



**UNIVERSIDAD
NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

**Factibilidad de la micro-generación de
energía eléctrica a partir de biogás
producido de desechos de granjas piscícolas
en el Estado de México.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA ELÉCTRICA- ELECTRÓNICA

PRESENTA:

**CLAUDIA GUILLERMINA BRAMBILA
SANTAMARÍA**

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. ALEJANDRA CASTRO GONZÁLEZ

Ciudad Universitaria, México D. F.

Noviembre de 2008



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

En toda mi experiencia universitaria y en la conclusión del trabajo de tesis, ha habido muchas personas que merecen las gracias por que sin su valiosa aportación no hubiese sido posible este trabajo y también hay quienes las merecen por que de alguna u otra forma han plasmado su huella en mi camino por la Facultad de Ingeniería. A todas ellas quiero expresar mi más sincero agradecimiento.

A mis papás: Isidro y Guille, por creer en mí, por su comprensión, su paciencia, su inmenso apoyo y amor. Gracias Titos por compartir y dedicar gran parte de sus vidas conmigo y por darme aliento para la ardua tarea de caminar hacia la perspectiva de un nuevo día. Los amo profundamente.

A mis hermanos: Isidro Agustín y Ángel, sin su apoyo, comprensión y e incesante aliento el placer cotidiano de vivir sería simple monotonía. Los quiero mucho brothers.

A Alejandro Chavarri, por ser lo más lindo que me ha pasado en este último tiempo, por tu apoyo, por estar conmigo siempre en mente y corazón, creyendo en mí y alentándome a seguir adelante. Gracias por estar ahí amor.

A mi asesora, la Dra. Alejandra Castro por darme la confianza de expresarme libremente, por su tiempo y dedicación durante la dirección del trabajo de tesis.

A la Dra. Cecilia Martín del Campo, por ser una excelente profesora, por la pasión que proyecta en cada una de sus clases, por descubrir en ellas un área más de la ingeniería que me gusta. Sin su influencia mi camino hubiera sido otro.

Al Dr. Arturo Reinking y al Ing. Julio Luna por ser unos excelentes profesores, por su apoyo, por las clases tan amenas y las enseñanzas aportadas. Gracias por aceptar ser mis sinodales.

A Juan Carlos Cedeño, profesor y amigo mío, por sus enseñanzas, consejos, apoyo y risas a lo largo de mi carrera universitaria. Has llegado a ser un gran amigo, gracias por permitir acercarme a ti.

Al Ing. Felipe Muñoz, por el apoyo y asesoría brindados durante la realización de mi trabajo de tesis y por los conocimientos recibidos en el aula.

A mis mejores amigas, Eli y Diana, que siempre están, estuvieron y seguirán estando, brindándome cariño y soporte. Gracias por compartir muchas etapas de nuestras vidas.

A mis amigos Luís Velásquez y César Bonilla, por compartir conmigo todos estos años, tantas aventuras, experiencias, carcajadas, las acostumbradas preceñas, los proyectos. Cada uno de nuestros recuerdos y ocurrencias los llevo plasmados en mí. Ustedes son únicos.

A Sergio Castañeda, por ser un amigo excepcional, por las largas platicas, risas, consejos, apoyo, cariño y aliento. Eres una persona maravillosa y me alegro poder contar con tu amistad. Quien iba a pensar que mi forma de expresarte cariño se convertiría en un icono “Yeyo”.

A Edgar Evangelista, mi equipo de planilla y amigo, por ser una persona que creyó en mí desde que nos conocimos, por dejarme hacer y deshacer, por una buena contienda electoral, siempre apoyándonos. Estos años de Consejo han sido agradables a tu lado.

A mis amigos: Salvatore Gutiérrez, Rafael Guerrero, Marcos Contreras, Jacqueline Moreno, Humberto Perea, Juan Carlos Alonso, Martha Sades, Dalía Hernández, Zabdiel Zius, Carlos Aranda y Gustavo Torres por estar a mi lado desde que los conocí.

A mis amigos de la Facultad de Ingeniería: Rodrigo Maza, Daniel Pérez, Alberto Lima, Alejandro Bastidas, Lizbeth Rodríguez, Sergio Castillo, Eduardo Ramírez, Carolina Quiroz, Raúl Arrieta, David Santander, Guillermo Terán, Alan Hellmer, Miguel Ahumada, Abelman Bravo, Mauricio Martínez, Zaira Hernández, Alberto Bobadilla, Ramiro Cuevas, Oscar Martínez, Mariel Quijada, Atzin González, Román Ramírez, Nancy Contreras, Rafael Oria, José de la Torre (cosa), David Guerrero, Marcos Peña, Tonatiuh Garibay, Miguel Rodríguez y Mario (el chico cursi) por hacer que mi estancia en la Facultad fuera increíble y divertida.

