aire, dejando una masa de burbujas de aire en el agua.

Este gas es incoloro e inodoro, no es tóxico; pero a pesar de ello es considerado como un gas contaminante por las posibles modificaciones en fuentes naturales por descomposición de materia orgánica, a través de la respiración, incendios forestales y por fuentes antropogénicas como la combustión de combustibles fósiles, combustión de biomasa, en general de la combustión de compuestos que posean carbono.

El CO₂ posee distintas propiedades físicas y químicas que se pueden resumir en la Tabla VI (33):

Tabla VI. Propiedades del CO₂

Propiedad	Valor
Masa molecular	44.01 g/mol
Gravedad específica	1.53 a 21 °C
Densidad crítica	468 kg/m ³
Concentración en el aire	370.3 * 10 ⁷ ppm
Estabilidad	Alta
Líquido	Presión < 415.8 kPa
Sólido	Temperatura < -78 °C
Constante de solubilidad de Henry	298.15 mol/ kg * bar
Solubilidad en agua	0.9 vol/vol a 20 °C

Fuente: Lenntech water treatment & air purification Theodore Brown, 2004.

2.3. Propiedades del Biogás

El biogás es un gas más liviano que el aire y posee una temperatura de inflamación de entre los 600 y los 700 °C. Cuando se produce la combustión del biogás la llama de éste puede alcanzar hasta los 870 °C (34-6). Su poder calorífico depende del contenido de metano que posea, de acuerdo a los parámetros de la Tabla V su poder calorífico puede variar desde 3,500 kcal/m³ (45% de CH₄) hasta 5,250 kcal/m³ (60% de CH₄), lo que supone de 4.07 kWh/m³ a 6.11 kWh/m³, respectivamente (34-6), pudiendo llegar éste valor hasta los 6.95 kWh/m³, si el porcentaje de CH₄ alcanza el 70% (35-2).

El biogás posee las siguientes características (31-94):

- *Grado de Inflamación:* 6 a 12% vol. Aire
- *Temperatura de Inflamación:* 600°C
- *Presión crítica:* 82 bar.
- *Temperatura crítica:* -82,5°C.
- *Peso específico:* 1.2 kg/m³.

Para el manejo de éste gas se debe tomar precaución en la condensación del vapor, que es con frecuencia un problema debido a que el biogás se encuentra, generalmente, a una temperatura superior que la de las cañerías por donde se conduce. Por este motivo, es esencial una trampa de agua y puntos de drenaje en la tubería (36-5.8).

Debido a las propiedades del biogás se obtienen los siguientes valores comparativos respecto a los combustibles más convencionales (31-95):

1m³ de biogás equivale a:

- 0.61 l. de gasolina
- 0.583 l. de keroseno
- 0.55 l. de diesel
- 1.5 m³ de gas natural
- 1.43 KWh de energía eléctrica
- 0.5 a 1,5 Kg. de madera
- 0.74 Kg. de carbón vegetal
- 0.3 m³ de propano
- 0.2 m³ de butano

2.4. Biometanización de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos

2.4.1. Fases de Fermentación Anaerobia

La fermentación anaerobia comprende una compleja serie de reacciones de digestión y fermentación que llevan a cabo diferentes especies bacterianas, en condiciones anóxicas. Este proceso biológico se basa en la transformación a través de reacciones bioquímicas de la materia orgánica contaminante en biomasa y en un gas cuyos componentes principales son el CH₄ y el CO₂, y que se conoce con el nombre de biogás.

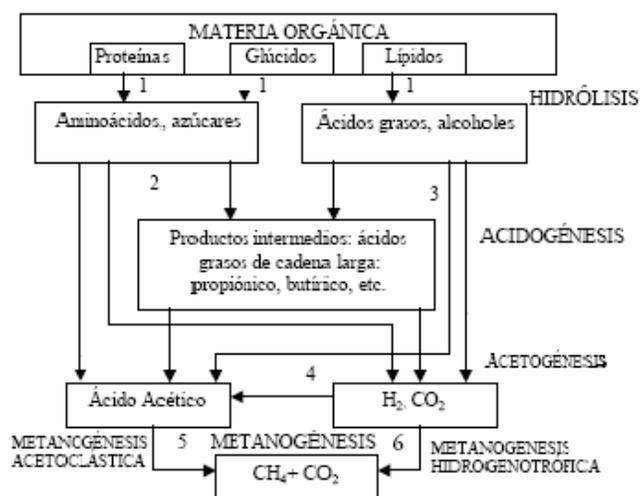
Este proceso es uno de los mecanismos más frecuentemente utilizados por la naturaleza para degradar sustancias orgánicas. También se produce una suspensión acuosa de materiales sólidos (lodos), entre los que se encuentran los componentes más difíciles de degradar, la mayor parte del nitrógeno y el fósforo, y la totalidad de los elementos minerales (K, Ca, Mg, etc.). La digestión anaerobia es desarrollada por un gran número de bacterias, que se encuentran en “perfecta coordinación y cooperación” las unas con las otras, tanto es así que el sustrato de una de ellas es el producto de la anterior.

Este proceso de fermentación de la materia orgánica consta de cuatro fases secuenciales desde las primeras descomposiciones microbianas de la materia orgánica hasta la estabilización del producto con la producción del denominado biogás (37-5).

Estas fases se denominan, Figura 4:

- Hidrólisis
- Acidogénesis
- Acetogénesis
- Metanogénesis

Figura 4. Vías Metabólicas en la Fermentación Anaeróbica (37-5)



Fuente: Kinetics of anaerobic treatment, 2001.

2.4.1.1. Hidrólisis

El primer paso de la fermentación anaerobia es el proceso de Hidrólisis, que sucede en los polímeros orgánicos como los carbohidratos, lípidos, polisacáridos, grasas y proteínas. Los polímeros son hidrolizados hasta pequeños fragmentos, como azúcares, aminoácidos, ácidos grasos de cadena larga, alcoholes y compuestos intermedios (Figura 4 Vía 1). Este proceso lo realizan microorganismos por medio de exoenzimas como la celulasa, almidasa, lipasa o proteasa (38-5).

Cualquier substrato se compone de los tres tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos. La hidrólisis de cada tipo de compuesto se realiza por diferentes grupos enzimáticos.

El grado de hidrólisis y la velocidad del proceso depende de muchos factores, entre otros del pH, la temperatura, la concentración de biomasa hidrolítica, tipo de materia orgánica y el tamaño de partícula.

2.4.1.2. Acidogénesis

Este paso implica la conversión microbiana de los compuestos resultantes de la hidrólisis, como ácidos grasos de cadena larga, ácidos y amino ácidos, en compuestos intermedios de bajo peso molecular, como el ácido acético (CH_3COOH), pequeñas concentraciones de ácidos grasos volátiles, ácido fúlvico y otros ácidos más complejos que son utilizados en éste paso como sustratos por microorganismos metanogénicos (Figura 4 Vías 2 y 3) (42-5). Pero los principales productos de ésta etapa son ácidos grasos volátiles, H_2 y CO_2 ; aunque también se puede crear en éste paso una acumulación de distintos compuestos como el etanol y sales como lactato, propionato y biturato (38-5).

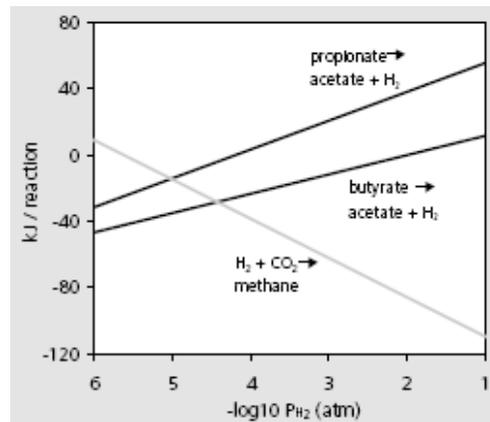
Debido a la composición de estas sales no pueden ser utilizadas por los microorganismos metanogénicos y deben de descomponerse o degradarse de alguna manera por los microorganismos productores de hidrógeno, proceso que recibe el nombre de Acetogénesis (38-5).

La actividad de algunas bacterias fermentativas y acetogénicas depende de la concentración de H_2 , siendo posible sólo a valores muy bajos de presión parcial de éste; por lo que las proporciones entre los productos de la fermentación varían en función del consumo de H_2 por parte de las bacterias que utilizan hidrógeno. Cuando el H_2 es eliminado de forma eficiente las bacterias fermentativas no producen compuestos reducidos como el etanol, favoreciendo la producción de H_2 y la liberación de energía. Entonces se tiene que la eliminación continua de H_2 mediante la acción de bacterias metanogénicas, hidrogenotróficas, que lo combinan con CO_2 para generar metano.

2.4.1.3. Acetogénesis

Esta conversión intermedia es importante para la obtención del biogás pues los componentes finales de la acidogénesis no pueden ser utilizados directamente por los metanógenos (38-6), obteniéndose acetato, CO_2 y H_2 (Figura 4 Vía 4). Los acetógenos crecen lentamente y dependen del hidrógeno para degradación de distintos sustratos para la obtención de energía; así de esta manera la acetogénesis se lleva a cabo por la interdependencia entre los organismos productores de hidrógeno y los consumidores de éste, en lo que se puede denominar una relación sintrópica. En la Figura 5 se muestra que la máxima producción de H_2 se produce a una baja presión parcial de H_2 ; pero se dispone de una menor cantidad del mismo para la metanogénesis Hidrogenotrófica (Figura 4 Vía 6). Así, estas reacciones ocurren dentro un rango estrecho de presión de H_2 .

Figura 5. Relación entre la termodinámica y la presión parcial de H₂ (38-6)
Cálculos basados en valores estándar de energía libre a pH de 7, 25°C, 34 mM HCO₃⁻,
1 mM Ácidos Grasos Volátiles y Presión CH₄ de 0.7 atm



Fuente: Bjoensson, Intensification of the biogas process by improved process monitoring and biomass retention, Página 6.

La baja energía que se obtiene de estos sustratos hace que los organismos crezcan de forma lenta y sean muy sensibles a ciertos cambios ambientales, ya que las bacterias tardan en adaptarse a las nuevas condiciones en un período elevado de tiempo.

2.4.1.4. Metanogénesis

Ésta es la parte final en la fermentación anaerobia metanogénica; en esta fase se genera el CH₄ a partir de la descomposición del ácido acético o a partir de la fusión del CO₂ y el H₂ (Figura 4 Vías 5 y 6).

Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro este grupo de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de las fases anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de biometanización.

Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio *Archaea*, y, morfológicamente pueden ser bacilos cortos y largos, cocos de varias ordenaciones celulares, células en forma de placas y metanógenos filamentosos. Todas las bacterias metanogénicas poseen varias coenzimas especiales, siendo la coenzima M, la que participa en el paso final de la formación de CH₄ (36-5.1).

Se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos metanogénicos, en función del sustrato principal, dividiéndose en los hidrogenotróficos, que consumen hidrógeno y fórmico, y los metilotrófico o acetoclásticos, que consumen grupos metilos del acetato, metanol y algunas aminas. Ésta reacción acetoclástica es una de las transformaciones metanogénicas más importantes en la digestión o fermentación anaerobia (38-7).

Los organismos hidrogenotróficos o metanógenos consumidores de H₂ están entre los organismos de más rápido crecimiento en el proceso anaeróbico pues son capaces de utilizar el H₂ como aceptador de electrones; y sólo dos géneros son capaces de utilizar el acetato. A pesar de ello, en ciertos ambientes anaerobios, éste es el principal precursor del metano, considerándose que alrededor del 70% del metano producido en los reactores anaerobios se forma a partir de acetato (38-7). Los dos géneros que tienen especies acetotróficas son *Methanosarcina* y *Methanotherix*, siendo el principal exponente *Methanosarcina Barkeri*, que es capaz de crecer en diversos sustratos, entre los que están H₂ y CO₂, acetato, metanol, metilaminas y CO (39).

2.4.1.4.1. Metanogénesis Acetoclástica

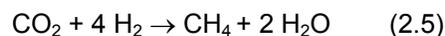
En la metanogénesis acetoclástica (Figura 4 Vía 5) el 70% del metano obtenido es producido por la descarbolixación del ácido acético a partir de una reacción de hidrólisis de la molécula; que es una vía para lograr metano, ejemplificado en la siguiente reacción, Ecuación 2.4:



Sólo dos géneros, *Methanosarcina* y *Methanotherix*, tienen especies que hacen este proceso (39).

2.4.1.4.2. Metanogénesis Hidrogenotrófica

La metanogénesis hidrogenotrófica (Figura 2.2. Vía 6) es la que permite la reducción de anhídrido carbónico a metano, cuando se encuentra presencia de hidrógeno, el cual al reaccionar con CO_2 se obtiene la siguiente reacción (40-5), Ecuación 2.5:



2.5. Factores Ambientales con Influencia en la Digestión Anaerobia

La complejidad de la fermentación o digestión anaerobia refleja la parte biológica de un ecosistema que está influido, por parámetros físicos y químicos. Estos factores son importantes en la tecnología de la digestión anaerobia en donde se incluyen los siguientes:

- Temperatura
- pH
- Solubilidad de gases
- Presencia de nutrientes
- Compuestos tóxicos en el proceso

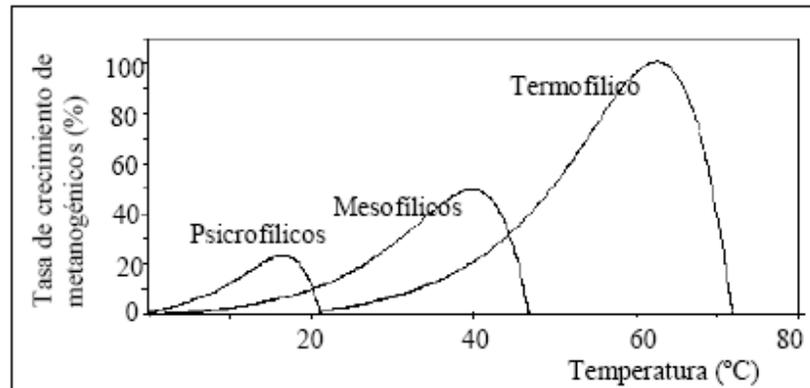
2.5.1. Temperatura

El tratamiento de la fracción orgánica de los RSU en los reactores anaeróbicos es llevado a cabo, normalmente, dentro de dos rangos distintos de temperatura: el rango mesofílico, entre el intervalo de temperatura de 25 a 40 °C, y el rango termofílico, con temperaturas mayores a los 45°C, (Figura 6). Parámetros físicos del proceso, como la viscosidad y la tensión superficial, dependen de la temperatura. En algunos casos, la fermentación anaerobia en el rango termofílico ha mostrado ser más inestable que la fermentación en el rango de condiciones mesofílicas (38-8).

Un cambio entre condiciones de rango mesofílico a rango termofílico puede mostrar como resultado inmediato un cambio en la población metanogénica debida a una muerte rápida de los organismos en condiciones mesofílicas (38-8).

La metanogénesis es también posible en condiciones de temperaturas menores a los 20°C (condición psicrófila) (Figura 5.), pero ocurre a velocidades más lentas y a menor proporción (38-8).

Figura 6. Condiciones de Temperatura en la Producción de Metano (29-8)



Fuente: Temperature suscetibility of thermophilic methanogenic sludge, Página 8.

2.5.2. pH

Cada grupo microbiano involucrado en la fermentación anaeróbica tiene una región de pH específica para su crecimiento óptimo. Para los ácidogénicos el pH ideal es de 6, mientras que para los acetógenos y metanógenos es de 7 (38-8). El pH es, además, un importante modulador del sistema, puesto que influye en varios equilibrios químicos, pudiendo desplazarlos hacia la formación de un determinado componente que tenga influencia en el proceso. Por ejemplo, altos pH favorecen la formación de amoníaco libre, auténtico inhibidor de la fase metanogénica (29-6).

2.5.4. Nutrientes

En la degradación anaerobia de RSU mixtos o mezclas de aguas residuales se puede suponer que los nutrientes necesarios y micro nutrientes están disponibles en cantidades ilimitadas. En el tratamiento de un solo residuo o algunas aguas residuales la degradación puede limitarse por la disponibilidad de nutrientes. La adición de elementos de traza como el níquel y el cobalto a la fermentación estimula los procesos anaerobios (38-10).

2.5.5. Toxicidad

Normalmente se considera que los metanógenos son el grupo bacteriano más sensible a los tóxicos de los microorganismos implicados en la fermentación anaerobia (38-10). Sin embargo, se puede dar el caso de una aclimatación o una reversibilidad a ciertos efectos tóxicos. Algunos de éstos efectos comunes en los FORSU son los asociados a la presencia de amoníaco, sulfuro de hidrógeno y ácidos grasos volátiles. La toxicidad de estos compuestos depende del pH.

Las bacterias metanogénicas son muy sensibles al oxígeno. Y es por eso que en estos cultivos en los digestores anaeróbicos hay también bacterias anaeróbicas que presentan características facultativas en la hidrólisis y en la acidogénesis, pues al presentarse oxígeno es consumido rápidamente por estos microorganismos (38-10).

2.6. Potencial de Biogás en Guatemala

El potencial de biogás no está sólo limitado a la fracción orgánica de los RSU, sino también se puede tomar en cuenta como recurso de producción de este gas el saneamiento de las aguas residuales en áreas urbanas y rurales. Esta operación genera lodos (líquido con gran contenido de sólidos en suspensión, proveniente del tratamiento de agua, de aguas residuales o de otros procesos similares) (22-145) con características utilizables en el proceso.

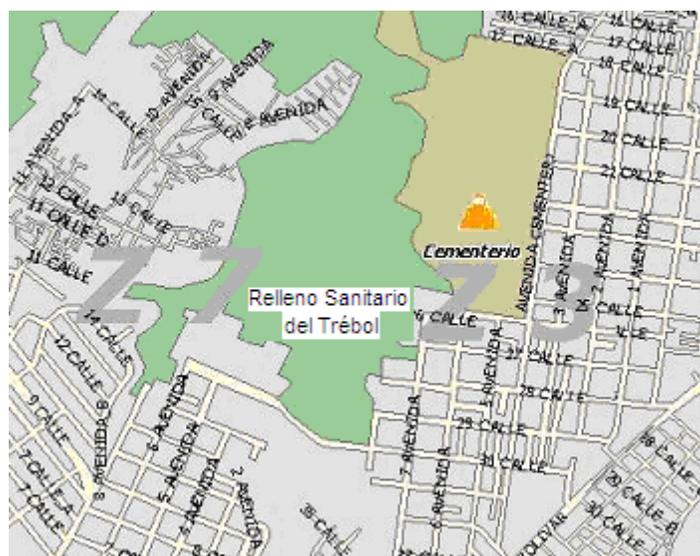
La cobertura de saneamiento (alcantarillado) en el área urbana alcanza alrededor del 72% o un poco mayor; correspondiendo a drenaje - fosa séptica el 65% y a letrina - excusado el 33%. Para éste saneamiento en el área metropolitana existen 16 plantas de tratamiento de aguas residuales, pero solamente funcionan 4. En zonas rurales la cobertura de saneamiento es más crítica, pues sólo llega al 52% o menos.

En las 331 municipalidades en el país, aproximadamente 286 tienen red de alcantarillado, pero solamente 15 cuentan con alguna planta de tratamiento de aguas residuales. El resto descargan las aguas residuales sin ningún tratamiento a los cuerpos receptores (41-295).

Guatemala como cualquier región del mundo presenta un potencial grande de Biogás por residuos sólidos urbanos, pero se debe de tener la consideración de realizar una clasificación de la basura de una manera en la cual ese potencial no sea desperdiciado de manera inútil y peligrosa como hoy en día ocurre.

Actualmente, sólo en el área metropolitana sobre una extensión que reúne 9 de los 17 municipios del departamento de Guatemala en un área aproximada de 2,126 Km² y con 3 millones de habitantes se calcula que se genera alrededor de 2,000 toneladas diarias de residuos. Depositadas en el Relleno Sanitario del Trébol, de una extensión de 45,000 m² ubicado en un barranco de 1,390 metros de profundidad entre las zonas 3 y 7 capitalinas, Figura 7. Dicho relleno sanitario funciona de una manera descontrolada, puesto que genera contaminación en el subsuelo al no poseer una gestión correcta de los lixiviados y del agua de lluvia. Así también se posee el problema del escape descontrolado del biogás generado de manera desordenada que provoca incendios (42-7).

Figura 7. Ubicación del Relleno Sanitario del Trébol (43)



Fuente: Mapas en Red, 2004.

Las estadísticas indican que actualmente no se cuenta con la recolección adecuada de basura y tampoco con la clasificación necesaria, la gestión actual del mismo se describe en el apartado 2.6.2.

2.6.1. Clasificación de los Residuos Sólidos Urbanos

Según la clasificación de los residuos sólidos, estos se pueden clasificar de varias formas de acuerdo a su origen, su composición y peligrosidad.

De acuerdo a la anterior clasificación los residuos sólidos urbanos se subdividen en producción de residuos domésticos, industriales, comerciales, institucionales y públicos (residuos de la limpieza de las calles). Entre la producción domiciliaria se encuentran los desperdicios de cocina, papeles, plásticos, botes de vidrio o metálicos, cartones, textiles, desechos de jardín, tierra, los que representan entre el 50 y el 75% de la totalidad de los RSU. Los residuos industriales incluyen baterías, confecciones de ropa, zapaterías u otra actividad industrial encontrándose entre el 5 y el 30% dependiendo de la actividad industrial que se dé en la región (22-36).

Como residuos biodegradables procedentes de instalaciones industriales también pueden someterse a digestión anaerobia para la producción de biogás productos de cervecerías, ingenios azucareros, industrias de alcoholes, derivados de lácteos, etc.

Según el tipo de material de los RSU y sus características así podrá ser la producción de Biogás. Las características más importantes incluyen peso específico, contenido de humedad, tamaño de partícula y distribución del tamaño, capacidad de campo y porosidad de los residuos compactados. A continuación se presentan valores comunes que pueden ser encontrados en vertederos comunes, como es el caso de Guatemala, Tabla VII (22-45).

Tabla VII. Materiales y porcentaje en peso del contenido de RSU en Guatemala
(22-45)

Material	Porcentaje en peso (%)
Papel y Cartón	13.9
Desechos Orgánicos	63.3
Textiles	3.6
Plásticos	8.1
Vidrio	3.2
Metales	1.8
Varios	6.1
Total	100.00

Fuente: Guido Acurio, Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y el Caribe, Página 45.

El peso de los RSU varía según la región por la localización geográfica, la estación del año y del tiempo de almacenamiento, por lo que se debe de tener consideraciones especiales al respecto cuando se pretenda seleccionar valores típicos según cada región. Teniendo estas consideraciones se puede presentar el caso de la Ciudad de Guatemala, considerada como una ciudad de más de 2 millones de habitantes, entre las más grandes de Latinoamérica, y en donde la fracción orgánica de los RSU en su área metropolitana se puede generar variando entre 0.3 y 0.8 Kg. por habitante al día.

Ésta constituye parte del grupo de otras 15 ciudades latinoamericanas de similares características según la Organización Panamericana de la Salud, como se muestra en la Tabla VIII (22-41).

Tabla VIII. Generación de RSU per cápita en Áreas Metropolitanas y ciudades con más de 2 millones de habitantes en América Latina (1997) (22-41)

Ciudad, País	Población Habitantes Millones	Producción de RSU (Tonelada / día)	Generación per cápita (kg/hab/día)
Sao Paulo, Brasil	16.4	22,100	1.35
México, DF., México	15.6	18,700	1.20
Buenos Aires, Argentina	12	10,500	0.88
Río de Janeiro, Brasil	9.9	9,900	1.00
Lima, Perú	7.5	4,200	0.56
Bogotá, Colombia	5.6	4,200	0.74
Santiago, Chile	5.3	4,600	0.87
Belo Horizonte, Brasil	3.9	3,200	0.83
Caracas, Venezuela	3.0	3,500	1.18
Salvador, Brasil	2.8	2,800	1.00
Monterrey, México	2.8	3,000	1.07
Santo Domingo, República Dominicana	2.8	1,700	0.60
Guayaquil, Ecuador	2.3	1,600	0.70
Guatemala, Guatemala	2.2	1,200	0.54
Curitiba, Brasil	2.1	1,300	1.07
La Habana, Cuba	2.0	1,400	0.70
Total	96.8	93,900	0.97

Fuente: Guido Acurio, Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y el Caribe, Página 41.

De ésta manera se puede clasificar a Guatemala como un país con un evidente potencial de producción de RSU para producción de biogás, lo que implicaría usos viables como recurso energético. Aunque se debe de tener claro que no todos los RSU pueden producir biogás para utilizarlo como combustible, éste sólo se produce a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y no es posible su obtención a partir de metales, plásticos, vidrios y otros materiales no biodegradables.

En el área metropolitana la basura depositada en el vertedero ubicado entre las zonas 3 y 7 está constituida en un 55% por materiales orgánicos y el restante 45% lo constituyen materiales inorgánicos y de otros tipos (25-140), los cuales se reciclan de forma artesanal.

Según datos de principios de siglo se sostiene que el crecimiento poblacional en el área metropolitana de Guatemala genera más RSU de acuerdo a su número de habitantes, con lo cual también se puede tener una medición del potencial de materia prima para la producción de biogás y en consecuencia de la producción de energía eléctrica, Tabla IX (44-22).

Tabla IX. Estimaciones de Crecimiento de población y RSU (44-22)

Año	Población Total (Millones)	Generación de RSU (Tn/año)	Desechos Reciclables (Tn/año)
2000	2,250	524,379	272,049
2005	2,698	616,798	325,824
2010	3,236	739,791	390,400

Fuente: Estadística de la salud de las Américas, 1995.

El desperdicio de éste recurso es considerable, y según los volúmenes que se estiman de producción de RSU nuestra sociedad podría estar generando soluciones al problema actual de la basura, con lo que anualmente se generaría una economía más estable y un medio ambiente más sostenible.

2.6.2. Recolección y Transporte de Residuos Sólidos Urbanos

El término recolección incluye no sólo el almacenamiento de los residuos sólidos en sus varias fuentes de generación, sino también el transporte de esos residuos hasta el sitio de disposición final (26-1).

Actualmente se realiza el transporte por diversos tipos de vehículos, incluyendo carretas, pick ups, camiones de estacas, furgones o camiones de cualquier tipo y, muy raramente, camiones del tipo compactador. De acuerdo a un estudio realizado en el 2002 se contabilizaba un total de 1,042 vehículos de transporte de RSU en toda la República de Guatemala mostrando los datos estimados por departamento en la Tabla X (26-2).

En la ciudad de Guatemala, el 90% de la recolección doméstica se realiza a través de empresas privadas, el restante 10% lo realiza la Municipalidad de Guatemala (Tabla X), el que incluye la recolección de RSU en mercados y barrido de calles. Por lo general, en las ciudades donde la municipalidad es la encargada de operar los servicios de aseo, el presupuesto del departamento de limpieza representa 20 a 50% del presupuesto municipal (22-86).

Tabla X. Transporte y recolección de Residuos Sólidos Urbanos (26-3)

Departamento	No. Municipalidades	No. de Camiones	Municipales	Privados	Cobertura de Recolección			
					0-10%	11-25%	26-40%	41-100%
Alta Verapaz	16	41	32	9	4	6	1	5
Baja Verapaz	8	10	7	3	3	3	2	0
Chiquimula	11	4	2	2	4	2	2	2
Chimaltenango	16	34	25	9	0	1	6	9
Escuintla	13	16	5	2	2	5	0	6
Guatemala	17	603	29	574	0	5	7	5
Huehuetenango	31	19	8	11	16	12	0	3
Izabal	5	14	10	4	1	4	0	0
Jalapa	7	12	6	6	1	1	3	2
Jutiapa	17	22	15	7	1	5	8	3
Mazatenango	20	20	11	9	4	10	3	3
Petén	12	26	7	19	2	1	6	3
Progreso	8	14	8	6	1	2	2	3
Quiché	21	12	8	4	9	8	0	4
Quetzaltenango	24	47	24	23	4	13	4	3
Retalhuleu	9	14	6	8	0	3	5	1
Sacatepéquez	16	35	13	22	5	0	2	11
San Marcos	29	20	13	7	15	2	3	9
Santa Rosa	14	29	12	17	3	8	0	3
Sololá	19	17	13	4	5	4	4	6
Totonicapán	8	18	10	8	5	2	0	1
Zacapa	10	10	7	3	3	1	3	2

Fuente: Jaime Domingo Carranza, Evaluación del transporte y disposición final de los desechos sólidos en los 331 municipios de la república de Guatemala, Página 3.

La capacidad de cobertura de recolección de basura o Residuos Sólidos Urbanos se ha incrementado en la región metropolitana de un 55% en 1999 a un 75 a 80% en el 2002 (25-295).

2.7. Análisis de Tecnología de Construcción de Vertederos y su Aplicación en el caso Guatemalteco

Un aspecto importante en la gestión de los RSU consiste en conocer los impactos ambientales de las diferentes prácticas de gestión existentes; el constante crecimiento de Guatemala respecto a la generación de residuos producida en el país durante los últimos años supone que las actividades de producción y consumo están incrementando las cantidades de materiales que cada año se devuelven al medio ambiente de una forma degradada, amenazando potencialmente la integridad de los recursos renovables y no renovables. La gestión sin control de RSU posee una amplia variedad de impactos sobre el medio ambiente (Tabla XI) (45), ya que los procesos naturales actúan de tal modo que dispersan los contaminantes y sustancias peligrosas en el medio ambiente según los métodos adoptados para la disposición final de los RSU.

Tabla XI. Impactos de las Prácticas de Gestión de Residuos, realizadas de forma incontrolada, sobre el Medio Ambiente (45)

	Aire	Agua	Suelo	Paisaje	Ecosistemas	Áreas urbanas
Vertido sin control	Emisiones de CH ₄ , CO ₂ ; olores	Lixiviado de sales, metales pesados, compuestos orgánicos persistentes y biodegradables en el agua subterránea	Acumulación de sustancias peligrosas en el suelo	Ocupación del suelo; restricciones para otros usos	Contaminación y acumulación de sustancias tóxicas en la cadena alimentaria	Exposición a sustancias peligrosas

Fuente: Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente, 2004.

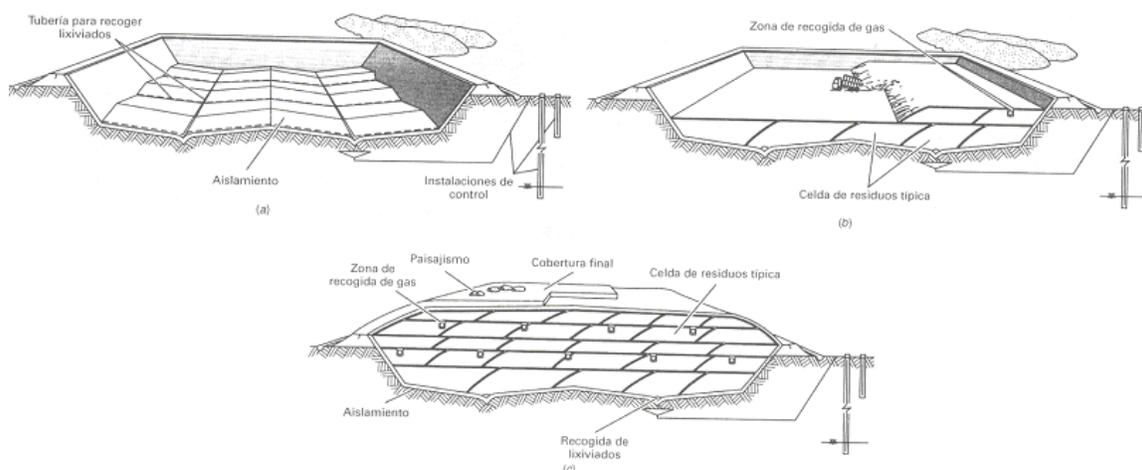
En los vertederos sin control, la lixiviación de los residuos puede contaminar el suelo y el agua subterránea con sustancias tales como metales pesados, compuestos nitrogenados, compuestos clorados u otros compuestos orgánicos como hidrocarburos.

Los lixiviados de residuos orgánicos pueden tener altas concentraciones en amonio que pueden causar una grave contaminación de las fuentes de agua potable y la contaminación de las aguas superficiales en las áreas circundantes.

La biodegradación de materia orgánica en los vertederos también genera gases peligrosos, como ya se ha mencionado anteriormente.

Entre los vertederos modernos existen varios tipos con distintos fines de uso, principalmente la disposición de los RSU (Figura 8). En la actualidad se incentiva también el aprovechamiento de la fracción orgánica de los RSU para usos varios y entre los principales, su utilización como fuente de energía mediante su transformación en energía eléctrica o energía térmica.

Figura 8. Desarrollo de un vertedero moderno (30-413)



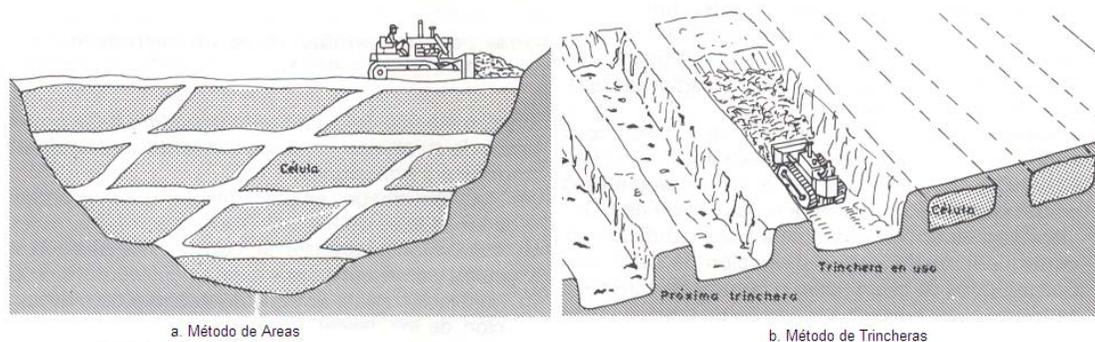
Fuente: George Tchobanoglous, Gestión Integral de Residuos Sólidos, Página 413.

La operatividad en un vertedero moderno funciona de la siguiente manera, los residuos se extienden y compactan en capas dentro de un área definida, formándose lo que se denomina célula o estructura básica. Estas células forman una terraza y, en general, un vertedero controlado está compuesto por una serie de terrazas sobrepuestas unas con otras (Figura 8).

Las dimensiones de éstas células dependen de la cantidad de RSU a depositar diariamente, pero se recomienda al compactar los RSU que se alcance los 500 kg/m^3 diarios para evitar problemas con el material de recubrimiento de dichas células.

También se recomienda que la altura entre células no sea mayor a los 2,6 metros, esto es debido a la influencia de residuos en el asentamiento final del terreno del vertedero (46-11), para la disposición de las células se tienen los métodos de área y de trinchera, Figura 9.

Figura 9. Métodos de relleno (46-11)



Fuente: Técnicas energéticas especiales, Página 11.

El recubrimiento de los RSU es el límite existente entre células, esto facilitará la sanidad y estética del vertedero, además se limita la propagación de olores, incendios e interrumpe la entrada de animales. Las capas de recubrimiento pueden ser de distintos grosores: una de 15 cm, o capa diaria, una de 30 cm, la intermedia que prevé un periodo limitado en reposo para las capas y la final que posee 70 cm como un valor mínimo (46-12).

Otro aspecto importante en los vertederos controlados modernos es que para la operación del vertedero se requiere de maquinaria que pueda manipular los RSU, el material de recubrimiento y maquinaria para trabajos de mantenimiento. La maquinaria dependerá de la cantidad de RSU que se tratan diariamente. Como se describía anteriormente el dato de partida para un vertedero puede ser de una densidad estimada de al menos 500 kg/m^3 .

Además la selección de la maquinaria dependerá de la topografía del terreno del vertedero, de sus dimensiones y del método de formación de las capas dentro del mismo.

Entre los principales tipos de vertederos están(30-419):

2.7.1. Vertederos para Residuos Sólidos Urbanos no seleccionado

Son vertederos convencionales para uso exclusivo de depósito de RSU, aunque también suelen depositarse residuos industriales no peligrosos y fangos de plantas de tratamiento de aguas residuales con contenidos sólidos del 51%. Comúnmente se utiliza suelo natural o tierra como material de cobertura final o intermedio mientras llena su capacidad. Este concepto es el que actualmente se aplica en Guatemala, sin embargo, no se sigue el procedimiento de recubrimiento, por lo que se puede decir que son vertederos a cielo abierto.

2.7.2. Vertederos para Residuos Sólidos Urbanos Triturados

Este tipo de vertederos utiliza el concepto de trituración de los RSU antes de ser colocados dentro de su sitio final, por lo que se pueden aumentar en un 35% de la cantidad de RSU almacenados con respecto a los no triturados, pues al estar compactados necesitan menos cantidad de material para cubrirlos, y un mejor control del filtrado de agua durante la operación en el relleno. Al proceder con los RSU de esta manera hace que se tenga que disponer de una planta trituradora y crea la necesidad de operar una sección de vertido convencional para los materiales que no sean fácilmente triturados. El método de la trituración de RSU tiene uso potencial en zonas donde la capacidad de los vertederos es pequeña pues al conseguir la mayor compactación tras la trituración se necesita menor material de cobertura.

2.7.3. Otros Vertederos

En la actualidad el concepto de vertedero ha llevado a construcciones de aprovechamiento de los RSU, y de allí la intención del aprovechamiento en todo sentido, por lo que entonces se construyen vertederos según su tratamiento final con RSU como materia prima de producción.

2.7.3.1. Vertedero como Unidades de Tratamiento Integral

En este tipo de vertedero los compuestos orgánicos se separan y se colocan en un vertedero apartado, en donde se intensifican las tasas de biodegradación incrementando el contenido de humedad de los residuos, mediante lixiviado o mediante siembra de fangos digeridos de plantas de tratamiento de aguas residuales o con estiércol de animales. El material degradado se recupera utilizándose como material de cubrición en zonas nuevas de relleno y la celda excavada se rellenaría con nuevos residuos.

2.7.3.2. Vertederos Diseñados para Maximizar la Producción de Gas

Este tipo de vertederos funcionan maximizando el gas producido tras la información descrita a principios de éste capítulo, por medio de recuperación de la fermentación anaerobia de la fracción orgánica de los RSU. Para este tipo de vertederos se implementan celdas profundas individualmente recubiertas, en las que se depositan los residuos sin capas intermedias de material de cubrición y se recibe el lixiviado para intensificar el proceso de fermentación y obtener biogás para su utilización posterior (Figura 8).

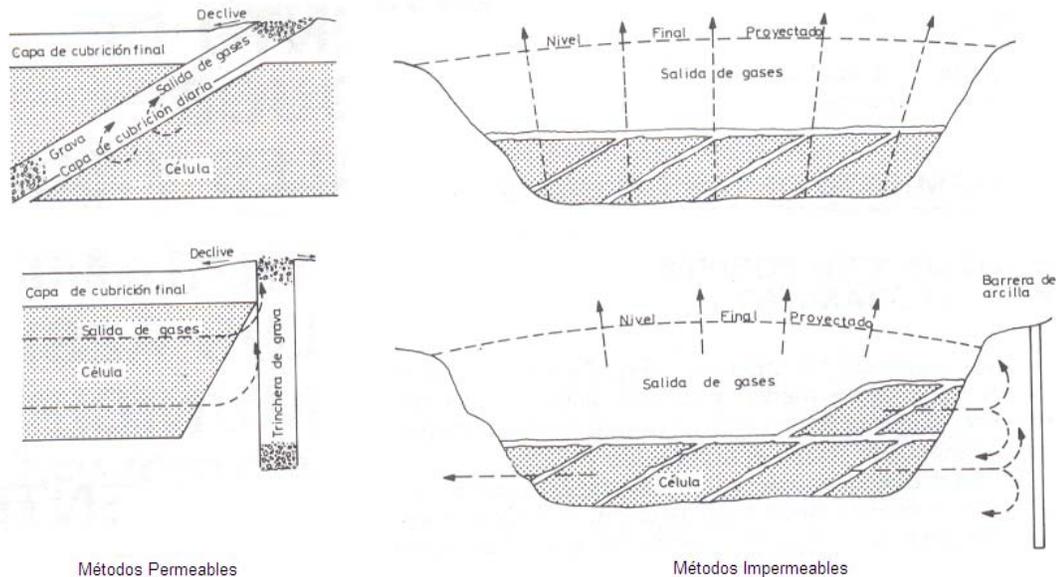
Regularmente en este tipo de vertederos se instalan plantas para tratar los residuos con sistemas tecnificados de fermentación anaerobia para el tratamiento de la materia orgánica, con lo cual también se aprovecha el biogás liberado de dicha fermentación utilizándose para la producción de energía eléctrica mediante cogeneración. Estos vertederos o plantas de tratamiento constan de varias etapas en la planta, la de recepción, que almacenan los RSU, la de reciclaje que selecciona los productos como papel, cartón, vidrio, plástico, metales o chatarra. Luego se procede a la biometanización en digestores en los que se obtiene por una parte: compostaje, y por otra: biogás, para generación de energía eléctrica y energía térmica.

2.7.4. Normas par la Instalación de un Vertedero Controlado

Deben de adoptarse al menos cuatro normas básicas, como:

- **Contaminación del agua;** se debe prever antes de la puesta en funcionamiento del vertedero la elección de un emplazamiento geológicamente adecuado, una instalación de drenaje para todos los líquidos que circulan en el vertedero y una instalación de tratamiento o evacuación de lixiviados.
- **Asentamiento;** la fermentación de los RSU reduce gradualmente el volumen de los mismos, lo que crea descensos en la superficie de los vertederos. El asentamiento depende del tipo de residuo, de su grado de compactación y del tipo de fermentación.
- **Producción de gases;** la viabilidad de un vertedero está condicionada al control del movimiento y disipación de los gases producidos, para lo que actualmente se controla mediante tuberías o pozos extractores del biogás para su utilización posterior y se controla mediante drenajes permeables o barreras impermeables, como se muestra en la Figura 10.

Figura 10. Control permeable e impermeable de gases de vertedero (46-12)



Fuente: Técnicas energéticas especiales, Página 12.

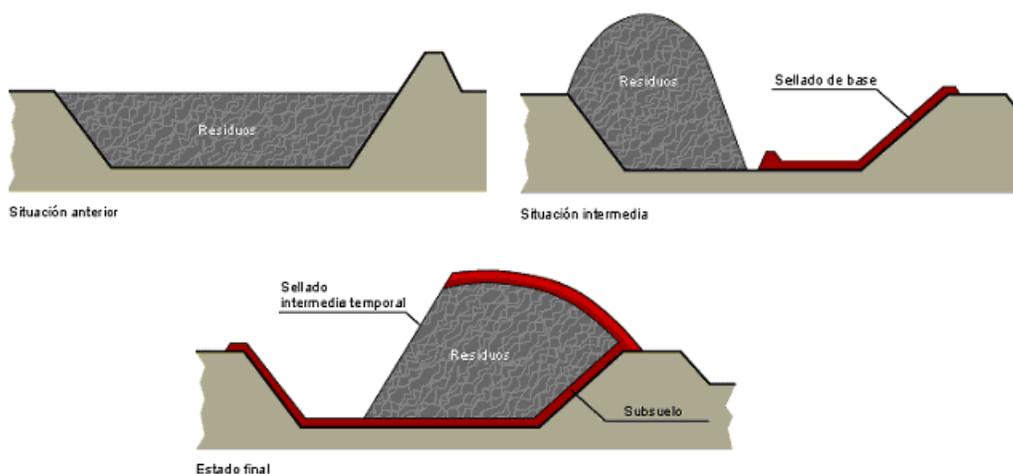
- **Aprovechamiento energético;** es la extracción de biogás del vertedero con el cual se puede cubrir el consumo de energía del vertedero y de la planta de biogás, como se describirá más adelante.