A Ingenieros y personal de la Facultad de Ingeniería: Luís Cesar Vázquez, Elí García, Gerardo Ferrando, Francisco Miguel Pérez, Leda Speziale San Vicente, María Teresa Peñoñuri, Elia Macedo, Gonzalo López de Haro, Octavio Estrada, José Santos, Miguel Figueroa, Myrna Olmedo, Josefina Sánchez Sosa, Dolores Rodriguez, Carmen Manzanarez, Carmen Belaurizarán y Aurelio Sánchez por las enseñanzas y ayuda brindada a lo largo y finales de mis años de estudiante en la Facultad.

A mis seres queridos que con su vida y ejemplo forjaron el amor y los valores que ahora forman parte de mí y que pese a ya no estar más a mi lado físicamente los llevo en mi memoria y corazón.

A todas aquellas personas que pudiera omitir sin intención y que de alguna u otra forma contribuyeron en mi formación, aprendizaje y esparcimiento les agradezco por darme alguno de los mejores momentos de mi vida.

Índice

ÍNDICE DE CONTENIDOS	III
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS	VII
RESUMEN	IX
NOMENCLATURA	XI
1 Introducción y objetivos	3
Introducción.....	3
Objetivos.....	5
2 Biomasa	9
2.1 Energía de la Biomasa.....	9
2.2 Conversión de la biomasa en energía.....	10
2.2.1 Procesos termoquímicos.....	12
2.2.2 Procesos físico-químicos.....	17
2.2.3 Procesos bioquímicos.....	18
2.3 Degradación anaerobia.....	23
2.3.1 Etapas de la degradación anaerobia.....	25
2.3.2 Parámetros de control de la degradación anaerobia.....	27
3 Digestores	39
3.1 Definición de un digestor.....	39
3.2 Características del digestor convencional.....	40
3.3 Digestores usados en zonas rurales.....	44
3.4 Digestores de polietileno de bajo costo.....	47
3.5 Costos de construcción.....	51
3.6 Costo de generación de energía.....	53
4 Productos de la digestión	57
4.1 Biogás.....	57
4.2 Caracterización del biogás.....	60
4.3 Purificación del biogás.....	62
4.4 Purificación de biogás en instalaciones rurales.....	66
4.5 Usos del biogás.....	68

4.6 Bioabono.....	71
4.7 Calor y electricidad.....	72
4.7.1 Generación de energía eléctrica en base a biogás.....	73
4.8 Unidades CHP.....	74
4.8.1 Costo de motogeneradores.....	77
4.9 Uso del biogás en México.....	78
4.10 Marco regulatorio en México.....	79
4.11 Protocolo de Kyoto y Mecanismo de Desarrollo Limpio.....	83
4.12 Barreras en el desarrollo de Energías Renovables en México.....	85
5 Caso de estudio.....	89
5.1 Comunidades rurales mexicanas.....	89
5.2 Municipio de Amanalco.....	90
5.3 Visita al municipio de Amanalco.....	93
5.4 Producción de residuos.....	100
5.5 Pruebas experimentales de producción de biogás de los desechos.....	101
5.6 Parámetros para la producción de biogás y metano.....	105
5.7 Resultados.....	107
5.8 Producción de biogás.....	109
5.9 Dimensiones de los digestores de polietileno.....	112
5.10 Sistema de generación de electricidad.....	115
5.11 Beneficios económicos totales de un digestor de polietileno.....	117
5.11.1 Análisis de ecosistema para el uso de un digestor de polietileno.....	117
5.12 Contribuciones ambientales.....	119
5.13 Contribuciones sociales.....	121
6 Conclusiones.....	125
6.1 Conclusión.....	125
Referencias bibliográficas.....	127

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2.1 Procesos de conversión de la biomasa en energía.....	12
Figura 2.2 Procesos termoquímicos de conversión.....	13
Figura 2.3 Pirólisis y sus productos.....	15
Figura 2.4 Proceso de gasificación.....	17
Figura 2.5 Procesos bioquímicos.....	19
Figura 2.6 Central de biogás- SIMEPRODESO.....	21
Figura 2.7 Etapas de la fermentación bacteriana.....	27
Figura 2.8 Crecimiento de bacterias.....	29
Figura 2.9 Concentración de CO ₂ vs. Alcalinidad.....	30
Figura 2.10 Producción de biogás a diferentes temperaturas.....	31

Capítulo 3

Figura 3.1 Esquema ilustrativo de los reactores anaerobios, 1 ^a y 2 ^a generación.....	42
Figura 3.2 Digestores anaerobios típicos.....	43
Figura 3.3 Tipos de digestores.....	45
Figura 3.4 Digestor de polietileno.....	48
Figura 3.5 Esquema de una fosa para un digestor de polietileno.....	50
Figura 3.6 Rubro de gastos de inversión para la construcción de un digestor.....	52