2.8. Técnica de Recuperación del Vertedero del Trébol en las Zonas 3 y 7

La particularidad del vertedero principal de la Ciudad de Guatemala es la característica más común a nivel del país y de la región Centroamericana, y que está a cielo abierto. La lluvia juega un papel importante, pues penetra en los materiales vertidos y disuelve los contaminantes. Y éstos afectan a su vez a las aguas subterráneas. Ésta es una de las razones por la que hoy en día todos los vertederos de Residuos Sólidos Urbanos deberían de estar sellados de forma efectiva en su superficie y en su base. Exactamente ésta sería la tarea a realizar en éste sitio que no se adapta a las normativas higiénicas de vertido actualmente administrado por la Municipalidad de Guatemala.

Para la recuperación de un vertedero ya existente se procede a trasladar la masa de vertidos a una parte del vertedero antiguo, por lo que aun se puede seguir recolectando RSU en la fase de reestructuración, se instala un sellado de base en forma cónica con lo que se recuperan los lixiviados a través de un único pozo (Figura 11.).

Figura 11. Recuperación de vertedero existente (47)



Fuente: HPC, 2004.

En una primera fase, se instala el sellado de base, luego se traslada toda la masa de vertidos hacia la zona sellada formando una colina que se cubre con un sistema de sellado de superficie. En la ladera hacia la zona actualmente en explotación se instala un sellado intermedio temporal. Los lixiviados producidos en la zona actualmente en explotación son evacuados mediante una capa mineral de drenaje hacia un pozo central de lixiviados de donde son bombeados a la planta de tratamiento que debe ser instalada en terrenos cercanos.

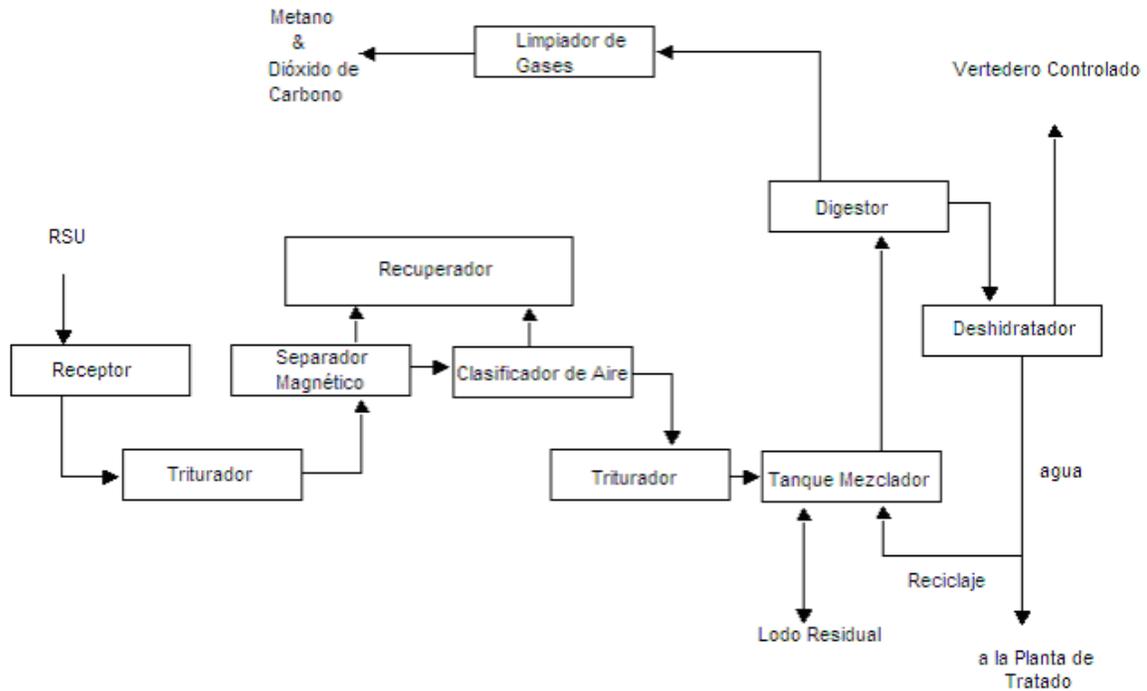
Para minimizar la producción de lixiviados se desarrolla un sistema específico de explotación en la cual la parte activa del vertedero es protegida contra la infiltración de lluvia mediante un sellado temporal y un sistema de recogida de pluviales lo que permite minimizar los costos para el tratamiento de lixiviados (47).

El tratamiento de los RSU en un vertedero controlado debe de realizarse a partir de la construcción de una planta de aprovechamiento del biogás; en donde los residuos son tratados previamente mediante trituración hasta un tamaño de partículas de aproximadamente 7 a 15 cm, separándose los materiales inorgánicos, como metales mediante separadores magnéticos y metales y vidrio mediante cedazos. El material resultante entra en un clasificador de aire, donde se recupera la fracción de materia orgánica más ligera, mientras que la pesada pasa a un recuperador antes de ser reciclada (46-14).

Esta separación previa a la fermentación, también puede realizarse vía húmeda, pero implica modificaciones al sistema del tratamiento. Antes de iniciar la fermentación es necesario añadir nutrientes, constituidos por lodos de aguas residuales, cal y sales ferrosas para controlar los valores de pH y H_2S (48-201), esto se realiza para minimizar la corrosión en la utilización del gas en motores de combustión interna como se explica en el siguiente capítulo.

Si el pretratamiento y separación de los materiales se realiza por vía seca, todos los materiales se reúnen en un tanque mezclador desde donde pasan a unos digestores. Cada digestor consiste en un tanque cilíndrico dotado de un sistema de agitación para facilitar la fermentación uniforme de la fracción orgánica de los RSU (FORSU); en donde sucede los procesos descritos anteriormente en el apartado 2.4. y luego existe el posible aprovechamiento de los RSU fermentados como compost, tipo de abono. Un esquema típico de una planta de producción de biogás se presenta en la Figura 12.

Figura 12. Esquema de planta de biogás en un vertedero controlado (48-201)



Fuente: José María Vega Piqueres, La bioconversión de la energía, Página 201.

2.9. Aprovechamiento Energético del Biogás en Vertederos

La descarga de RSU en vertederos debe de ser controlada para que se obtenga el mayor provecho, de forma que facilite su explotación energética. Al mismo tiempo que se depositan los residuos, se puede extraer el biogás producido. El tiempo de descomposición en los vertederos depende de factores como la permeabilidad del material de recubrimiento (tierra u otro), profundidad, contenido de humedad, putrescibilidad de los residuos y grado de compactación (46-11). Se puede aprovechar los RSU por medio de incineración, en un sistema de cogeneración, como se muestra en la Figura 13.

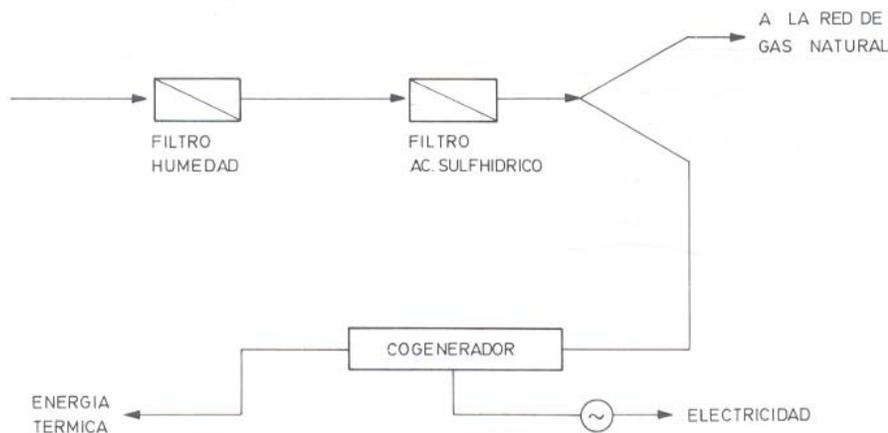
Figura 13. Esquema de aprovechamiento energético de los RSU (46-13)



Fuente: Técnicas energéticas especiales, Página 13.

O se puede aprovechar el biogás producido, según la Figura 13., alimentando a un sistema de cogeneración de calor y electricidad de capacidad adecuada, además de enviar a la red de gas natural dicho biogás producido, en caso se posea esa infraestructura como se muestra en la Figura 14.

Figura 14. Esquema de aprovechamiento de biogás en un vertedero controlado (46-14)

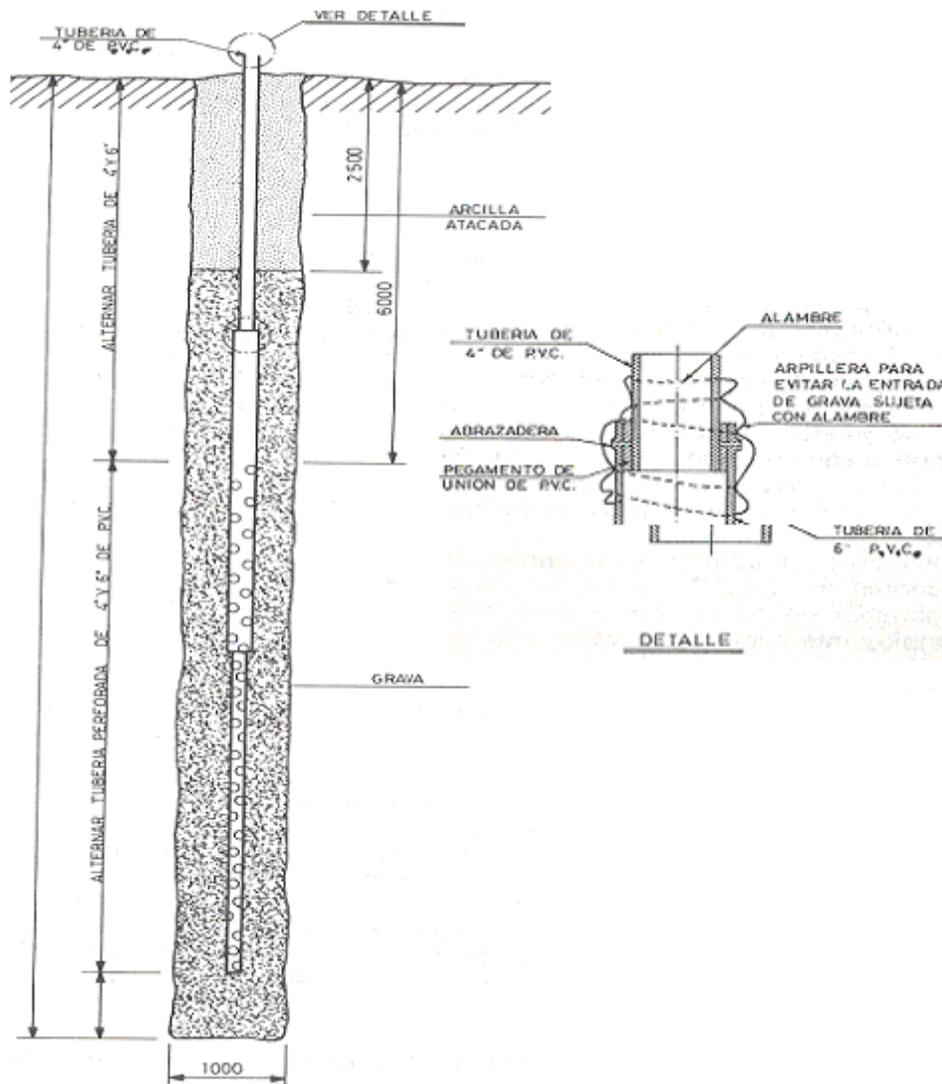


Fuente: Técnicas energéticas especiales, Página 14.

Para obtener un aprovechamiento energético es necesario operar de una forma ordenada, esto es que la producción del biogás posea porcentajes estables en sus componentes principales. De esta forma se facilita la estación de bombeo y la red de extracción. La planta debe de tener pozos de extracción, una planta de bombeo y un sistema de cogeneración térmico – eléctrico (46-13).

En la zona de extracción que se muestra en la Figura 10 se posee pozos de extracción dependiendo del área de producción de biogás. Estos pozos poseen una tubería de PVC interior para evitar la corrosión provocada por el H₂S en otros materiales más sensibles. El pozo comprende una sección de tubo sin perforar que evita infiltraciones, el resto de la tubería está perforado permitiendo la perforación del biogás, Figura 15. (46-14).

Figura 15. Pozo típico de extracción de biogás con detalle en su salida.
(46-15)



Fuente: Técnicas energéticas especiales, Página 15.

La salida de los pozos debe de estar conectada a la planta de bombeo que consta con un separador de agua, de un filtro purificador de H₂S con óxido de hierro que absorbe el H₂S, que evita la concentración de éste. Esta instalación posee además un filtro de sólidos antes de llegar al soplante, que posee un by-pass para permitir el paso libre del biogás en caso se tenga problemas con el filtro .

Las dimensiones del pozo pueden ser de una profundidad de 10 a 30 metros y diámetro de 1,000 mm. Con una longitud en el tramo sin perforar de 6 metros (46-14).

De acuerdo a lo descrito en éste capítulo se podrá aprovechar el poder calorífico del biogás como se describirá en el siguiente capítulo.

3. UTILIZACIÓN DEL BIOGÁS PARA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU)

3.1. Producción de Energía a partir de FORSU

Se puede usar la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos para generar biogás que puede producir energía en distinta forma (49-2):

- **Calor y vapor:** pueden ser el producto principal en aplicaciones de calefacción y cocción, o puede ser un subproducto de la generación de electricidad en ciclos combinados de electricidad y vapor.
- **Combustible gaseoso:** El biogás producido puede ser utilizado en motores de combustión interna (MCI) para generación eléctrica, para la calefacción y acondicionamiento en el sector doméstico, comercial e institucional y en vehículos modificados.
- **Generación de electricidad:** La electricidad generada a partir de FORSU puede ser comercializada con el término moderno de “Energía verde”, por considerarse en el grupo de energías renovables.

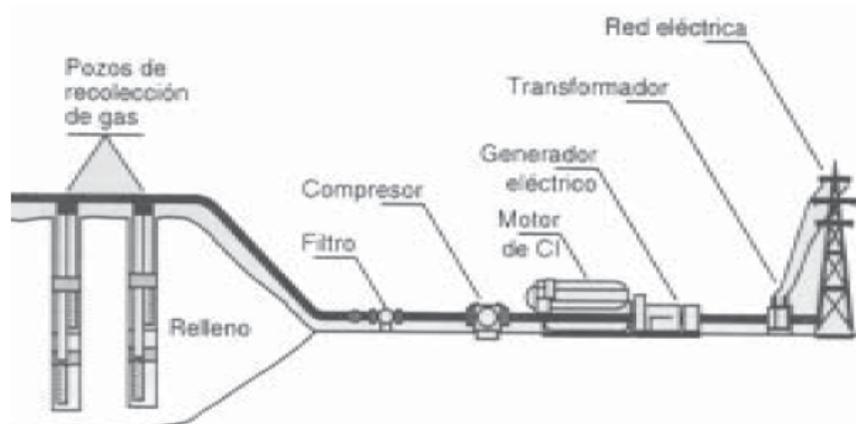
Además el biogás puede ser integrado en el sistema de distribución del gas natural, donde se posea (50-3).

A pequeña y mediana escala el biogás ha sido utilizado comúnmente para cocinar, por medio de combustión directa en estufas simples, y también en iluminación, para calefacción y en la actualidad como combustible en motores de combustión interna para generación de electricidad en reemplazo de derivados del petróleo como la gasolina y el diesel.

De acuerdo a lo expuesto en el capítulo anterior la composición del biogás hace a éste un combustible con buenas características para ser utilizado en turbinas o máquinas de combustión interna que accionen generadores eléctricos. El proceso de la generación de energía en un vertedero controlado comienza con la extracción del biogás a través de pozos verticales perforados en toda la extensión del vertedero controlado (54-119).

Mediante una red superficial de tuberías (Figura 16), el biogás es conducido hasta una estación donde se le quita la humedad y otras sustancias indeseables, como el H_2S . Este compuesto al reaccionar con agua se convierte en ácido sulfúrico (H_2SO_4), que es altamente corrosivo y puede ocasionar graves daños en el sistema mecánico en los motores de combustión interna (MCI). Esto se realiza a través de un sistema de lavado de gases con sustancias como la cal viva, limaduras de hierro o ciertos tipos de tierras conocidas como hematites parada o limonita, ricas en sustancias ferrosas (35-4). Todas éstas operaciones se realizan con el fin de purificar el biogás y tener una combustión limpia y eficiente.

Figura 16. Esquema de generación de electricidad en un vertedero controlado
(51-119)



Fuente: José Arvizú, Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad,
Página 119.

En la producción del biogás se aprovecha éste para la alimentación de la energía eléctrica necesaria en la misma planta de producción y en el vertedero de donde se extraerá, y otras opciones de utilización del biogás que se muestran en la Tabla XII.(52-28).

Tabla XII. Opciones de uso potencial del biogás (52-28)

Opción	Aplicación
Generación Eléctrica	Para utilización en líneas de distribución.
Combustión Directa	Cocinas, Iluminación
Calderas / Hornos	Para usos especiales
Refrigeración	Enfriamiento temporal

Fuente: Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás, Página 28.

3.2. Proceso de Desgasificación y Funcionamiento del Sistema

Se debe de tener particular cuidado en el manejo del biogás desde el vertedero controlado, la captación ha de ser regulada y controlada para evitar situaciones de peligro en su aprovechamiento. El aprovechamiento del biogás requiere su captación y su envío en las condiciones de presión, temperatura, composición y humedad necesarias para su utilización en grupos de Motor-Generador (53).

Para este aprovechamiento es necesario disponer de pozos de captación, perforaciones realizadas mediante sondas de material calibrado, tubería perforada de polietileno y material impermeabilizante, para conseguir un radio de influencia máximo, de forma que se consiga captar la mayor cantidad de biogás, sin provocar la entrada de aire en el depósito.

La construcción y el funcionamiento de los pozos de captación depende del radio que posean debido a la depresión que se aplique a cada pozo, al sellado circundante y a la profundidad, que depende de la altura del residuo acumulado en los puntos de perforación y características de la masa a perforar.

La conducción del biogás producido y captado debe de realizarse mediante de tuberías, de polietileno de alta densidad, de pared ciega para evitar la entrada de aire. El espesor de éstas tuberías se tiende a sobredimensionar para aumentar el grado de seguridad de la instalación. Es común para éste tipo de instalaciones utilizar tubería PN6 (de presión de trabajo a 6 bares), aún cuando en la conducción o transporte del biogás se realice en milibares.

Cada pozo debe de conectarse a una única línea de conducción y cada línea se conecta a dos pozos; el extremo de ésta conexión va hacia las entradas de la estación de regulación y medida; esta estación es el elemento clave para la adecuada captación del biogás ya que en ella se habrán de tomar las muestras del gas conducido por cada una de las líneas, se deberá analizar y, en función de las características de este gas, se deberá ajustar la aspiración en cada línea.

El funcionamiento de la estación de regulación de captación de biogás se describe a continuación: cuando el biogás captado por el pozo tiene una concentración de CH_4 inferior a la deseada, se cierra parcialmente la válvula de regulación correspondiente, de forma que la depresión que se tienen en el pozo disminuye y hace que disminuya el caudal de biogás captado. En caso que el biogás captado tenga un porcentaje mayor al deseado, se aumenta la captación en el pozo.

En la estación de regulación se obtienen muestras y medidas del biogás capturado del cual se analiza la concentración de oxígeno en el gas con el fin de detectar posibles filtraciones de aire en el sellado o en las líneas de conducción

La estación de regulación se conecta con la estación de extracción, en esta estación se disponen los soplantes que ponen en depresión a toda la red de captación de biogás y a su vez lo impulsa hacia el grupo Motor – Generador.

Para evitar cambios bruscos en el sistema de conducción del caudal de gas extraído hacia los grupos de generación y para asegurar la combustión correcta del biogás captado; se emplean dos sistemas simultáneamente:

- **Un gasómetro**, en él se almacena el biogás, además de realizar la función de amortiguar las puntas de producción y puntas de consumo.
- **Una antorcha**, que quema el exceso de biogás captado y que en dicho momento no puede ser consumido en los grupos generadores, ni almacenado en el gasómetro.

Es importante que la antorcha sea flexible en cuanto al caudal admitido y que permita su funcionamiento con un caudal muy bajo, pues al hacer la función de amortiguador en el caudal del gas debe de trabajar más rápidamente que el gasómetro. Si el caudal quemado en la antorcha se alarga durante un tiempo determinado, el sistema debe rebajar el caudal captado del vertedero, haciéndole trabajar parcialmente como un gasómetro.

Una vez captado y extraído el biogás de una forma controlada, se procede a su aprovechamiento en forma de combustible en el grupo Motor – Generador para la producción de energía eléctrica.

3.2.1. Equipos y /o Unidades

Se puede entonces destacar dentro de las instalaciones de una planta de biogás en un vertedero los siguientes equipos:

Red de Captación y Conducción: unidades encargadas de la captación del biogás y su conducción a la estación de regulación y medida.

Se compone de:

- Pozos de captación.
- Líneas de conducción desde los pozos de captación.

Estación de Regulación y Medida: instalación que permite mediante la regulación de la depresión aplicada a cada línea, obtener el biogás producido.

Se compone de:

- Equipos mecánicos.
- Equipos de control y medida.
- Equipos auxiliares.

Central de Extracción: se encarga de poner en depresión todos los elementos previos antes mencionados y enviar el biogás hacia la zona de valorización. Se compone de:

- Elementos electromecánicos.

Colector General: es la conducción que transporta el biogás desde la central de extracción hasta los puntos de consumo. Se compone de:

- Tubería de gas.

Central de Control: en ella se analizan secuencialmente las diferentes muestras a estudiar. Se compone de:

- Armario de control y potencia
- Central de análisis

Antorcha: Para la combustión del biogás excedente que no se consuma en los motores.

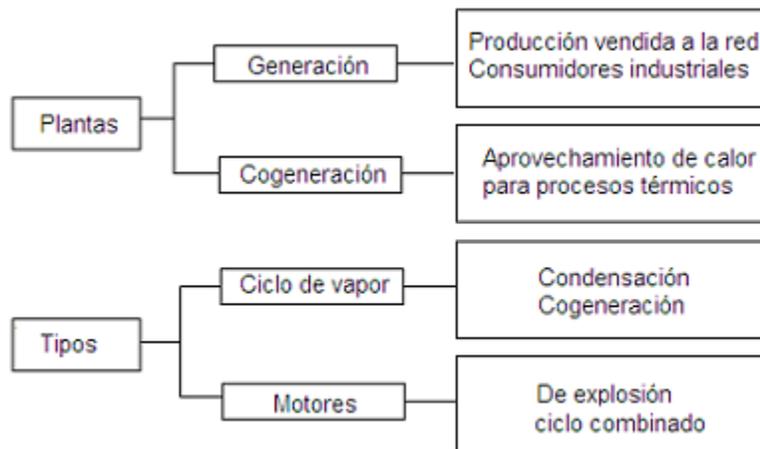
Sistema Motor-Generador: es el sistema que permitirá la generación de energía eléctrica, a partir del gas, mediante su uso como combustible en motores de combustión, que a su vez accionan un generador.

3.3. Aspectos de la Producción de Electricidad por Biogás

Para la transformación de biomasa en electricidad existen dos posibles vías (Figura 17) (16-97):

- *Combustión de biomasa*, para producción de un fluido, vapor, en donde su contenido en energía térmica se transforma en energía mecánica por medio de una turbina.
- *Transformación de biomasa*, mediante procesos bioquímicos, biogás, o termoquímicos (pirólisis, gasificación), la biomasa se transforma en un combustible fluido que puede ser empleado en MCI o en turbinas de gas.

Figura 17. Generación eléctrica con biomasa (16-97)



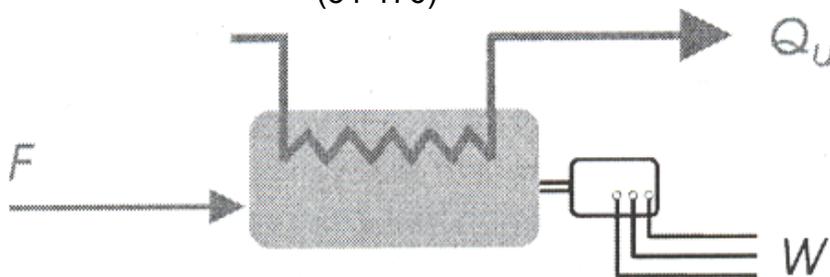
Fuente: Manuales de energías renovables, Página 97.

La producción eléctrica puede realizarse en instalaciones dedicadas exclusivamente a este fin, como en centrales eléctricas, o asociarse a industrias que se dedican a actividades que puedan consumir el calor residual, como es el caso de las plantas de cogeneración.

La utilización de la cogeneración en el sector ambientalista se ha situado en los vertederos controlados y en las estaciones depuradoras de aguas residuales, basadas en los procesos de fermentación anaerobia descritos en el capítulo 2. En el caso de la depuradora de aguas residuales el calor obtenido del motor se emplea en calentar el agua residual para mejorar la eficiencia del proceso. La energía eléctrica producida se utiliza entonces para los consumos propios de la instalación.

Un parámetro característico importante en las centrales eléctricas de cogeneración, en nuestro caso particular de biogás, es el rendimiento eléctrico, el cual será el rendimiento (η_{el}) del sistema para la producción de energía eléctrica (Figura 18).

Figura 18 Esquema de energías y calor de una central de cogeneración (54-176)



Fuente: Vicente Bermúdez, Tecnología Energética, Página 176.

El rendimiento es una comparación entre la energía que entra al ciclo, 100%, con la que finalmente se obtiene en forma de electricidad o de calor y electricidad. Para el biogás, si se posee el valor mínimo de poder calorífico de 4.07 kWh/m^3 y estimando un rendimiento del 30% se obtendría una energía del orden del 1.22 kWh . (54-176), según la ecuación 3.1.

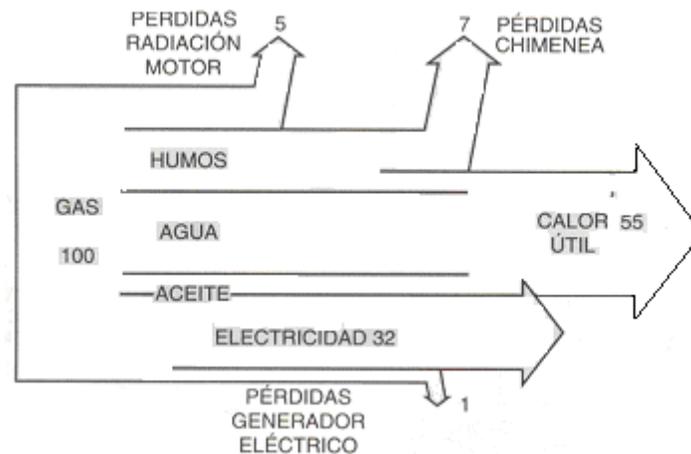
$$\eta_{el} = \frac{W}{F} \quad (3.1)$$

El tipo de nomenclatura que aparece en la Figura 18. se especifica como F, la energía de combustible; W, la energía eléctrica generada; Q_u, el calor útil y P, las pérdidas.

De la energía consumida por el motor, combustible, aproximadamente el 30% se convierte en energía eléctrica, alrededor del 60% es energía térmica útil aprovechable y el resto es energía que se pierde en forma de radiación y gases de escape calientes (55-17). Esta energía térmica se puede aprovechar en forma de recuperación de calor con una consideración especial en el diseño de una planta de producción de electricidad por biogás.

Esto se muestra en la Figura 19. con el diagrama de balance típico de un motor diesel.

Figura 19. Balance de energía típico en un motor diesel (55-18)



Fuente: Lluís Jutgar, Cogeneración de calor y electricidad, Página 18.

El porcentaje de rendimiento eléctrico se resume en la Tabla XIII, según la aplicación (16-98):

Tabla XIII. Rendimientos eléctricos (16-98)

Ciclo de Vapor	Rendimiento Eléctrico η_{el} (%)
Cogeneración electricidad y calor en centrales de pequeña potencia (<5MW)	18 – 22
Cogeneración electricidad y calor en centrales de media y alta potencia (>5MW)	20 – 25
Generación eléctrica en centrales trabajando a condensación	25 – 32
Otros Sistemas	Rendimiento Eléctrico η_{el} (%)
Aprovechamiento en motores de combustión interna (biogás)	30
Gasificación de biomasa y utilización en central de ciclo combinado (>5MW)	37

Fuente: Manuales de energías renovables, Página 98.

Los rendimientos globales de las plantas de cogeneración son mayores al añadir al rendimiento eléctrico el obtenido por la aplicación térmica η_t ; el cual se puede expresar de manera similar según la ecuación 3.2 (54-176).

$$\eta_t = \frac{Q_u}{F} \quad (3.2.)$$

Éste será el rendimiento del sistema para producir calor útil a partir de la energía del combustible.

3.4. Sistema de Cogeneración por medio de Motores de Combustión Interna

Los motores de combustión interna son el tipo de motor térmico más utilizado para la transformación de energía química de un combustible en trabajo. En sus aplicaciones convencionales, el objetivo es producir el máximo trabajo con el rendimiento más alto posible.

Las plantas de cogeneración que utilizan MCI pueden ser utilizadas al mezclar el biogás con el diesel o con gasolina o simplemente utilizar biogás como su combustible. A continuación se exponen algunas razones para su uso (56-265):

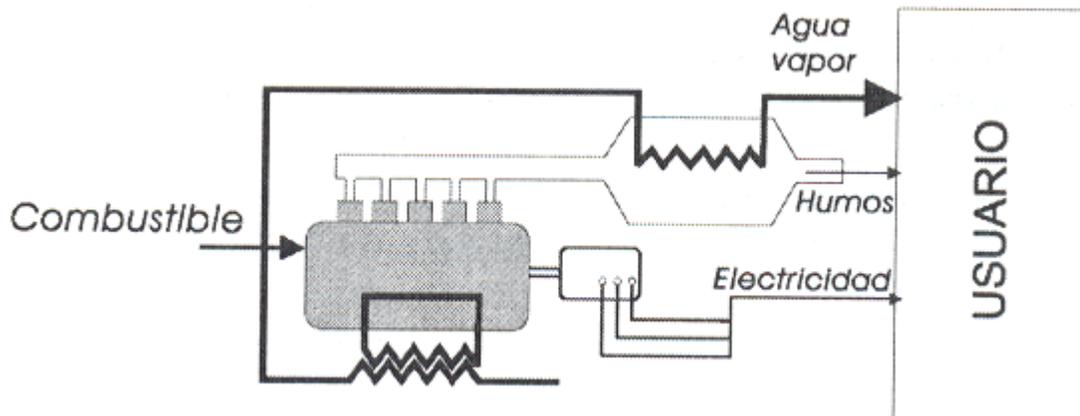
- La disponibilidad de motores de funcionamiento seguro y eficiente en una amplia gama de tamaños.
- El perfeccionamiento de los reguladores de velocidad que aseguran la generación de electricidad a la frecuencia necesaria.
- La disponibilidad de combustible no convencional de buena calidad y precio atractivo, como lo es el biogás.

Existen motores alternativos que se pueden utilizar para la generación de electricidad, entre los cuales están: el de encendido provocado por chispa o gasolina, que comprende un ciclo Otto, el motor encendido por compresión o motor Diesel, el motor Bi-fuel que opera en el ciclo Otto modificado para operar con dos combustibles (gasolina y gas), el motor a gas o biogás como combustible y el motor que consta de un ciclo dual, que requiere diesel y gas para su funcionamiento.

Además del rendimiento eléctrico y térmico comentado en el apartado 3.3, existe cierta energía que se va al sistema de refrigeración del motor y a los gases de escape, la cual se puede recuperar en forma de calor y considerarlo en la generación de electricidad.

En la Figura 20. se muestra el sistema simple de cogeneración con un motor que puede ser alimentado con biogás.

Figura 20. Esquema de cogeneración por medio de un MCI (54-187)



Fuente: Vicente Bermúdez, Tecnología Energética, Página187.

Una característica de la generación eléctrica por medio de biogás es que en estos motores el calor se puede recuperar a baja temperatura y en circuitos diferentes, por lo que parte del calor se capta del sistema de refrigeración de las camisas del motor, a 100 °C, parte del sistema de refrigeración de aceite, a 110 °C, de la refrigeración del aire de sobrealimentación del motor a 150 °C y de los gases de escape del motor, hasta unos 400 °C (54-188). Por estos factores se dificulta la recuperación del calor útil del motor, por lo que en ciertos casos los gases de escape se utilizan en hornos, secaderos o produciendo vapor a baja presión o agua caliente para ser empleados en una caldera de recuperación.

En sistemas de cogeneración suelen utilizarse motores marinos de gran cilindrada sobrealimentados. Éstos se caracterizan por su alto rendimiento eléctrico, 40 - 50%, con potencias unitarias que pueden alcanzar desde los 20 MW, en motores de cuatro tiempos, hasta los 50 MW, en motores de dos tiempos. También se pueden utilizar motores de gas que son en realidad motores marinos diesel en los que se han hecho modificaciones para gasificarlos. Los rendimientos eléctricos que alcanzan son menores que los anteriores llegando hasta valores de 30 a 40%. En sistemas en donde se posee alimentación de gas natural suelen utilizarse más comúnmente, llegando a tener potencias unitarias de 3 MW (54-188).

La sobrealimentación referida anteriormente tiene como objetivo introducir en el cilindro una masa de fluido activo superior a la correspondiente a la aspiración atmosférica, para lo que éste se comprime antes de que entre en el cilindro. Con esto se consigue una mayor potencia a igualdad de cilindrada. Con este proceso el compresor comprime solamente aire, con lo que permite inyectar más combustible que el que corresponde a la cilindrada (56-285).

Una ventaja de estos motores es que pueden quemar combustible de baja calidad, líquidos o gaseosos, por lo que son adecuados para su utilización en la combinación de biogás y diesel. En este caso el biogás puede reemplazar hasta de un 80 a un 95% del diesel utilizado en el motor dual, esto es debido a la baja ignición del biogás lo que no permite reemplazar la totalidad del diesel en este tipo de motores que carecen de bujías para la combustión (35-5). Estos motores diesel tienen un buen comportamiento y rendimiento a carga parcial, permiten un arranque fácil y no poseen limitaciones en el número de arranque.

Para los motores a biogás las medidas y dimensiones no difieren de las otras opciones de acuerdo a la potencia, su peso y construcción o requerimientos de materiales de un motor a gasolina, pero teniendo el cuidado de eliminar la reacción del H_2S con el vapor de agua. Los principales esfuerzos enfocados al desarrollo de estos motores están dirigidos hacia la optimización de las siguientes características:

- Incrementar la relación de compresión.
- Combustión con mezcla pobre.
- Control de inyección de combustible y de la relación aire – combustible.
- Ajuste del tiempo de ignición.
- Sensores del contenido de oxígeno en el escape.

3.5. Combustibles Gaseosos en Motores de Combustión Interna

Para una adecuada utilización de un combustible en un MCI debe de reunir los siguientes requisitos: mezcla y combustión rápida y no dejar residuos sólidos. Por lo que se puede reiterar lo dicho con anterioridad, que un combustible gaseoso puede ser utilizado en un MCI.

En estos MCI, se pueden utilizar los gases como el biogás o gas natural. Se trata de mezclas de gases con diferentes composiciones, de forma que en cada caso es necesario conocer su composición exacta para poder valorar su poder antidetonante. De todos los gases, el gas natural es el más utilizado por su disponibilidad y ciertas ventajas como su difusión en el aire que permite la obtención de mezclas homogéneas, pudiendo quemar mezclas más pobres (56-297).

En los motores que funcionan con gas pueden tenerse tres tipos de combustión dependiendo de las siguientes características (56-298):

1. *MCI en los que se comprime aire y el encendido se provoca por inyección de gas a alta presión.* Son los de mayor grado de compresión y más alto rendimiento. Estos requieren compresor e inyector.
2. *MCI en los que se comprime una mezcla pobre y el encendido se realiza mediante la inyección piloto de diesel.* El grado de compresión y el rendimiento global alcanzado es menor que los anteriores, requiriendo carburador y equipo de inyección.
3. *MCI en los que se comprime una mezcla de gas-aire, siendo el encendido provocado por bujía.* Tanto el grado de compresión como el rendimiento global es inferior que para los anteriores. El sistema de combustión requiere de carburador.

Los motores con las características del segundo tipo suelen ser duales, como se hace mención anteriormente, trabajan con diesel o con gas, con inyección piloto diesel para el encendido. Estos motores se utilizan en lugares en los que no se puede garantizar un suministro continuo de gas. En el caso de una interrupción, el motor pasa a funcionar como una unidad diesel, de forma manual o automática dependiendo de la instalación. Al interrumpirse el suministro de gas, la presión en la línea comienza a caer, y ésta depresión es la señal la que se utiliza para que el motor pase a funcionar como diesel (56-298).

El biogás en la actualidad posee tanta importancia como el gas natural en la alimentación de los MCI, sin embargo, la utilización del biogás como combustible requiere la eliminación previa del H_2S , pues es corrosivo, atacando químicamente a todas las partes metálicas del motor. El azufre se combina con el vapor de agua formando ácido sulfúrico, que atacaría a las tuberías, intercambiadores, y a todo el sistema en donde se tenga contacto. Por lo que se debe de evitar reducir la temperatura de los gases de escape por debajo del punto de rocío.

Es importante evitar el grado de humedad en el biogás y alejarlo del punto de rocío para que no se produzcan condensaciones en el contacto con las superficies más frías de las tuberías de admisión que lo conducen a los motores, por lo que se puede proceder con las siguientes etapas (50-3):

- Enfriamiento del gas hasta $20^{\circ} C$. De esta forma se produce una deshumidificación del gas hasta garantizar un contenido máximo de humedad de 20 mg/l.
- Separación de gotas.
- Calentamiento del biogás hasta $50^{\circ}C$. De esta manera nos alejamos de forma definitiva del punto de rocío.

A continuación se presentan ciertas características de rendimiento de motores alimentados con biogás de la marca Austriaca Jenbacher Energiesysteme, Tabla XIV (57).

Tabla XIV. Modelos de Motores de Cogeneración a Biogás

Modelo	Potencia Eléctrica (KW)	Potencia Térmica (KW)	Rendimiento Eléctrico %	Rendimiento Total %
JMS 312 GS-B.L	625	757	38.7	85.5
JMS 316 GS-B.L	836	1,010	38.8	85.7
JMS 320 GS-B.L	1,048	1,236	38.9	85.8

Fuente: Power on line, 2004.

Otro ejemplo pero de un Grupo Motor – Generador alimentado a Biogás, de la casa Argentina Palmero es el especificado en la Tabla XV y Tabla XVI (58), mostrando su ficha técnica en el ANEXO 2.

Tabla XV. Capacidades de Generación Grupo Motor-Generador Palmero
PPG-900

Servicio / frecuencia	Prime	Standby Continua	Standby Máxima
440 V / 60 Hz	900 KVA 720 KW	900 KVA 720 KW	990 KVA 792 KW

Fuente: Palmero, 2004.

Definición de Capacidades

Potencia Prime: Corresponde al estándar 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 energía de red comercial. Existe una sobre carga del 10% en este caso.

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

UTILIZACIÓN DEL BIOGÁS PARA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE
LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU)

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

Tabla XVI Datos técnicos grupo Motor – Generador Palmero PPG-900 (58)

Datos Técnicos Motor			
Número de Cilindros	16 en "V"	Velocidad de Motor (RPM)	1,200
Cilindrada (l.)	61,123	Potencia Máxima Volante (KW)	880
Diámetro (mm.)	160	Velocidad de Pistón (m/s)	9.5
Carrera (mm.)	190	Consumo de Combustible (m³/KW_eh)	0.28
Relación de Compresión	9.5 : 1	Emisión de Calor de Escape (KW)	496
Aspiración	Turbo Sobrealimentado	Emisión de Calor del Sistema de Enfriamiento (KW)	715
Post-enfriamiento	Aire / Agua	Calor Total Irrradiado (KW)	80
Refrigeración	Agua	Temperatura de Escape (°C)	371
Presión Mínima Gas (mbar)	15 – 50	Caudal de Aire de Enfriamiento (m³/min)	2,654
Regulador de Velocidad	Electrónico	Caudal de Aire de Combustión (m³/min)	65.4
Frecuencia (Hz)	60	Caudal Gases de Escape (m³/min)	148.3
Datos Técnicos Generador			
Ejecución	Monocojinete	Tipo de Bobinado	6 Terminales
Coseno Fi	0.80	Paso de Bobinado	Acortado 2/3
Tipo	Brushless	Distorsión de Armónicas	</= 1.5%
Sistema de Regulación	Electrónico	Intensidad a 60Hz., 440 V	1.181
Precisión Regulación de Tensión	5%	Corriente de Cortocircuito	>3.5In
Rendimiento 60Hz a plena Carga	95.1%	Reactancia transitoria, 60Hz, 440V	22%
Aislamiento	Clase H	Reactancia Subtransitoria, 60Hz, 440V	16%

Fuente: Palmero, 2004.

3.6. Cálculo de Biogás Generado y Capacidad de Generación a Instalar

3.6.1. Cálculo de emisión de los principales gases del biogás, CH₄ y CO₂ (59-30)

Estimación de CH₄

Con la siguiente Ecuación 3.3. se puede realizar el cálculo de emisiones la estimación de generación de biogás generado en el vertedero del Trébol.

$$Q_{CH_4} = Lo * R * (e^{-K*C} - e^{-K*T}) \quad (3.3.)$$

En donde se tiene:

Lo = potencial de generación de CH₄ en m³/Tn de RSU vertida.

R = media anual de RSU en Tn/año

K = Ratio de generación de CH₄ en 1/año

C = tiempo desde la clausura del vertedero en años

T = tiempo desde la primera deposición de basura en años

Para determinar los distintos valores de las variables descritas en la Ecuación 3.6. se procede de la siguiente manera:

Cálculo de Lo:

Lo depende de la fracción orgánica de los RSU y de la humedad; el valor puede variar entre los siguientes valores de CH₄: 6.2 y 270 m³/Tn de RSU.

Para la estimación del potencial de generación de CH₄ se procede con la Ecuación 3.4.

$$Lo = DOC * DOCf * \frac{16}{12} * F * MCF \quad (3.4.)$$

En donde se tiene:

DOC = fracción de carbón orgánico degradable en la basura, procediendo de la siguiente manera, Ecuación 3.5.:

$$\text{DOC} = 0.4 * (\% \text{papel y textiles}) + 0.17 * (\% \text{orgánicos procedentes de jardines}) + 0.15 * (\% \text{orgánico de comida general}) + 0.38 * (\% \text{madera}) \quad (3.5.)$$

DOCf = porción de DOC que se convierte a gas, según Ecuación 3.6.

$$\text{DOCf} = 0.014 * T + 0.28 \quad (3.6.)$$

Donde **T** es la temperatura en la zona anaeróbica que se considera como 35°C.

F = fracción de CH₄ en el gas gestionado, considerado como 0.5.

MCF = cantidad de CH₄ en el biogás, teniéndose los siguientes valores:

- Para vertederos gestionados se considera con valor = 1
- Para vertederos no gestionados de profundidad menor de 5m se considera con valor = 0.4
- Para vertederos no gestionados y más profundos se considera el valor = 0.8

Cálculo de R:

Para realizar el cálculo de la media anual de RSU vertida, se procede con la Ecuación 3.7.

$$R = \frac{\text{capacidad del vertedero}}{\# \text{ de años en funcionamiento}} \quad (3.7.)$$

Si la capacidad del vertedero se desconoce, pero se conocen sus dimensiones se calcula como sigue. (Ecuación 3.8.)

$$\text{Capacidad} = \text{área de vertedero} * \text{profundidad del vertedero} * \text{densidad de RSU (3.8)}$$

Se puede estimar la densidad de la basura de acuerdo a valores estándar, como sigue:

- Basura compactada: 653 –831 kg/m³
- Basura degradada o asentada: 1,009 – 1,127 kg/m³
- Si se desconoce si ha sido compactada: 688 kg/m³

En caso que el vertedero reciba materiales no degradables éstos no deberán de considerarse en R. Se entiende como materiales no degradables el cemento, ladrillo, piedra, plástico, vidrio, metales y yeso.

Cálculo de K:

El ratio de generación de CH₄ depende de la humedad, pH, temperatura, entre otros factores medioambientales, así como de la operación del vertedero. Actualmente se poseen valores estimados determinados por distintas fuentes los cuales se presentan en la Tabla XVII:

Tabla XVII Valores estimados por EPA para las constantes. (59-31)

Valores Estimados	EPA	NPI	IPCC
Lo (m ³ /Tn RSU)	100	79	100 – 200
K (1/año)	0.04 (clima lluvioso)	0.058	0.004-0.4
	0.02 (clima seco)		

EPA: US Environmental Protection Agency

NPI: National Pollutant Inventory (Australia)

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

Fuente: Guía técnica para la medición, estimación y cálculo de las emisiones al aire, sector gestión de residuos, Página 31.

Para realizar los cálculos de emisiones de gas, se tomarán los valores de k de la EPA (US Environmental Protection Agency), teniendo en cuenta el clima de la zona:

- 0.04 para áreas de tiempo lluvioso (más de 635 l de agua/m² al año)
- 0.02 para áreas de tiempo seco (menos de 635 l de agua/m² al año)

Cálculo de C:

El tiempo de la clausura del vertedero deberá de estar en años.

Cálculo de T:

El tiempo desde la primera deposición de los RSU deberá de tomarse en años.

Estimación de CO₂

Una vez estimada la emisión del CH₄, se puede determinar la emisión de CO₂, teniendo en cuenta la composición del biogás. De acuerdo a la Tabla 2.1. se puede tomar como valores de porcentaje de CH₄ y de CO₂ 55 y 40%, respectivamente, por lo que según la Ecuación 3.9.

$$Q_{CO_2} = Q_{CH_4} * \frac{40}{55} \quad (3.9.)$$

Para calcular las emisiones no controladas de compuestos "p" en un vertedero en kg/año se calcula de la Ecuación 3.10. Esta ecuación es necesaria para poder calcular las emisiones controladas en un vertedero.

$$UM_p = \frac{Q_p * MW_p * 1atm}{(8.205 * 10^{-5} m^3 atm/gmol \text{ } ^\circ K)(1000g/kg)(273 + T^\circ K)} \quad (3.10.)$$

En donde:

UM_p = emisión del contaminante p no controlado, kg/año

MW_p = peso molecular de p, g/mol

Q_p = ratio de emisión de p, m³/año

T = temperatura del vertedero, °C (si se desconoce, se considera T = 25°C)

Para vertederos de RSU con sistemas de control por combustión como por ejemplo motores de combustión interna, se puede hacer los siguientes cálculos para obtener las emisiones controladas de los contaminantes, CH₄, CO₂, Dióxido de Nitrógeno (NO₂).

Por lo que, para el cálculo de las emisiones controladas de CH₄, se debe de estimar la eficiencia del sistema de recogida del gas. Las eficiencias de los sistemas de recogida, pueden ir desde 60 a 85%, con una media del 75%, pero estas eficiencias las deberá proporcionar el fabricante del equipo. Además se debe tomar en cuenta la eficiencia de los sistemas de control, la cual también las deberá dar el fabricante.

Entonces para el CH₄ se calcula de acuerdo a la Ecuación 3.11.

$$CM_{CH_4} = [UM_{CH_4} * (1 - \frac{\eta_{col}}{100})] + [UM_{CH_4} * \frac{\eta_{col}}{100} * (1 - \frac{\eta_{cnt}}{100})] \quad (3.11)$$

En donde:

CM_{CH₄} = emisiones controladas del CH₄, kg/año

UM_{CH₄} = emisiones de no controladas del CH₄, kg/año

η col = eficiencia de recogida de gas

η cnt = eficiencia del sistema de control

Para el cálculo de las emisiones del CO₂, las cuales incluyen el CO₂ componente del biogás y un CO₂ adicional, éste formado durante la combustión del biogás.

Entonces para el CO₂ se calcula a partir de la Ecuación 3.12.

$$CM_{CO_2} = UM_{CO_2} + [UM_{CH_4} * \frac{\eta_{col}}{100} * 2.75] \quad (3.12)$$

En donde:

CM_{CO₂} = emisiones controladas de CO₂, kg/año

UM_{CO₂} = emisiones no controladas de CO₂, kg/año

UM_{CH₄} = emisiones de no controladas de CH₄, kg/año

η col = eficiencia de recogida de gas

2,75 = ratio del peso molecular de CO₂ y CH₄

El dióxido de nitrógeno (NO₂), es un dato que a veces se dispone en las garantías del fabricante del equipo de control. Si no es así, entonces se puede utilizar la Tabla XVIII de factores de emisión:

Tabla XVIII Factores de Emisión de NO₂ según distintos Sistemas de Control (59-34)

Sistema de Control	Contaminante	Kg./10 ⁶ m ³ CH ₄
Llama	NO ₂	650
Motor de Combustión Interna		4,000
Caldera / turbina de vapor		530
Turbina de gas		1,400

Fuente: Guía técnica para la medición, estimación y cálculo de las emisiones al aire, sector gestión de residuos, Página 34.

3.6.2. Cálculo de las Emisiones, Ejemplo Práctico Caso del Relleno Sanitario del Trébol ubicado entre las zonas 3 y 7 de la Ciudad de Guatemala

Utilizando los datos de materiales y porcentajes del contenido de RSU en Guatemala descritos en la Tabla 2.3.; y la información general descrita en el apartado 2.4. se puede calcular la cantidad aproximada de biogás en el Relleno Sanitario del Trébol.

Cálculo basado en Datos Mínimos:

Para realizar el cálculo se procede según la Ecuación 3.6. descrita anteriormente, $Q_{CH_4} = Lo * R * (e^{-k * c} - e^{-k * T})$.

Determinando el Potencial de generación de CH₄, Lo:

$$Lo = DOC * DOCf * \frac{16}{12} * F * MCF \quad (3.4.)$$

Determinando la fracción de carbón orgánico degradable en los RSU

$$DOC = 0.4 * (\% \text{papel y textiles}) + 0.17 * (\% \text{orgánicos procedentes de jardines}) + 0.15 * (\% \text{orgánico de comida general}) + 0.38 * (\% \text{madera}) \quad (3.5.)$$

$$DOC = 0.4 * (13.9 + 3.6) + 0.17 * (0) + 0.15 * (63.3) + 0.38 * (0)$$

$$DOC = 16.50$$

Determinando la porción de DOC que se convierte en gas

$$DOCf = 0.014 * T + 0.28 \quad (3.6.)$$

$$DOCf = 0.014 * 35 + 0.28$$

$$DOCf = 0.77$$

Si $F = 0.5$ y $MCF = 0.8$

$$Lo = DOC * DOCf * \frac{16}{12} * F * MCF \quad (3.4.)$$

$$Lo = 16.50 * 0.77 * \frac{16}{12} * 0.15 * 0.8$$

$$Lo = 6.77 \text{ m}^3/\text{Tn}$$

Determinando la media anual de basura

$$R = \frac{\text{capacidad del vertedero}}{\# \text{ de años en funcionamiento}} \quad (3.7.)$$

Determinando la capacidad del vertedero, debido a que la profundidad de 1,390 metros no puede ser del todo exacta se procede a tomar un dato mínimo de profundidad de 500 m. para efectos del análisis.

Capacidad = área de vertedero * profundidad del vertedero * densidad de RSU (3.8)

$$\text{Capacidad} = 45,000\text{m}^2 * 500\text{m} * 1,009 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Capacidad} = 22,702,500,000 \text{ Kg.}$$

$$\text{Capacidad} = 22,702,500 \text{ Tn}$$

Entonces, si se calcula desde 1984, significa 20 años de funcionamiento,

$$R = \frac{\text{capacidad del vertedero}}{\# \text{ de años en funcionamiento}} \quad (3.7.)$$

$$R = \frac{22.702.500 \text{ Tn}}{20 \text{ años}}$$

$$R = 1,135,125 \text{ Tn / año}$$

Si K se considera para un clima lluvioso según EPA = 0.04 y C se considera 0, con T = 20 años.

$$Q_{CH_4} = Lo * R * (e^{-K*C} - e^{-K*T}) \quad (3.3.)$$

$$Q_{CH_4} = 6.77 * 1,135,125 * (e^{-0.04*0} - e^{-0.04*20})$$

$$Q_{CH_4} = 4,231,794.71 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$Q_{CH_4} = 483.36 \text{ m}^3/\text{h}$$

Una vez determinado la emisión del CH₄ se procede a calcular la emisión de CO₂, según la Ecuación 3.9.

$$Q_{CO_2} = Q_{CH_4} * \frac{40}{55} \quad (3.9.)$$

$$Q_{CO_2} = 4,231,794.71 * \frac{40}{55}$$

$$Q_{CO_2} = 3,077,668.88 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$Q_{CO_2} = 351.33 \text{ m}^3/\text{h}$$

Para una producción total de Biogás de: 834.41m³/h.

Si desea conocer en kg/año las emisiones de los compuestos del biogás en emisiones controladas:

Para el CH₄ se calcula:

$$UM_{CH_4} = \frac{Q_{CH_4} * MW_{CH_4} * 1atm}{(8.205 * 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ atm/gmol } ^\circ\text{K})(1000\text{g/kg})(273 + T^\circ\text{K})} \quad (3.10.)$$

$$UM_{CH_4} = \frac{4,231,794.71 * 16 * 1atm}{(8.205 * 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ atm/gmol } ^\circ\text{K})(1000\text{g/kg})(298)}$$

$$UM_{CH_4} = 2,769,170.68 \text{ kg/año}$$

Para el CO₂ se calcula:

$$UM_{CO_2} = \frac{Q_{CO_2} * MW_{CO_2} * 1atm}{(8.205 * 10^{-5} m^3 atm/gmol \text{ } ^\circ K)(1000g/kg)(273 + T^\circ K)} \quad (3.11.)$$

$$UM_{CO_2} = \frac{3,077,668.88 * 44 * 1atm}{(8.205 * 10^{-5} m^3 atm/gmol \text{ } ^\circ K)(1000g/kg)(298)}$$

$$UM_{CO_2} = 5,538,341.36 \text{ kg/año}$$

Si se toman las características técnicas del equipo Motor – Generador Palermo PPG-900 con las descripciones de las Tablas XV, XVI y ANEXO 2, se toman los valores de la producción de CH₄ de acuerdo a los datos obtenidos de las emisiones del vertedero y asumiendo que la eficiencia del sistema de recogida de gas puede tener una media de caudal de 70% (Q_{CH₄}=338.35 m³/h), se calcula el número de unidades a instalar.

Con su consumo de placa y su potencia Prime se tiene el siguiente consumo en m³/h:

$$\text{Consumo} = 0.28 \text{ m}^3/\text{KWh} * 720\text{KW}$$

$$\text{Consumo} = 201.6 \text{ m}^3/\text{h}$$

Se puede considerar un aprovechamiento de biogás en un orden del 80% a lo largo de la captación de la emisión del gas, se tiene una captación de CH₄ de 270.68 m³/h, calculándose el número de unidades requeridas para el aprovechamiento del gas para generación de energía eléctrica.

$$\text{Unidades} = \frac{\text{captación, m}^3/\text{h}}{\text{consumo, m}^3/\text{h}}$$

$$\text{Unidades} = \frac{270.68 \text{ m}^3/\text{h}}{201.60 \text{ m}^3/\text{h}}$$

$$\text{Unidades} = 1.34$$

Si cada grupo Motor-Generador posee una capacidad de 720kW, entonces se puede tener una capacidad instalada de 966.72 kW. Por lo que se puede contemplar instalar al principio 2 grupos Motor - Generador integrados a la planta para abastecer dicha potencia, utilizando 1 grupo Motor-Generador y quemando el excedente en antorcha, y aumentar la potencia año con año, según la Tabla XXI.

Siguiendo el mismo procedimiento pero para datos medios y máximos según lo siguiente, se realizan cálculos generales de capacidad de potencia dependiendo de valores de producción de biogás:

Valores generales:

- Superficie: 45,000 m²
- Potencial de generación de CH₄ (Lo): 6.77 m³/Tn
- Considerando 20 años de explotación
- Grupo Motor-Generador con características Tablas 3.4 y 3.5

Valores variando la media anual de RSU dependiendo de los siguientes datos:

Mínimo:

- Densidad de RSU: 1,009 kg/m³
- Profundidad: 500 m

Medio:

- Densidad de RSU: 1,068 kg/m³
- Profundidad: 695 m

Máximo:

- Densidad de RSU: 1,127 kg/m³
- Profundidad: 1,390 m

Según los valores a variar se resumen los cálculos en la Tabla XIX, Figura 21 y Tabla XX, Figura 22.

Tabla XIX. Estimación de Caudal Captable de 70% de CH₄ en el Relleno Sanitario del Trébol de 2005 a 2024

Año	Caudal de CH ₄ Captable (m ³ /h) a 70%		
	Mínimo	Medio	Máximo
2005	338.35	497.81	1,050.63
2006	315.83	464.67	980.69
2007	294.64	433.49	915.28
2008	274.65	404.09	853.20
2009	255.88	376.48	794.89
2010	238.08	350.29	739.59
2011	221.61	326.05	688.43
2012	205.51	302.36	638.40
2013	189.76	279.20	589.49
2014	174.26	256.39	541.34
2015	159.12	234.12	494.32
2016	143.87	211.67	446.92
2017	127.76	187.97	395.12
2018	111.9	164.63	346.06
2019	97.49	143.43	301.49
2020	83.32	122.58	257.67
2021	69.51	102.27	214.98
2022	56.80	83.56	175.65
2023	45.41	66.81	140.45
2024	42.39	62.37	131.11

Figura 21 Comparación de CH₄ captable a 70% en m³/h de 2005 a 2024

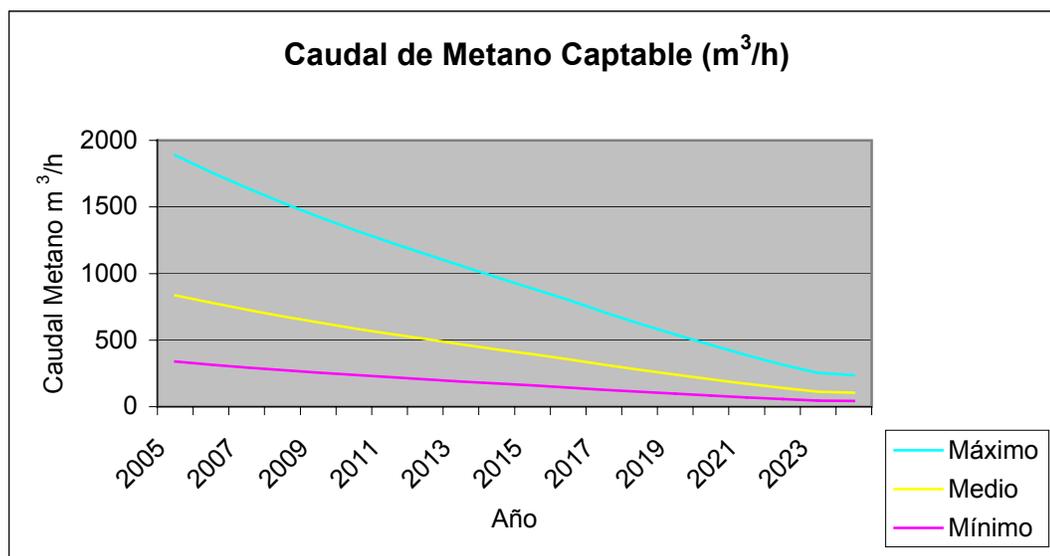
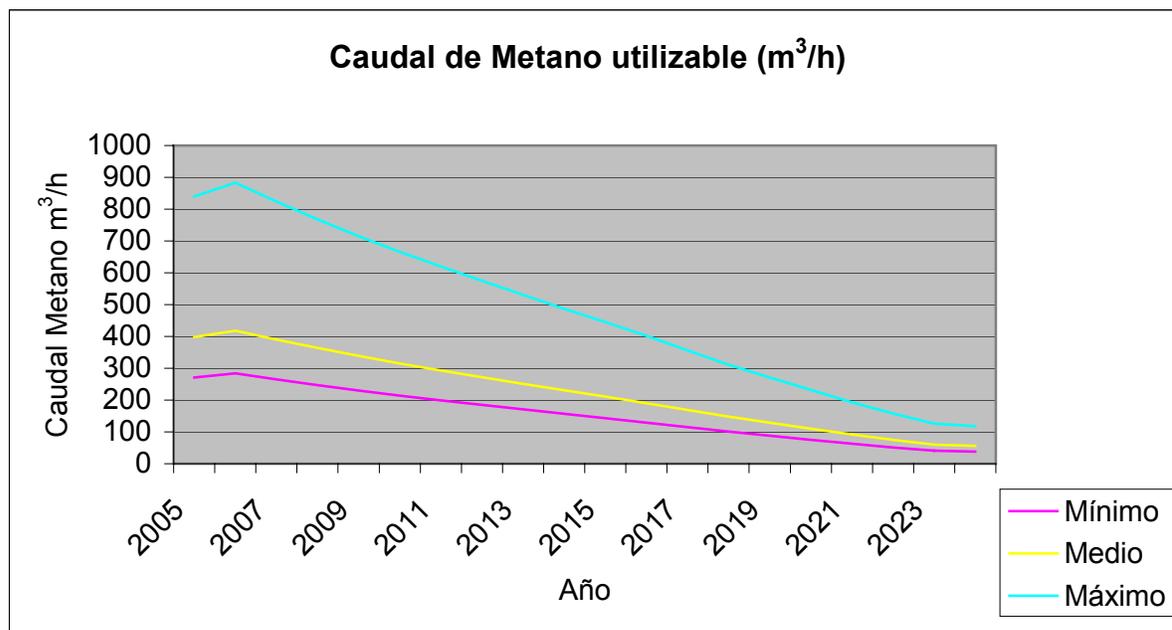


Tabla XX Estimación de caudal de CH₄ utilizable de 80% y optimizado a 90% en el Relleno Sanitario del Trébol de 2005 a 2024

Año	Caudal de CH ₄ utilizable (m ³ /h) con 80% el primer año y una optimización de 90% el resto de años		
	Mínimo	Medio	Máximo
2005	270.68	398.25	840.50
2006	284.24	418.20	882.62
2007	265.17	390.14	823.75
2008	247.19	363.68	767.88
2009	230.30	338.83	715.41
2010	214.27	315.26	665.64
2011	199.45	293.45	619.59
2012	184.96	272.12	574.56
2013	170.79	251.28	530.54
2014	156.84	230.75	487.21
2015	143.21	210.71	444.88
2016	129.48	190.50	402.22
2017	114.98	169.17	355.61
2018	100.71	148.17	311.45
2019	87.74	129.09	271.34
2020	74.98	110.32	231.91
2021	62.56	92.04	193.48
2022	51.12	75.21	158.09
2023	40.87	60.13	126.40
2024	38.15	56.13	118.00

Figura 22. Comparación de CH₄ utilizable a 80% y optimizado a 90% en m³/h de 2005 a 2024



UTILIZACIÓN DEL BIOGÁS PARA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU)

Con los cálculos efectuados se puede llegar al siguiente resumen de capacidad de potencia a instalar, Tabla XXI según el equipo del ANEXO 2.

Tabla XXI Resumen de capacidad de potencia a instalar y número de unidades de generación de energía eléctrica en el Relleno Sanitario del Trébol

# Años	Año	Caudal de CH ₄ Utilizable en motores a 80% el primer año y 90% los siguientes años (m ³ /h)			Número de Unidades de acuerdo al CH ₄ Utilizado en motores			Potencia posible de instalación a porcentaje de utilización de CH ₄ (kW)		
		Mínimo	Medio	Máximo	Mín	Me	Máx	Mínimo	Medio	Máximo
1	2005	270.68	398.25	840.50	1.34	1.98	4.17	966.72	1,422.32	3,001.80
2	2006	284.24	418.20	882.62	1.41	2.07	4.38	1,015.16	1,493.59	3,152.21
3	2007	265.17	390.14	823.75	1.32	1.94	4.09	947.04	1,393.37	2,941.96
4	2008	247.19	363.68	767.88	1.23	1.80	3.81	882.82	1,298.87	2,742.44
5	2009	230.30	338.83	715.41	1.14	1.68	3.55	822.48	1,210.11	2,555.02
6	2010	214.27	315.26	665.64	1.06	1.56	3.30	765.26	1,125.92	2,377.27
7	2011	199.45	293.45	619.59	0.99	1.46	3.07	712.33	1,048.03	2,212.82
8	2012	184.96	272.12	574.56	0.92	1.35	2.85	660.95	971.86	2,052.00
9	2013	170.79	251.28	530.54	0.85	1.25	2.63	609.95	897.41	1,894.80
10	2014	156.84	230.75	487.21	0.78	1.14	2.42	560.13	824.11	1,740.02
11	2015	143.21	210.71	444.88	0.71	1.05	2.21	511.47	752.52	1,588.87
12	2016	129.48	190.50	402.22	0.64	0.94	2.00	462.43	680.36	1,436.52
13	2017	114.98	169.17	355.61	0.57	0.84	1.76	410.66	604.19	1,270.04
14	2018	100.71	148.17	311.45	0.50	0.73	1.54	359.67	529.17	1,112.34
15	2019	87.74	129.09	271.34	0.44	0.64	1.35	313.35	461.02	969.08
16	2020	74.98	110.32	231.91	0.37	0.55	1.15	267.80	394.01	828.23
17	2021	62.56	92.04	193.48	0.31	0.46	0.96	223.43	328.73	691.00
18	2022	51.12	75.21	158.09	0.25	0.37	0.78	182.56	268.59	564.60
19	2023	40.87	60.13	126.40	0.20	0.30	0.63	145.97	214.76	451.44
20	2024	38.15	56.13	118.00	0.19	0.28	0,59	136.26	200.48	421.42

3.7. Ejemplos de Proyectos Existentes

Ejemplos en Europa

Planta piloto de recuperación de biogás en Garraf, Cataluña (46-14)

Este vertedero inició operaciones a finales de la década de los 80, anualmente recibía más de 500,000 toneladas de RSU.

Se proyectó una extracción máxima de biogás para el año 2000 de más de 70 millones de m³ anuales. La fase de extracción de biogás se planeó para realizarse en zonas selladas y clausuradas, es decir que no recibiesen más residuos.

Para la producción de electricidad se instaló un equipo de cogeneración con una potencia total de 500 kW, de modelo como el descrito anteriormente de la casa comercial Guascor. Se previó una extracción total de 150 m³/h para la aplicación de 40 m³/h al equipo de cogeneración durante 6,000 horas anuales y obtención de energía por el orden de 300,000 kWh. Además de 20 m³/h durante 1,000 horas anuales para uso final de calefacción.

El objetivo de la planta fue poder evaluar con mayor exactitud el potencial real del vertedero para futuros proyectos de aprovechamiento integral del biogás, y en a principios de siglo para el año 2003 ya se estimaba una producción de electricidad de la planta de 107 millones de kWh anuales, con lo que se abastecerían 18,000 familias, para el año 2006 se prevé clausurar completamente el vertedero, explotando la instalación hasta el 2013 (60).

Centro Montemarta-Cónica, Andalucía (61, 62)

El Centro de tratamiento de Residuos Montemarta-Cónica está ubicado en Andalucía, recibe los RSU procedentes los municipios que integran las mancomunidades de los Alcores y del Guadalquivir, recibe hasta 600,000 toneladas anuales. El centro consta del Vertedero controlado, Planta de Reciclaje-Compostaje, Central de Biogás con Generación de Energía Eléctrica, Centro de Formación e Investigación y Área Recreativa.

La explotación del vertedero se realiza de tal modo que 1 Tn. de RSU vertida ocupa 1.4 m³ de capacidad, incluyendo la tierra de recubrimiento. En una hectárea de terreno, se pueden depositar hasta 100,000 Tn.

La Central de Biogás consta actualmente de dos MCI de 1MW, y está prevista para una ampliación de hasta 5MW.

Ejemplos en América,

Actividad en México (51-118)

En México las actividades en torno a la generación de electricidad con biogás de rellenos sanitarios iniciaron en 1991, con proyectos para evaluar la factibilidad técnico-económica de generación con el biogás producido en seis rellenos sanitarios en el Distrito Federal clausurados. Como parte de los proyectos se instaló una primera planta piloto con una capacidad de tan solo 20 kW, con motores duales de diesel – biogás.

En los cinco sitios restantes se identificó un total potencial de 26 MW, con costos muy bajos de generación por kWh generado, esto es de alrededor de 2 y 3 centavos de dólar.

Es conveniente mencionar que en México, en el año 2000, se depositaban alrededor de 44,600 toneladas de RSU, lo que significó un confinamiento anual de 16,279,000 toneladas. Con esta cantidad de tonelaje anual se calcula una aprovechamiento de capacidad a instalar de 16MW al año.

4. ASPECTOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR MEDIO DE BIOGÁS

4.1. Evaluación Económica

El uso energético de los RSU ayuda a mitigar problemas ambientales, contribuye al suministro eléctrico, y abre nuevas oportunidades de participación del sector privado en la generación de electricidad. Sin embargo, este tipo de proyectos energéticos presenta barreras de orden institucional, político y, sobre todo del orden económico, las cuales deben de ser resueltas para permitir el desarrollo de los proyectos.

Las perspectivas para el despliegue de éste tipo de tecnología en magnitud nacional se complican por factores como la poca información a cerca de las características de los rellenos existentes; la falta de valorización de los rellenos como fuente de energía. Así mismo, existen factores que pueden alentar al desarrollo de éste tipo de proyectos, como las instituciones públicas y privadas comprometidas con la implantación de la tecnología, el interés que manifiestan las autoridades municipales, y ambientales, de resolver, en éste caso mediante la autogeneración eléctrica, la problemática representada por los RSU y por cargos de electricidad para servicios públicos.

En la actualidad existe en Guatemala la *Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable*, en su Artículo 1 declara de urgencia e interés nacional el desarrollo racional de los recursos energéticos renovables, además de que se estimulará, promoverán, facilitarán y crearán las condiciones adecuadas para el fomento de inversiones que se hagan con ese fin (28-1).

En el Artículo 3 y literales a y b, existe el compromiso para promover la localización e inventario de los recursos energéticos renovables, que sirvan para la generación de energía eléctrica y para impulsar los estudios para estimar el potencial técnico utilizable respectivamente.

Estas circunstancias empiezan a hacer económicamente más viable la inversión, y según se describe en el Artículo 5 bajo el término *Incentivos* se les insta a los interesados en el desarrollo de éste tipo de proyectos con la exención de derechos arancelarios para las importaciones incluyendo el Impuesto del Valor Agregado (IVA), exención del pago del Impuesto Sobre la Renta (ISR) y la exención del Impuesto a las Empresas Mercantiles y Agropecuarias (IEMA); todos con un período de validez por 10 años siempre que sean proyectos de generación de energía eléctrica por medio de recursos renovables.

El objetivo principal para la mayoría de las instalaciones de biogás a partir de RSU no es la producción de combustible para su posterior utilización en generación eléctrica, sino la estabilización de los RSU, los cuales a largo plazo ocasionarían graves perjuicios ambientales. Por este motivo lo que se considera es el beneficio ambiental que supone verter RSU en sitios controlados y evitar que se produzcan emisiones incontroladas de gases del conocido efecto invernadero. No obstante rebajar los costos y hacer viable en la medida de lo posible la inversión realizada ayuda a que se desarrolle un sistema sostenible en el tiempo y a una rentabilidad en la instalación (63-2).

Pero, la utilización del biogás como fuente energética puede realizarse atendiendo dos criterios (16-95):

- Suspensión de costos derivados de la eliminación de los residuos.
- Rentabilidad económica para la aplicación del biogás frente a combustibles convencionales.

Al tener cualquiera de los dos criterios anteriores definidos, entonces se puede proyectar el desarrollo de un proyecto de biogás, teniendo en cuenta ciertas consideraciones: por ejemplo que como media, la realización de instalaciones de biomasa o biogás requiere una inversión entre un 20 y un 100% mayor que las realizadas para combustibles fluidos convencionales. Lo que se deriva de los sistemas de gestión del combustible, además puede ser necesaria la implantación de equipos para realizar la adecuación del combustible.

Se debe considerar que los costos de operación pueden resultar superiores, sobre todo en el consumo de electricidad al existir más motores que en el caso de los combustibles fósiles.

Si se considera que los equipos que pueden consumir en un año cantidades de combustible que representen varias veces su valor de adquisición, siempre es mejor adaptar el equipo al combustible que adaptar el combustible al motor, puesto que resulta beneficioso, por sus propiedades, el realizar las mínimas operaciones posibles al combustible, de modo que sólo se deberá de tener en cuenta el control del H₂S que puede dañarlos.

Otro factor a considerar será el debido cuidado para la manipulación del biogás, a la hora del diseño de la instalación del sistema contra incendios.

Los costos asociados a la generación de energía eléctrica pueden separarse en tres factores a considerar: costo del combustible (biogás), costos de operación y mantenimiento, y costo de capital.

El *costo del combustible* es la variable fundamental que permite ver la viabilidad del proyecto, ya que la energía producida en KWh representa aproximadamente el 50% de los costos. El precio del combustible se ve afectado también por el rendimiento energético en la instalación en la planta, lo que significa que para una misma cantidad de combustible, cuanto mayor cantidad de KWh se obtengan, menor incidencia del costo del combustible. O sea que, cuanto mayor sea el costo del combustible más necesario se hace acudir a soluciones energéticamente más eficientes (16-88). Aunque es preciso considerar un alza anual en el biogás.

El *costo por mantenimiento y operación* debe de ser minimizado empleándose sistemas de alta fiabilidad, como motores adecuados al combustible a utilizar (biogás) y reduciendo al máximo posible todas aquellas operaciones que ayude al alza de los costos de operación y mantenimiento. Aunque se debe tener en consideración que estos costos pueden aumentar cada año, se puede estimar que para una planta de características medianas los costos de operación y mantenimiento suponen alrededor del 20% del costo global de producción de la energía eléctrica producida (16-88).

En los *costos de mantenimiento* para un motor a biogás se puede considerar que un mantenimiento mayor a las unidades se dá a unas 60.000 horas de funcionamiento y para los costos de operación considerando la mano de obra para operar la planta se debe considerar la capacidad instalada en la planta y la zona del país en donde se opere (64).

Se considera como el factor costo del capital a la representación de aproximadamente el 30% de los costos de producción del KWh. Para este factor es necesario optimizar el diseño de la planta obteniendo un buen rendimiento y eficiencia para conseguir un balance intermedio entre la eficiencia energética, el diseño óptimo y la inversión, para satisfacer las tres necesidades (16-104).

4.1.1. Inversiones en los Equipos

La evaluación de las inversiones tiene una gran importancia al igual que un análisis de los consumos. Por lo tanto al considerar que los costos de los equipos varían con la potencia y que también esta variación se debe al tiempo, para lograr una buena estimación de la inversión que deberá hacerse, será necesario conocer de los fabricante y / o proveedores los costos involucrados en las diferente partidas que componen la estructuración del proyecto de la planta (64).

Se puede considerar de una forma esquemática los siguientes factores para la estimación de los equipos, en un principio se contempla el motor-generador, luego conforme avance el proyecto se puede considerar la expansión energética con un sistema de recuperación de calor y otros componentes, la recuperación de calor se puede considerar como una inversión a largo plazo si no se posee el capital para su estimación desde el principio, sin embargo se puede prever para el futuro.

Por lo anterior se considera lo siguiente:

- **Motor – generador:** es la parte más importante de la instalación en la planta de producción y utilización de biogás para generación de electricidad. El costo por KW instalado en la planta dependerá del motor a utilizar. El costo dependerá del combustible a utilizar, es decir, de forma dual o simplemente biogás. El generador con los elementos de acople forman también parte de esta consideración.

Si se considera una recuperación de calor:

- Sistemas de recuperación de calor, el costo por KW en la potencia del motor en este tipo de sistema se incrementa en función de la complejidad del mismo y también disminuye con la potencia, y en un sistema utilizando MCI es considerablemente alto en comparación con otros equipos de los cuales se puede recuperar calor. El costo de los recuperadores de calor está en función del sistema de aprovechamiento de agua de refrigeración del motor y / o del escape de los gases.
- Otros elementos que se consideran con efectos económicos son: los quemadores post-combustión, instalación eléctrica que incluye el transformador, las protecciones, cables, identificación, equipos de medición, también se consideran los equipos complementarios como los de tratamientos de agua, desgasificadores, bombas, ventiladores, etc. Los elementos de conducción del biogás, como tuberías, compresores, filtros, válvulas, además de la obra civil que requiere el proyecto.

Además se deberá de tomar en cuenta otros factores que dependerán del diseño, como los paneles de operación, control y regulación de los motores, grado de automatización que se quiera en la planta, conexiones a la red de distribución en caso exista alguna. En el caso que se desee recuperación de calor dependerá de la complejidad del diseño de la recuperación.

4.1.2. Rentabilidad Económica

En el momento de evaluar la rentabilidad económica de una planta de aprovechamiento energético de biogás se deben de tener en cuenta dos factores principales: el primero que es la diferencia de las inversiones correspondientes entre los sistemas de aprovechamiento energético del biogás contra la diferencia de inversiones correspondientes a los sistemas basados en combustibles convencionales y el segundo que es la diferencia de precio existente entre el biogás como combustible contra los combustibles fósiles convencionales a utilizar(16-96).

Debido a lo anterior se puede expresar la siguiente expresión (Ecuación 4.1.):

$$I_o = I_b - I_f \quad (4.1)$$

En donde se considera I_o como la inversión inicial que es la diferencia entre la inversión en equipos de biogás I_b y los de combustibles fósiles I_f .

Se puede considerar así mismo el segundo factor que es el ingreso anual equivalente a los ahorros obtenidos en la diferencia del precio del biogás en moneda local / Tonelada, y el combustible fósil en moneda local / unidad, tomando en cuenta la relación entre los poderes caloríficos de ambos tipos de combustibles y el número de unidades energéticas en tep (tonelada equivalente de petróleo) consumidas anualmente, según la Ecuación 4.2.

$$A = \frac{E \times P_f}{PC_{I_f}} - \frac{E \times P_b}{PC_{I_b}} \quad (4.2)$$

A = ingresos anuales

E = número de unidades energéticas (tep)

P_f = precio combustible fósil (moneda / unidad)

PCI_f = poder calorífico inferior combustible fósil (tep / unidad)

P_b = precio biogás (moneda local / unidad)

PCI_b = poder calorífico inferior biogás (tep / unidad)

A partir de la inversión inicial y con los ahorros anuales, los que se consideran como ingresos, pueden estimarse distintos parámetros económicos para analizar el proyecto.

Pero fundamentalmente la producción de Biogás se produce dentro de otras actividades cuyos fines principales no son energéticos, por lo que es difícil establecer criterios económicos basados en los aspectos energéticos aplicados a este tipo de instalaciones (16-96).

4.2. Impacto Económico a Mediano y Largo Plazo

El impacto económico puede darse dependiendo del caso en el que se encuentre la planta de producción de biogás, si está o no conectada a la red eléctrica, si la planta dará servicio a usuarios o será para consumo propio.

A medio plazo y en el caso de que la planta no esté conectada a la red eléctrica, los ingresos económicos obtenidos por la planta pueden significar un ahorro en la factura por el suministro eléctrico de acuerdo a la utilización de sistemas energéticos propios. En este caso no se aprovechará el biogás producido, es necesario estar conectado a la red de distribución de energía eléctrica para necesidades propias del complejo.

Para un vertedero con su planta de producción de biogás, la conexión a la red eléctrica no es del todo necesaria, debido al posible autoabastecimiento, siempre y cuando se tenga la planta de generación de energía eléctrica.

También a medio plazo, y un caso muy común, es el de una planta de generación asociada a establecimientos consumidores de energía eléctrica y conectadas a la red; este caso presenta los mejores índices en cuanto a la valorización económica de la energía producida, ya que por una parte se obtiene el ingreso derivado de la energía no adquirida, y por otra, existe la posibilidad de ceder el excedente eléctrico generado a la red. En éste caso los ingresos provienen de dos vías, por la venta de los excedentes energéticos a la red y por los ahorros obtenidos en la factura energética, teniendo en cuenta que los ahorros deben calcularse a partir de las tarifas de compra y venta de energía eléctrica propuestos por el AMM, representado por un agente comercializador o considerado como un agente generador.

Si la planta está conectada a la red de distribución de energía eléctrica, los ingresos posibles proceden de la venta de energía eléctrica producida, a alguna empresa comercializadora de energía eléctrica.

Entre los impactos a largo plazo se pueden considerar los ingresos que pueden plantearse también como la posibilidad de obtenerlos por otros medios, puede ser el caso de comercializar el biogás para calefacción en hogares o industrias cercanas a la construcción de la planta. Otro aspecto a considerar puede ser el posible ingreso del valor comercial que pudiera adquirir el calor producido por los motores de combustión al generar electricidad.

Cabe mencionar que para la mayoría de proyectos de este tipo de instalaciones las inversiones hechas son a largo plazo, y por tanto, no se puede esperar una rentabilidad inmediata (16-88).

La rentabilidad inmediata puede ser tomada como un retorno de inversión en el que se calcula el tiempo que toma recuperar la inversión original, el ingreso del precio neto derivado o el ahorro neto realizado. A pesar de las limitaciones que se pueda tener en dicho cálculo, las técnicas de recuperación de la inversión pueden servir para el objetivo de utilidad del proyecto (64).

El número de años para que el capital invertido sea cubierto por los beneficios resultantes se calcula mediante el método de recuperación; en el cual el número requerido de años recibe el nombre de período de recuperación de pago o de equilibrio (64).

El período de recuperación se puede calcular de acuerdo a la Ecuación 4.3. (64)

$$\text{Período de Recuperación (PR)} = \frac{\text{Costo Inicial}}{\text{Beneficios Anuales} - \text{Costos Anuales}} \quad (4.3.)$$

La medida se calcula haciendo caso omiso del costo de oportunidad del capital. Los costos de inversión, generalmente, se definen como costos primarios; los beneficios se suelen definir como el cambio neto resultante en el flujo de caja o, en el caso de una inversión para reducir costos, como la reducción neta de flujo de salida de fondos (64).

Este método de recuperación atiende sólo a un atributo de la inversión, el número de años necesarios para recuperar costos, y no da una medición precisa de éste. Al no considerar los movimientos de fondos más allá del período de recuperación y, por tanto, no mide la eficiencia de una inversión a lo largo de toda la vida del proyecto. También desprecia el costo de oportunidad del capital, esto es, el no descontar costos que ocurren en distintos tiempos a una base común de comparación (64).

Sin embargo a pesar de las limitaciones en el cálculo del Período de Recuperación tiene ciertas ventajas al proporcionar información útil en la evaluación de una inversión. Mediante este cálculo se pueden obtener valores apropiados, como en el caso de una recuperación rápida en donde se dispone de recursos financieros para invertir por un solo período; o cuando la vida esperada del activo es altamente incierta, la determinación del período de recuperación es útil para establecer la probabilidad de lograr una inversión conveniente.

4.3. Impacto Ambiental

Las altas concentraciones de la población en los núcleos urbanos, así como el desarrollo en la industria y cambios socioeconómicos, como prácticas de consumo a gran escala, han proporcionado la producción de grandes cantidades de residuos orgánicos que ocasionan graves problemas ambientales.

Como se comenta en el Capítulo 1, la energía es un elemento clave para el desarrollo económico y social, su producción y consumo representan una importante agresión al medio ambiente y constituyen la principal interferencia humana en el sistema climático. El concepto de energías renovables crece al aumentar la necesidad urgente de integrar aspectos medioambientales y de desarrollo sostenible en la política energética.

El metano es uno de los constituyentes principales al inventario mundial de gases de efecto invernadero a los cuales se atribuye en gran medida el cambio de clima observado en nuestro planeta. Las principales fuentes de metano a nivel mundial son: la ganadería, el cultivo del arroz, las minas de carbón, los rellenos sanitarios, las fuentes de suministro de combustibles fósiles y el venteo de las plantas procesadoras de hidrocarburos.

Las concentraciones de RSU no controladas y la producción de energía eléctrica son preocupaciones a nivel mundial. Para dar seguimiento a los acuerdos derivados del Protocolo de Kyoto, acuerdo que obliga a los países desarrollados a reducir sus emisiones de dióxido de carbono (CO₂), las naciones comprometidas a reducir sus emisiones de gas de efecto invernadero establecieron el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y han creado instrumentos como Bonos, o certificados, de Carbono. Los proyectos de captura de metano y su conversión a electricidad, son idóneos para tales mecanismos.

La emisión de CO₂ contribuye al fenómeno de cambio climático o cambio del clima, el cual es ocasionado directa o indirectamente por actividades humanas. Diversos expertos estiman que el cambio climático ocasionará efectos adversos de diversa índole durante el presente siglo, como un aumento en el nivel del mar y una intensificación de eventos climáticos extremos como sequías, inundaciones, etc.

Es de conocimiento que la generación de energía eléctrica a partir de fuentes fósiles emite a la atmósfera diversos compuestos contaminantes, entre los que destacan dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y partículas, que contribuyen a la acidificación de los suelos y las aguas naturales, con repercusiones en la salud, las infraestructuras y los ecosistemas (1-6).

Los impactos de ámbito regional o global se enmarcan en la contaminación del medio ambiente atmosférico y conlleva problemas como la lluvia ácida, el cambio climático, la destrucción de la capa de ozono estratosférico y la contribución al aumento del ozono troposférico. Estos problemas constituyen en conjunto impactos en los que intervienen un amplio grupo de compuestos emitidos, principalmente, durante los procesos de combustión.

Debido a esto, la mayoría de las tecnologías renovables representan una opción ventajosa, aunque los procesos de combustión de biomasa y de biogás presentan un impacto ambiental, que a pesar de estos factores implican ciertas ventajas frente a las opciones convencionales (1-6).

La producción y consumo de energía se consideran como los principales responsables de las emisiones de gases de efecto invernadero, por lo que el desarrollo de las energías renovables es el mejor instrumento para combatir este fenómeno. Los gases que producen el denominado efecto invernadero son: el CO₂, CH₄, óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFC), hexafloruro de azufre (SF₆) y perfluorocarbonos (PFC). De ellos, el CO₂ representa por sí solo las tres cuartas partes del total, una vez ponderados por su potencial de calentamiento global a 100 años, más del 90% de éste es de origen energético (1-8).

Con la producción de biogás en un vertedero controlado se intenta un tratamiento óptimo para los RSU en el que se contempla la máxima revalorización de ellos, inicialmente se requerirá la separación de la fracción orgánica de los RSU, para poder obtener energía eléctrica y con esto reducir el impacto ambiental y el volumen de los RSU en una gran magnitud. Un efecto del mal control de emisiones de biogás potencian también el efecto invernadero, para lo que es necesario su control y tratamiento. Debido a esto, el biogás no quemado en un MCI para producción de energía eléctrica debe de eliminarse mediante combustión en antorchas para evitar dicho impacto medioambiental.

Según la expresión de Evaluación de Impacto Socioeconómico (EIS), para la previsión y evaluación de impactos en el medio ambiente se propone, en cuanto a realizar un proyecto de un vertedero controlado, para el vertido de los RSU, que éste debe contar con la información necesaria como: el número de personas que intervienen en el proyecto, tipo y tamaño de las instalaciones, instalaciones comerciales, oficinas, servicios de salud, capacidad, y método de gestión para la planta de producción de aprovechamiento de los RSU (65-605).

Según el Manual de Evaluación de Impacto Ambiental (65-623) se deben aplicar los siguientes criterios para la identificación de impactos: *Naturaleza del impacto*, que incluye la probabilidad de ocurrencia, personas afectadas, extensión geográfica y duración. *Gravedad del impacto* que se debe a la sensibilidad local y a la magnitud, referenciándolas a la población. Y por último la *posibilidad de corrección*, con reversibilidad, costos económicos y capacidad institucional.

En lo referente a las emisiones contaminantes relacionados con el efecto invernadero o, simplemente, contaminantes atmosféricos procedentes del funcionamiento del proyecto, deben considerarse inventarios existentes de emisión de gases para la zona en donde se desarrolla el proyecto o donde se desarrollará el proyecto. Para esto se necesita elaborar un inventario, que represente un balance en las emisiones totales de contaminantes atmosféricos procedente de todas las fuentes del proyecto propuesto, que incluyen a los gases del vertedero y de la combustión del biogás en la planta de producción de energía eléctrica. Las etapas básicas asociadas con la elaboración del inventario de emisiones son las siguientes (65-209):

- Clasificar todos los contaminantes y fuentes de emisión procedentes del proyecto. Deben de considerarse las emisiones durante las fases de construcción y funcionamiento.
- Identificar y reunir información sobre los factores de emisión de contaminantes gaseosos para cada uno de los contaminantes de las fuentes identificadas.
- Calcular la tasa de emisión de cada contaminante a la atmósfera, sobre una base anual. La base anual se elige para poder comparar sistemáticamente las emisiones de un proyecto o actividad propuesta con los inventarios de emisión existentes en la zona.

- Suma de las emisiones de contaminantes específicos para cada una de las fuentes identificadas en el proyecto.

Un aspecto importante para el desarrollo sostenible del proyecto es la ubicación del vertedero, pues puede causar ciertas dificultades para la generación de energía eléctrica. En un principio se suele ubicar el vertedero en zonas alejadas de las poblaciones para evitar los problemas de migración de elementos tóxicos generados en el vertedero, para evitar el impacto visual, los ruidos y malos olores.

4.4. Beneficios e Inconvenientes

Tanto los beneficios como los inconvenientes deben de orientarse a los usuarios, a la sociedad y al medio ambiente para proteger el entorno global de manera que se garantice el desarrollo sostenible.

Un nivel de producción de biogás elevado puede rentabilizar la inversión necesaria para la construcción de una planta de producción de biogás en un vertedero. Pero para realizar el mayor aprovechamiento del proyecto y tener los mayores beneficios se debe contar con una alta producción del gas y con un correcto sistema de aprovechamiento.

El principal objetivo y beneficio en este tipo de instalaciones es la estabilización de los RSU, más allá de la producción de biogás como combustible (63-6). Una buena medida es que el vertedero se localice en áreas que no son usadas por la población, debido al altísimo rechazo social, por ser fuente de molestias de todo tipo. Si el vertedero se sitúa en áreas alejadas de los centros poblados, existe el inconveniente de que también estarán alejados de la red de distribución eléctrica.

De modo que si el vertedero es grande, y moderno, además del movimiento de tierras que requiere, puede existir la necesidad de una línea eléctrica que suministre electricidad al equipo del vertedero. De ser así entonces un beneficio del proyecto puede ser que la energía eléctrica generada por medio de biogás pueda engancharse a la red de distribución eléctrica, utilizando la misma línea eléctrica.

La consecuencia de vertederos localizados en aquellos lugares más alejados, han resultado a la larga más vulnerables y con mayor valor ambiental, al considerarse áreas de ecosistemas valiosos, por tanto que hay que cambiar de concepto de relleno sanitario y utilizar el vertedero como algo imprescindible y convenientemente legislado (66-213).

Siendo la cultura del residuo uno de los aspectos fundamentales a cambiar, su productor debe de ser conciente de los problemas de carácter económico y ambiental que van a generarse en la fase de tratamiento y eliminación. Desde el punto de vista económico, un residuo nunca tiene un valor cero, sino un valor negativo cuya cuantía está en función de la complejidad de su tratamiento, como por ejemplo la producción de biogás tratada a lo largo de ésta redacción, y no existe ningún lugar que tenga vocación para recibir un vertedero ni que merezca ser alterado por actuaciones como son los vertederos de RSU (66-215).

Algunos de los inconvenientes que se pueden dar en el momento de evaluación de un proyecto de este tipo puede ser la limitación de períodos políticos y de gestión de los gobiernos municipales, la falta de leyes de protección al medio ambiente en materia de emisiones de rellenos sanitarios, desconocimiento real de las oportunidades y beneficios de la generación eléctrica con el biogás de los rellenos sanitarios, pocos medios financieros para efectuar las estudios de preinversión.

Además, se posee muy poca información sobre la cantidad y características de los rellenos sanitarios y sitios de disposición final de los RSU en Guatemala, así como oposición a proyectos de viabilidad general que amenacen a la rentabilidad de las empresas que operan los rellenos sanitarios y personas que hacen su modo de vida del reciclaje artesanal en los rellenos sanitarios.

Otro inconveniente presentado por ésta tecnología es que posee una menor densidad energética, por lo que para conseguir la misma cantidad de energía es necesario utilizar más cantidad de recurso (RSU); por lo que los sistemas de almacenamiento son, por lo general, mayores, además que estos sistemas de alimentación de combustible son más complejos y requieren unos mayores costos de operación y mantenimiento, no obstante los sistemas automatizados han ido minimizando éste inconveniente.

Entre otros inconvenientes a considerar dentro del marco de un vertedero controlado y su producción de biogás figuran también que la ocupación territorial del vertedero debe de disponer de una gran cantidad de área, como un dato estimado se considera que para la producción promedio anual de RSU de una población de 10,000 habitantes se debe de tener una superficie de 1 hectárea con 1.2 metros de profundidad (30-514).

Para minimizar los inconvenientes del vertedero, se debe de utilizar la compactación de los RSU, para reducir su volumen; hay que realizar la correcta impermeabilización del vertedero para evitar fugas subterráneas de los lixiviados, que pueden reducirse con una adecuada planificación de la localización de los vertederos lejos de los acuíferos y las masas de agua superficial.

Como resumen de los principales beneficios del aprovechamiento del biogás de vertedero son:

1. Producción de energía, térmica o eléctrica.
2. Transformación de desechos orgánicos en fertilizantes de alta calidad como el compostaje.
3. Mejora de las condiciones higiénicas por la reducción de patógenos y fauna nociva.
4. Favorecimiento a las condiciones ambientales para el desarrollo sostenible mitigando también impactos ambientales al poder reforestar el área utilizada.
5. Beneficios económicos por sustitución de energía convencional por energías blandas o limpias, al tener el control de la producción del biogás para su utilización en la generación de energía eléctrica descentralizada, ayudada por leyes protectoras a la inversión de éste tipo de generación eléctrica.

5. OTRAS ALTERNATIVAS DE GESTIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

5.1. Gestión de Residuos Sólidos Urbanos

Se entiende por gestión el *control en la generación de los residuos, el almacenamiento, recogida y transporte, tratamiento y eliminación controlada de las fracciones no valorizables, encaminadas a darles el destino más adecuado desde el punto de vista medioambiental para lograr el Desarrollo Sostenible y armonía entre la salud pública y el medio ambiente (66-128).*

Esta gestión incluye funciones administrativas, financieras, tecnológicas y legales de planificación que intervienen en la eliminación de los RSU de origen doméstico e industriales asimilables.

Para que la gestión controlada tenga éxito es necesario contar con el apoyo de los ciudadanos en la recogida de los RSU como un paso previo a las alternativas para el tratamiento de los residuos. Por lo que en las poblaciones se debe de establecer:

- Una recogida de los RSU en forma selectiva.
- Puesta en funcionamiento de plantas de clasificación, selección y tratamiento de materiales.
- Un circuito de venta y comercialización del producto recuperado.
- Una participación activa y directa de los usuarios del servicio de recogida.

Al tener distintas actividades que generan residuos se origina una gran variedad, de diferente composición y características; por lo que los RSU se deberán tratar de acuerdo a las necesidades y recursos de cada región.

5.2. Modelos de Gestión

La gestión de los RSU debe de garantizarse, de manera que no se afecte al medio ambiente. En una gestión correcta de RSU se pueden establecer dos modelos distintos (66-89):

En el **primer modelo de gestión** se incluyen los residuos domiciliarios, los cuales deberán ser separados por los consumidores o productores de los mismos. En un país como España, por ejemplo, se realiza esta práctica, se separan los RSU domiciliarios en, al menos, cuatro fracciones y se depositan en contenedores específicos, diferenciables de una manera sencilla, por su color. Es una modalidad de la cual se le puede sacar provecho en países en vías de desarrollo como Guatemala.

La distribución y señalización de los contenedores es la siguiente:

- **Para la fracción orgánica o compostable:** en un contenedor de color gris, que se puede ubicar lo más cerca que sea posible a los domicilios.
- **Envases y restos de basura domiciliaria constituida por plásticos, envases y otros materiales inertes:** en un contenedor amarillo, que debe de colocarse también cerca de los domicilios
- **Vidrio:** en un contenedor verde que debe de estar en las proximidades de los domicilios.
- **Papel y cartón:** en un contenedor azul, también situado en las proximidades de los domicilios.

De esta manera se realiza una preclasificación desde donde se generan los RSU, entonces los residuos recogidos de esta forma aseguran una recolección controlada, como se muestra en la Figura 23.

Figura 23 Contenedores de Primer Modelo de Gestión



De este modo, al trasladar la materia orgánica clasificada a vertederos o plantas de compostaje se puede transformar en compost o se puede producir biogás. Los envases plásticos y de metal, papel y cartón se envían a centros de clasificación y el vidrio a centros de trituración y limpieza.

El material de rechazo que se obtenga en estos procesos puede ser eliminado mediante su depósito en vertederos controlados y otros sistemas de tratamiento autorizado.

En el **segundo modelo de gestión** se puede tratar los residuos específicos como vehículos y maquinaria industrial, enseres domésticos y voluminosos, escombros y restos de obra, industriales y lodos, agrícolas y neumáticos usados.

Cuando estos residuos son generados en domicilios particulares o en pequeñas cantidades se debe de facilitar depósitos especiales para los productores, desde donde deberán ser enviados a plantas de tratamiento.

Para los generados en grandes cantidades como consecuencia de actividades industriales, comerciales o de servicios, los materiales deberán ser gestionados a nivel municipal y departamental.

5.3. Elementos necesarios para la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos

Los elementos técnicos necesarios para lograr una buena gestión de los RSU son los recipientes o contenedores para depositar de una forma ordenada y controlada los RSU, y los vehículos de transporte del material, camiones compactadores o simplemente de recolección, además de las plantas de tratamiento especiales según su aplicación.

Los residuos recogidos en estos contenedores específicos deben ser trasladados por medio de los vehículos a plantas de tratamiento que permitan, lo comentado anteriormente, recuperación, reciclado y valorización de los residuos.

Es necesario también contar con campañas informativas que lleguen a toda la ciudadanía para promover la eliminación adecuada de los RSU, así también como adecuación, transformación y construcción de instalaciones para recogida y reciclaje.

5.4. Fases de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos

La gestión de los RSU comprende desde que se genera el material como residuo hasta su tratamiento final. Las etapas correspondientes son las siguientes (66-129):

5.4.1. Prerrecolecta

Se debe a las operaciones de depósito del residuo hasta su entrega para la recolecta por parte de los servicios municipales o la empresa que brinde el servicio.

Como se comentó al principio del trabajo la generación de RSU ha ido aumentando conforme ha ido avanzando el grado de desarrollo, su incremento ha sido notable. En las sociedades rurales esta generación es bastante inferior al producido en las sociedades más avanzadas y con mayores adelantos tecnológicos.

En esta etapa los medios que se utilizan deberán de incluir bolsas de recogida básica y contenedores de distintos tipos como receptores similares a los propuestos anteriormente.

5.4.3. Recogida

Esta etapa puede ser realizada por el servicio municipal o subcontratada por empresas privadas. Comprende básicamente la operación de los contenedores dispuestos para la recolección de los RSU, se utilizan vehículos específicos que recogen con o sin compactación de los residuos.

En esta etapa se presentan problemas como:

- El producto a recoger es muy heterogéneo, de baja densidad y muy húmedo.
- En algunos casos el número de puntos de recogida es muy elevado, y la materia recogida muy pequeña, lo que recae en costos.
- La solución tradicional es una flota de camiones de recogida de basuras.
- La composición urbanística de ciudades tradicionales, no permite la ubicación de contenedores y tampoco el tránsito de los vehículos de recogida.

5.5. Alternativas de Eliminación y Gestión Final de los Residuos Sólidos Urbanos

La gestión de la que se ha hablado a lo largo de este capítulo puede concluir con varias alternativas de utilización de los RSU, además del vertido controlado, tema tratado principalmente a lo largo de éste trabajo, es por eso que se puede decir que una buena gestión de los RSU destina cada tipo de residuo a tratamientos alternativos, siendo algunos de éstos tratamientos de uso común; pudiéndose ubicar el material en lo reciclable a reciclaje, lo compostable a compostaje, lo incinerable a la incineración y el resto a vertedero controlado.

Los RSU contienen muchos materiales económicamente atractivos, ya sean reciclables, valorizables energéticamente o valorizables para alimentar procesos biológicos (compostaje y biogás).

Por lo que una gestión final de RSU representa la etapa final para el destino de los residuos y puede admitir los siguientes métodos de tratamiento:

5.5.1. Reciclaje

Este es un proceso en el cual los productos de desecho como metales, vidrio, plástico, entre otros, son nuevamente utilizados. Ésta es una actividad que actualmente en Guatemala se realiza de una manera manual.

Pero los métodos modernos consisten en la separación de fracciones que permiten una recuperación como recurso de materiales susceptibles de valor comercial, combinando medios manuales y modernos en el proceso.

Entre estos medios se tiene el tratamiento mecánico, que consiste en el uso de trituradores como paso previo a la preparación de materiales para el compostaje o para recuperación de metales ferrosos para procesar los RSU en un vertedero. La separación magnética es otro método utilizado, el cual recupera metales ferrosos (66-137).

Se puede hacer también una separación por inercia que separa los componentes de los RSU por inercia. Por medio de gravedad, que concentra materiales diferentes entre sí por su gravedad específica.

5.5.2. Compostaje

El compostaje es el proceso biológico aeróbico, mediante el cual los microorganismos actúan sobre la materia rápidamente biodegradable (restos de cosecha, excrementos de animales y residuos urbanos), permitiendo obtener "compost", abono excelente para la agricultura.

Actualmente se diseñan procesos para recuperar un único componente o una fracción de todo el flujo de residuos. Diferentes procesos podrían ser compatibles entre sí de modo que el producto final de uno sirva para el inicio de otro.

El compostaje puede implicar un retorno de materia orgánica a tierras agrícolas, y esto ayuda a la fertilidad de los suelos. La transformación de los RSU en compost, Figura 24 es una técnica que permite tratar de manera racional, económica y segura, los residuos orgánicos y conservar los nutrientes en estos residuos; consiste en la descomposición biológica de la materia orgánica, en condiciones controladas, aerobias y termófilas.

Figura 24 Compost



Es entonces cuando la selección de material en los RSU que se ha descrito anteriormente es fundamental, para poder garantizar de alguna manera un compost de calidad, ya que en el conjunto de RSU se pueden encontrar productos y sustancias peligrosas como pilas, pinturas, disolventes, etc.

5.5.3. Incineración

Éste es un proceso de combustión controlada que transforma la FORSU en materiales inertes (cenizas) y gases. Es realizado en instalaciones previstas con medios para controlar y depurar las emisiones de los gases debidos a éste proceso, que pueden afectar a la atmósfera, además de controlar la materia inerte final que de igual manera puede dañar al medio ambiente. Algunas plantas con este proceso poseen la capacidad para recuperar la energía liberada durante la transformación si ésta resulta rentable.

No es un sistema de eliminación total, ya que reduce el volumen de los RSU de 85 a 95%, y genera cenizas de 5 a 15% (30-330); además de gases, pero determina una importante reducción de peso y volumen de la FORSU original.

La utilización de un sistema de incineración para tratar los RSU presenta algunas ventajas, como escasa utilización de terrenos, posibilidad de implantación en núcleos urbanos, tratamiento de cualquier tipo de residuo si su poder calorífico es favorable y energéticamente presenta la posibilidad de recuperación de energía en plantas de este tipo.

Por ejemplo para alimentación a una red de calefacción, producción de agua caliente sanitaria, producción de vapor para la industria o para la generación de energía eléctrica.

A pesar de su posible aprovechamiento, la incineración es uno de los tipos de gestión más problemáticos respecto a las incidencias medioambientales y a su característica social. Por lo que es necesario controlar los parámetros del proceso de incineración, las emisiones de gases resultado de la combustión a la atmósfera y el vertido de cenizas.

Asimismo, como resultados de este proceso es necesario valorar la posible exposición de la población a los niveles de contaminación que pudieran alcanzarse, los riesgos derivados de esta exposición y la incidencia ambiental de las emisiones de metales pesados y productos de combustión incompleta.

5.5.4. Vertedero controlado

El vertedero controlado, Figura 25, es el sistema de tratamiento de los RSU más común a nivel mundial, consiste en depositar los residuos en un lugar apropiado desde el punto de vista medioambiental y realizar su cubrición con materiales adecuados periódicamente.

Figura 25 Vertedero Controlado “Miramundo”



Como un aprovechamiento de instalaciones de este tipo se tiene lo descrito a lo largo de éste trabajo, además a la finalización de su vida útil se deben realizar controles de seguimiento para prevenir posibles efectos ambientales. Estos controles incluyen la observación de fenómenos erosivos, el drenaje superficial, la supervisión de emisiones gaseosas y aguas subterráneas y la gestión adecuada de los lixiviados (67-140).

CONCLUSIONES

1. La dependencia actual de los combustibles fósiles para fines energéticos ha iniciado una necesidad de alternativas viables de recursos renovables que satisfagan las necesidades energéticas de un modo sostenible para el medio ambiente.
2. La situación actual de desarrollo tecnológico y consumo desmedido, debido a la expansión de la economía global, se traduce en la problemática de la generación de residuos sólidos urbanos, creando un impacto negativo en el medio ambiente; por lo que dentro de los modos de gestión controlados de los mismos se busca la viabilidad para un desarrollo sostenible con fines no energéticos.
3. La actividad energética como producción de combustible para su posterior utilización, en la gestión de los residuos sólidos urbanos puede ser un complemento al aprovechamiento social de la rentabilidad económica y ambiental de dicha actividad, siendo una opción la generación de energía eléctrica.
4. Entre la necesidad de opciones de gestión de RSU, el vertedero controlado, constituye por considerarse el de mayor utilización, un complejo factible para la producción de biogás a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.

5. Siendo el aprovechamiento energético de los RSU un complemento de su gestión, la finalidad principal de una instalación destinada para esta actividad es medioambiental, pues la posibilidad de obtención de biogás y su aprovechamiento está en función a las condiciones de trabajo de la instalación considerada como no energética. Sin embargo, la actividad energética es una parte del conjunto de procesos generando biogás y éste una utilización posterior energética como producción de energía eléctrica la que significará una rentabilidad económica.

RECOMENDACIONES

1. El método de gestión de Residuos Sólidos Urbanos por medio de vertedero controlado es una necesidad medioambiental, pero su aprovechamiento energético es de interés especial, por lo que se debe prestar conciencia al aspecto medioambiental y a la explotación energética del subproducto del vertedero, Biogás, con particular cuidado en el momento de la construcción, sellado y explotación del vertedero y de la posible planta de producción del gas.
2. Aprovechar la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos como un recurso renovable de energía es de interés nacional, por lo que habiendo una ley que promueve proyectos de Energía Renovable puede ser un buen comienzo: disminución de volumen acumulado de RSU y aprovechamiento energético del subproducto obtenido.
3. Estableciendo métodos de gestión, como medios de recolección y transporte, una prerrecolecta y recolecta adecuada de RSU, junto con la disposición correcta de los residuos en un vertedero controlado puede garantizar un buen aprovechamiento del biogás producido de los RSU.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Prospectiva energética y CO₂ escenarios 2010** Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía Ministerio de Ciencia y Tecnología, Madrid julio de 2002 S.A.
2. Organization of Petroleum Exporting Countries, located at <http://www.opec.org>, febrero 2004.
3. **World energy investment outlook, 2003 insights resumen** International Energy Agency. S.A.
4. BBC Mundo Cambio Climático Global, located at <http://www.bbc.com.uk>, febrero 2004.
5. Bent Sørensen **Renewable Energy Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects** Academic Press, Second Edition, reprinted 2002.
6. Instituto Nacional de Electrificación, localizado en <http://www.inde.gob.gt>, febrero 2004.
7. **Istmo Centroamericano: estadísticas del subsector eléctrico (Datos actualizados a 2001)**, 30 de Agosto de 2002. Naciones Unidas Comisión Económica para América Latina y el Caribe – CEPAL. Distribución Limitada S.A.
8. **Energía Solar Térmica, Manuales de Energías Renovables**, Instituto para la diversificación y Ahorro de Energía. Grafica Internacional, S.A. 1996. S.A.

9. **Energía solar fotovoltaica y cooperación al desarrollo**, Ingeniería sin Fronteras, Colección Cooperación y Tecnología. IEPALA Editorial, 1999
10. Fundación Solar Guatemala, Centroamérica, localizado en <http://solar.nmsu.edu>, febrero 2004
11. Wind Power, located at <http://www.windpower.org>, febrero 2004
12. Parques en Andalucía, localizado en <http://usuarios.lycos.es/ama/parquesandalucia.htm>, febrero 2004
13. **Eficiencia Energética y Energías Renovables No. 5**. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía. Madrid Abril 2001 S.A.
14. Paola Biancci “Maquinas hidráulicas: energías renovables” **Revista Arandu** Junio 2002
15. Revista Consumer, localizada en <http://revista.consumer.es>, febrero 2004.
16. **Manuales de energías renovables 3 Energía de la Biomasa**,. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Grafica Internacional, S.S.1996. Madrid
17. **Key World Energy Statics 2003**, International Energy Agency S.A.
18. **Renewables information** International Energy Agency Edition 2003
19. Raúl Archila **Plan Puebla Panamá Proyectos de inversión e infraestructura regional** Tokio, Japón noviembre 2002

20. Oscar Coto-Chinchilla **Renewable energy and energy efficiency partnership** Reunión General América Latina, Agosto 2003. Documento de Apoyo
21. Administrador del Mercado Mayorista, localizado en <http://www.amm.org.gt>, febrero 2004.
22. Guido Acurio y otros **Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y el Caribe** Organización Panamericana de la Salud y Banco Interamericano de Desarrollo, Washington, D.C., Estados Unidos. Segunda Edición 1998
23. Comisión Nacional de Energía Eléctrica Guatemala C.A. localizado en <http://www.cnee.gob.gt>, febrero 2004.
24. Ministerio de Energía y Minas Guatemala, C.A. localizado en <http://www.mem.gob.gt>, febrero 2004
25. **Informe Nacional de Desarrollo Humano 2002**, Guatemala S.A.
26. Jaime Domingo Carranza González, **Evaluación del transporte y disposición final de los desechos sólidos en los 331 municipios de la república de Guatemala** USAC e INFOM. 2002
27. **Energías Renovables**, XIV Reunión del Foro de Ministros de Medio Ambiente de América Latina y el Caribe, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente , Oficina Regional para América Latina y el Caribe, Panamá Noviembre de 2003, Distribución UNEP/LAC-IGWG.XIV/Inf.7

28. **Decreto Número 52-2003 Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable** Gobierno de Guatemala, Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Energía. Guatemala 8 de enero de 2004.
29. Temperature susceptibility of thermophilic methanogenic sludge: implication for reactor start-up and operation. Bioresource technology. Vol. 43, citado por E. Campos, A. Bonmati, M.R. Teira, X. Flotats, **Aprovechamiento energético de los lodos residuales y purines. producción de biogás** (Barcelona: Noviembre 2001)
30. George Tchobanoglous y otros **Gestión Integral de Residuos Sólidos** McGraw Hill, 1996.
31. José Gabriel Ramiro Leo **Energías renovables 13º curso de verano San Roque 13-31 Julio 1992** Universidad de Cádiz. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz, 1992.
32. Theodore Brown, Eugene LeMay y Bruce Bursten **Química la ciencia central** Prentice Hall México 1997
33. Lenntech Water treatment & Air Purification, located at <http://www.lenntech.com>, febrero 2004.
34. José Álvarez "**Biomasa y biogás**", Universidad Nacional del Nordeste, Facultad de Ingeniería. Cátedra: Máquinas Térmicas II. Argentina 2002.
35. Álvaro Zapata Cavidad, **Utilización del biogás para generación de electricidad** Fundación CIPAV Colombia 1997

36. Leonor Carrillo, "**Microbiología Agrícola**", Argentina Universidad Nacional de Salta, Argentina 2003
37. Kinetics of anaerobic treatment: a critical review. Critical reviews in environmental control. Vol. 21 citado por E. Campos **Aprovechamiento energético de lodos residuales y purines. Producción de biogás** (Barcelona 2001)
38. Björnsson, Lovisa **Intensification of the biogas process by improved process monitoring and biomass retention** Doctoral Dissertation. Sweden, Lund University, Department of Biotechnology, 2000.
39. El Proceso de Digestión Anaerobia por Elena Campos, localizado en <http://www.udl.es>, marzo 2004.
40. Kinetics of anaerobic treatment: a critical review. Critical reviews in environmental control. Vol. 21 citado por E. Campos **Aprovechamiento energético de lodos residuales y purines. Producción de biogás** (Barcelona 2001)
41. **Estadística de la salud de las Américas**. Washington, DC, OPS, 1995. Publicación Científica NE 556
42. Fernando García y Vilma Duque **Guatemala trabajo infantil en basureros: una evaluación rápida**, Organización Internacional del Trabajo Programa Internacional para la Erradicación del Trabajo Infantil (IPEC) Ginebra 2002
43. Mapas en Red, localizado en <http://www.mapasred.com>, marzo 2004.

44. Felicia Hernández y Lawrence Pratt **Manejo de desechos sólidos en dos ciudades centroamericanas: soluciones de la pequeña y mediana empresa** Centro Latinoamericano para la Competitividad y el Desarrollo Sostenible (CLACDS), octubre 1998
45. Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente, localizado en <http://www.euskadi.net>, marzo 2004.
46. **Técnicas energéticas especiales: residuos, cogeneración y recuperación.** División de Residencial y Servicios Cuadernos de gestión energética municipal. Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía Madrid 1989
47. HPC Harress Pickel Consult AG – The engineer enterprise, localizado en <http://www.hpc-ag.biz>, marzo 2004.
48. José María Vega Piqueres y otros **La bioconversión de la energía** Ediciones Pirámide, S.A. Madrid 1983
49. Enfoque Renovable Boletín de la iniciativa FOCER No.8 Agosto 2001 BUN-CA, localizado en <http://www.bun-ca.org>, marzo 2004.
50. Energie-Cités, localizado en <http://www.energy-cites.org>, marzo 2004.
51. José Arvizú y Jorge Huacuz **Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad** Boletín IIE octubre-diciembre México 2003
52. **Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás** Unidad de Planeación Minero Energética Colombia Marzo 2003

53. **Documento de Apoyo del Vertedero Controlado Miramundo propiedad del Consorcio Bahía de Cádiz 2004**
54. Vicente Bermúdez **Tecnología Energética** Universidad Politécnica de Valencia Servicio de Publicaciones 2000
55. Lluís Jutglar i Banyeras 1996. **Cogeneración de calor y electricidad** Ediciones CEAC Barcelona
56. José María Sala Lizarraga. **Cogeneración aspectos termodinámicos, tecnológicos y económicos.** Servicio editorial Universidad del País Vasco Bilbao 1994
57. Power on Line, located at <http://www.poweronline.com>, abril 2004.
58. Palmero, localizado en <http://www.palmero.com>, abril 2004
59. **Guía técnica para la medición, estimación y cálculo de las emisiones al aire, sector gestión de residuos** Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente. Gobierno Vasco. IHOBE, Fundación Labein para IHOBE, S.A. Abril 2003 S.A.
60. Garraf, localizado en <http://cogeneracion.org>, abril 2004.
61. Centro Montemarta Cónica, localizado en <http://www.aborgase-edifesa.com>, mayo 2004
62. Junta de Andalucía, localizado en <http://www.juntadeandalucia.es>, mayo 2004

63. Elena Campos Pozuelo y otros **Biogás y aprovechamiento de la biomasa** Departament de Medi Ambient i Ciències del Sol de la Universitat de Lleida. Grupo Laboratori d' Enginyeria Ambiental.
64. Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, localizado en <http://www.conae.gob.mx>, mayo 2004.
65. Larry Canter **Manual de evaluación de impacto ambiental, técnicas para la elaboración de estudios de impacto.** Mc Gras Hill. Madrid 1998
66. **Los residuos urbanos y asimilables, consejería de medio ambiente** Junta de Andalucía, comunidad europea, , fondo europeo de cohesión Egondi Artes Gráficas, S.A. 2003

ANEXO 1

Caso ilustrativo de la situación actual del Relleno Sanitario del Trébol en la Ciudad de Guatemala, ubicado en las Zonas 3 y 7 de la ciudad.

El crecimiento demográfico en la Ciudad de Guatemala ha derivado en un considerable incremento de los desechos que genera la población, convirtiéndose esto en un serio problema ambiental para el área metropolitana y algunos de sus municipios.

Actualmente, la disposición final de los residuos sólidos urbanos en el Relleno Sanitario del Trébol, se realiza en un sitio que no opera eficientemente y en el que se presentan serias deficiencias, como son:

- Mala ubicación: el sitio se ubica a un costado del centro de la Ciudad de Guatemala entre las zonas 3 y 7.
- Pésima imagen: se tienen gran cantidad de residuos esparcidos a lo largo del relleno sanitario. El impacto visual de ellos es sumamente negativo para la ciudad.
- Contaminación: se presentan incendios dentro del relleno sanitario, que producen grandes nubes de humo, y gases tóxicos que son dirigidos -de acuerdo a la dirección de los vientos- a lo largo de la Ciudad y municipios aledaños.

Si se considerase un proyecto de clausura del actual sitio de disposición final, este contribuiría a dar solución a problemas de contaminación ambiental y de salud entre los que destacan:

- contaminación del aire por emisión de gases y partículas, por arrastre del viento de polvos, gases y humos generados en el sitio de disposición final, por los incendios ocasionados;
- contaminación de las aguas subterráneas y superficiales por medio de los lixiviados generados en el tiradero los cuales son escurridos, infiltrados y percolados al interior del suelo hasta llegar a dichas aguas, sobre todo en época de invierno;
- presencia de especies menores de mamíferos -roedores-, aves cosmopolitas -zanates y zopilotes- y vectores transmisores de enfermedades y generadores de molestias a la población tales como moscas, mosquitos, cucarachas, zancudos, entre otros;
- riesgos a la salud y accidentes por exposición ocupacional ante los agentes contaminantes;
- impacto visual negativo.

Uno de los aspectos a considerar es que la precipitación pluvial y la posterior infiltración del agua en el estrato de residuos sólidos urbanos del relleno sanitario, ocasiona la disolución y el arrastre de ciertos materiales contenidos en la basura, generándose en ésta acción un líquido de características agresivas, el cual se conoce como lixiviado. Por otra parte, el proceso de descomposición de materia orgánica contenida en los residuos, el cual se lleva a cabo en condiciones de carencia de oxígeno, condiciones anaerobias, genera una mezcla de gases con un alto contenido de metano, el cual puede ser explosivo a ciertas concentraciones en el aire, pero utilizable bajo condiciones reguladas.

Si se presta atención a las reacciones químicas y físicas de los lixiviados y biogás se tiene que las reacciones químicas importantes que ocurren dentro del tiradero a cielo abierto abarca la disolución y suspensión de materiales y productos de conversión biológica, destacando los siguientes:

- Los líquidos que se percolan a través de los residuos sólidos, la evaporación y vaporización de los compuestos químicos y agua, dentro de la masa envolvente de biogás, la adsorción de compuestos orgánicos volátiles y semi-volátiles dentro de los materiales del tiradero, la deshalogenación y descomposición de compuestos orgánicos y las reacciones de óxido-reducción afectan la disolución de metales y sales metálicas.
- La disolución de los productos de conversión biológica y otros compuestos, particularmente los compuestos orgánicos, dentro de los lixiviados es un factor muy importante, porque estos materiales pueden ser transportados fuera del tiradero con los lixiviados; estos compuestos orgánicos pueden ser posteriormente incorporados a la atmósfera través del suelo.
- Importantes reacciones químicas que se presentan, son aquellas entre ciertos compuestos orgánicos y las capas de arcilla los cuales alteran las propiedades y estructuras de las mismas.

Los cambios físicos más importantes están asociadas con la difusión de gases dentro y fuera del tiradero, el movimiento de lixiviados al subsuelo y los asentamientos causados por la consolidación y descomposición de los materiales depositados. El movimiento de gases y las emisiones a la atmósfera son elementos de particular importancia para el manejo del sistema.

La fuga de biogás acarrea trazas de compuestos carcinogénicos y teratogénicos que son incorporados al ambiente, además dado que el biogás contiene un porcentaje considerado de metano, existe el riesgo de explosión o combustión, tanto en el tiradero como en las inmediaciones. El CO₂ emitido es contribuyente al cambio climático al absorber las radiaciones infrarrojas reflejadas por el suelo, y no permitirles ascender.

El arrastre de metales pesados por los líquidos percolados provoca la acumulación de estas sustancias en el agua subterránea, pudiendo llegar a inhabilitar cuencas como fuentes de abasto poblacional.

En épocas de lluvia el escurrimiento superficial arrastra o disuelve gran cantidad de compuestos peligrosos, los cuales son lavados hacia suelos o aguas superficiales con la consiguiente afectación a la flora y fauna de estos medios ambientales.

Para poder tener un mejor control de lixiviados y para el caso específico del actual Relleno Sanitario del Trébol, se puede observar el escurrimiento de lixiviados en los pies de talud de los residuos acumulados. Por lo anterior, se recomienda la utilización de trincheras impermeabilizadas y drenes interceptores, los cuales serán utilizados para la captura de dichos lixiviados aprovechando exclusivamente la fuerza de gravedad. Este tipo de sistema debe estar conectado a uno o varios cárcamos de captación y bombeo, con el objeto de reinyectar dichos líquidos nuevamente al interior del tiradero a través de un pozo difusor que puede ser cualquiera de los pozos para venteo de biogás, y/o en su caso dejar que fluyan hacia una piscina de evaporación de los mismos, la cual puede tener como dimensiones 6 m de ancho, 10 m de largo y 1.5 m de profundidad (Figura 26) impermeabilizada en su base y taludes con geomembrana de HDPE de al menos 1 mm de espesor.

Figura 26 Piscina de evaporación de lixiviados



Es importante mencionar que el uso de este tipo de sistemas se ve reducido en su eficiencia en los tiraderos a cielo abierto, a menos que los residuos sean removidos para impermeabilizar el fondo y, nuevamente, depositados sobre el sitio, tal y como se especifica en el inciso 2.8 del Capítulo II. Para el caso particular del sitio en cuestión, se puede realizar con esta limitación, ya que, lo importante para este caso es la eliminación de los problemas de escurrimiento lateral de lixiviados, pues, la eliminación del problema de percolación vertical hacia el manto acuífero implicaría un mayor costo por la remoción de los residuos sólidos y posterior impermeabilización de la base de todo el tiradero y, nuevamente, la colocación de los residuos encima de la base impermeabilizada.

Para el sistema de control de escurrimiento de lixiviados se puede proceder a excavar una trinchera cuyas dimensiones pueden ser de 0.5 m de ancho por 0.6 m de profundidad, la cual deberá de ser impermeabilizada en su base y paredes con la finalidad de facilitar el escurrimiento de los lixiviados así recolectados hasta una estructura de captación cuyas dimensiones mínimas sean de 1.0m de largo x 1.0m de ancho x 1.2m de profundidad.

Para la construcción de este depósito de captación de lixiviados puede utilizarse concreto armado con varilla de 3/8" de pulgada de diámetro, construido con muros de tabique recocido y aplanado pulido interior con cemento arena, así como una tapa de registro, la cual deberá llevar en su interior una tubería de polietileno de alta densidad de 4" de diámetro para el monitoreo del nivel de captación de lixiviado (Figura 27) así como para la extracción del mismo para su reinyección al interior del tiradero.

Figura 27 Tubería de captación de lixiviado



En este proceso la recolección de lixiviado deberá ser de tal manera que se minimice en lo posible la captación de líquido resultado de precipitación pluvial directa y por otra parte que se maximice la captación de líquido percolado como resultado de la migración de lixiviado a través de los taludes del tiradero.

La recolección de lixiviado consiste en colocar dentro de la zanja colectora ya impermeabilizada con geomembrana de polietileno de alta densidad de 1.5mm de espesor, una tubería de polietileno de alta densidad de 8" de diámetro y cubierta con material granular (grava) de TMA =2", adicionalmente deberá colocarse a manera de cubierta otra capa impermeable de geomembrana con las mismas características que la anterior.

Y, posteriormente, cubrirla con material de suelo con la finalidad de evitar el ingreso directo del agua pluvial al interior de la trinchera colectora.

Una piscina de evaporación grande (Figura 28) resulta útil para los casos de producción excesiva de lixiviados, y cuando no se tiene una supervisión continua sobre los depósitos de captación, por lo que, también, podrán ser extraídos los lixiviados desde ésta para su utilización en actividades de riego de residuos y material de cobertura, o simplemente dejar que el proceso de evaporación se encargue de ellos, siempre y cuando no se rebase la capacidad de almacenamiento de dicha piscina.

Figura 28 Piscina de evaporación grande



Es importante recordar que la utilización eficaz del biogás debe de ser tras la clausura del relleno sanitario, por lo que el mantenimiento a largo plazo del mismo debe de contar con sistema de control y monitoreo de biogás. Dicho control, debe de ser por la modalidad de “control activo”; actualmente al no haber control alguno el escape del biogás es pasivo el cual va hacia la atmósfera por medios naturales.

El proceso anterior permite controlar el movimiento del biogás mediante una presión negativa inducida o vacío, de tal modo que el gas es extraído del sitio de disposición final (Figura 29) y, para éste caso, utilizado como combustible para la generación de energía eléctrica mediante un grupo electrógeno, similar al del Anexo 2.

Figura 29 Control de movimiento de biogás



Para el caso específico del actual Relleno Sanitario del Trébol, se puede empezar la utilización de un sistema activo para el control del biogás consistente en 10 pozos para venteo y extracción.

Estos pozos pueden ser construidos una vez conformado el sello final del tiradero, por lo cual deberán perforarse. Estos sistemas funcionan debido a los gradientes de presión que se establecen cuando son construidos.

El efecto que tiene sobre la migración del biogás es mínimo, por lo que se recomienda ubicarlos cerca de los límites del sitio clausurado en combinación con barreras naturales, con el objeto de asegurar el control de las emisiones.

Los pozos para venteo consisten en una perforación de 60 cm de diámetro, a una profundidad máxima del 75% del espesor de los residuos sólidos urbanos, en la cual es colocado un tubo de PVC de 4" de diámetro y empacado de grava de un TMA de 2" como mínimo.

En la parte superior del pozo se coloca un sello con arcilla, bentonita, mezcla de suelo cemento o cualquier otro material impermeable, el cual puede ser en éste caso un impermeable especial de tipo alfombra sintética con grava especial (Figura 30), la cual sella y evita la salida descontrolada del biogás y/o la entrada de agua hacia el interior del pozo, siendo este último aspecto desfavorable para el adecuado venteo del gas, además de que favorece la generación de lixiviados.

Figura 30 Alfombra sintética con grava especial



Para la perforación de los pozos, se deberán tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- El personal encargado de esta actividad deberá protegerse con mascarillas con filtro de carbón activado, para evitar la inhalación de los gases que se desprenderán durante la perforación de los pozos.
- Se deberá verificar una completa verticalidad del equipo antes de iniciar la perforación.
- Se iniciará la perforación vertical con broca helicoidal de 60 cm de diámetro y 1 m de longitud como máximo.
- Una vez terminada la perforación se deberá tener habilitada la tubería para facilitar las maniobras y evitar que el pozo se azolve.
- Cuando se encuentren llantas en el proceso de perforación, estas deberán ser recuperadas por medio de la utilización de la broca de tornillo sin fin (conocida como broca Auger).
- Si durante la perforación inicial se encuentran rocas o fragmentos de concreto, se utilizará la cuña del barretón.
- Para el retiro de los materiales producto de la perforación, se recomienda la utilización de una retroexcavadora, o si se lleva a cabo de forma manual, se recomienda que el manejo de dichos productos sea con una pala.
- Se deberán colocar señales preventivas, elaboradas en planchas de lámina de 1/32" x 0.60 m x 0.60 m, con las leyendas "Peligro Excavación Profunda" y "No Fumar", a distancias equidistantes a los puntos de perforación.

El radio de influencia de los pozos de venteo, normalmente depende del grado de compactación y del tipo de residuos sólidos. Para fines de captación de biogás en este proyecto se consideran un máximo de 10 pozos sectorizando un área de 25,000 m², correspondientes a la mitad del área total del vertedero.

El control del biogás (Figura 31) es necesario en el vertedero mientras exista potencial de generación. Por lo que es aconsejable instalar los sistemas de control durante la clausura.

Figura 31 Control de biogás



Estas instalaciones necesitarán un constante mantenimiento preventivo, debido a los asentamientos de los residuos, y eventualmente se requerirá de renivelación de las estructura para el venteo del biogás.

Del control y producción del biogás para su utilización para producción de energía eléctrica y capacidad a instalar se hace la estimación en tres posibles escenarios a lo largo de 20 años, según cálculos practicados en el Capítulo III.

Para la protección del sitio debe de colocarse una cerca perimetral para que pueda delimitar el sitio de captación de biogás con respecto a las zonas circundantes, proteger el acceso clandestino de vehículos y personal no autorizado, evitar el acceso al posible vandalismo y una vez clausurado el sitio, evitar el acceso a quienes pretendan seguir disponiendo de la utilización del lugar.

Dicha cerca puede ser de malla galvanizada calibre 10.5, de abertura estándar, reforzada con postes de tubo galvanizado a cada 3 m de separación y cimentados sobre zapatas aisladas de 0.30 x 0.30 x 0.60 m, ésta a su vez se debe enmarcar con tubos galvanizados horizontales; la altura será de 2.5 m incluyendo tres hileras de alambre de púas o raizor electrificado.

Se debe de considerar puertas, las cuales deben ser del mismo material, sostenidas por postes laterales, que se desplantarán sobre zapatas aisladas de 0.30 x 0.30 x 0.60 m.

La puerta de acceso a vehículos puede ser de 5.00 m de ancho con una altura de 3.5 m y si se consideran puertas para acceso de personal, estas pueden ser de 1.00 m de ancho por 2.5 m de alto.

Para la ejecución del proyecto se debe de considerar invitar por licitación pública a empresas internacionales especializadas en la materia de control de vertederos, clausura y generación de energía eléctrica por medio de biogás provenientes de RSU, para que se logre una rentabilidad que genere beneficios a la ciudad capital, a los ciudadanos, al medio ambiente y a todos los sectores involucrados.

PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE BIOGÁS PROCEDENTE DE
VERTEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Tabla XXII Datos técnicos Grupo Electrónico Gas Palmero PPG-900

DATOS TÉCNICOS			
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 Máx. Volante: (KW)	880
Díametro (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 Irradiado: (kW)	80
Presión Min. Gas (mbar)	15-50	Temperatura de Escape: (°C)	371
Regulador Velocidad	Electrónico	Caudal Aire de Enfriam.: (m ³ /min)	2654
Máx. Impacto Carga (δf=10%)	33%	Caudal Aire de Combust.: (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.

Distribuidor Local:

Cod:

PALMERO SAN LUIS S.A. Se reserva el derecho de modificar total o parcialmente el diseño y las especificaciones arriba mencionadas.
Versión 5.0

Fuente: Palmero, 2004.

ANEXO 3

Diagrama de disposición propuesta para el Relleno Sanitario del Trébol en la Ciudad de Guatemala, ubicado en las Zonas 3 y 7 (Figura 33).

1. Consumidores
2. Distribución de energía eléctrica producida por biogás
3. Planta de almacenaje, control, monitoreo de biogás y estación de generación de energía eléctrica
4. Piscina de tratamiento de lixiviados
5. Monitoreo de manto freático
6. Celdas de RSU compactadas para producción de biogás
7. Pozos de venteo para extracción de biogás
8. Residuos sólidos urbanos compactados
9. Sistema de recolección de lixiviados
10. Grava
11. Tractor compactador de RSU
12. Vertedero clausurado y regenerado
13. Puerta de acceso a vehículos
14. Contenedores de primer modelo de gestión
15. Tierra compactada
16. Geomembrana de HDPE
17. Material impermeabilizante

Figura 33 Diagrama de disposición de vertedero controlado y planta de producción de energía eléctrica por medio de biogás generado por RSU (51-6)



Fuente: José Arvizú, biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad, Página 6.