Capítulo 4

Figura 4.1 Trampa de condensación para vapor de agua.....	64
Figura 4.2 Accesorios para la purificación del biogás.....	66
Figura 4.3 Gráfico de las alternativas de rendimiento de 1 m ³ de biogás en medio rural.....	70
Figura 4.4 Motogenerador marca Perkins.....	75
Figura 4.5 Generador con motor de biogás marca Jenbacher.....	76
Figura 4.6 Porcentaje de reducción de emisiones por tipo de proyecto.....	80

Figura 4.7 Emisiones de GEI a nivel nacional.....	81
Figura 4.8 Emisiones de GEI por sectores.....	81

Capítulo 5

Figura 5.1 Localización de Amanalco.....	90
Figura 5.2 Mapa a escala de Amanalco y sus comunidades.....	91
Figura 5.3 San Jerónimo.....	94
Figura 5.4 San Jerónimo II.....	94
Figura 5.5 Vías de acceso a las comunidades rurales.....	95
Figura 5.6 Improvisación de puentes en las zonas rurales.....	95
Figura 5.7 Estanques 1 de Conejeras III.....	96
Figura 5.8 Estanques 2 de Conejeras III.....	96
Figura 5.9 Estanques 3 de Conejeras III.....	97
Figura 5.10 Truchas de las piscifactorías.....	97
Figura 5.11 Residuos removidos de los estanques.....	98
Figura 5.12 Contaminación del agua.....	98
Figura 5.13 Cocina del propietario de Conejeras III.....	99
Figura 5.14 Lugar donde se cocina con leña.....	99
Figura 5.15 Preparación de las mezclas de excrementos.....	102
Figura 5.16 Mezcla del desecho de las granjas de trucha arco iris 100%.....	103
Figura 5.17 Reactores de laboratorio en operación.....	103
Figura 5.18 Evidencias de producción de biogás.....	104
Figura 5.19 Producción de biogás en las mezclas.....	107
Figura 5.20 Esquema del digestor.....	115

Índice de Tablas

Capítulo 2

Tabla 2.1 Principales ventajas y desventajas de la digestión.....	25
Tabla 2.2 Relación C:N de diversos desechos disponibles en el medio rural.....	33
Tabla 2.3 Producción de gases dependiendo de la relación C:N.....	33
Tabla 2.4 Datos promedio sobre el contenido de sólidos totales de diversos desechos..	34

Capítulo 3

Tabla 3.1 Los tipos de digestores, características, ventajas y desventajas.....	46
---------------------------------------------------------------------------------	----

Capítulo 4

Tabla 4.1 Producción específica de biogás.....	58
Tabla 4.2 Composición promedio del biogás.....	58
Tabla 4.3 Combustibles típicos y su poder calorífico.....	61
Tabla 4.4 Efectos fisiológicos en personas expuestas a H ₂ S.....	62
Tabla 4.5 Procesos para purificación de biogás.....	63
Tabla 4.6 Equivalencia de biogás con otros combustibles.....	69
Tabla 4.7 Valores medios de consumo de biogás en artefactos.....	70
Tabla 4.8 Costo de motogeneradores.....	77
Tabla 4.9 Permisos autorizados por la CRE de Energía Eléctrica (biogás).....	78

Capítulo 5

Tabla 5.1 Desechos orgánicos de las comunidades de Amanalco.....	93
Tabla 5.2 Cantidad de residuos por comunidad.....	100
Tabla 5.3 Proporciones de mezclas de los reactores.....	101
Tabla 5.4 Proporción de agua adicionada por excremento.....	104
Tabla 5.5 Parámetros de caracterización para residuos de trucha.....	105

Tabla 5.6 Producción de metano en relación al TRH y a la materia orgánica degradada.....	108
Tabla 5.7 Producción de biogás por granja piscícola en la zona de Amanalco.....	111
Tabla 5.8 Costo promedio de materiales de construcción en México de diferentes proveedores.....	113
Tabla 5.9 Dimensiones de digestores.....	114
Tabla 5.10 Producción de energía eléctrica en las comunidades de Amanalco.....	116
Tabla 5.11 Producción total de biogás por año caso Xuan, Botero y Preston comparados con Amanalco.....	118
Tabla 5.12 Reducción de gases efecto invernadero en CO ₂ equivalente.....	121

Resumen

En el municipio de Amanalco, Estado de México, la mayoría de los habitantes dependen económicamente de la producción de truchas de sus granjas piscícolas. Los residuos de los estanques y vísceras de trucha no tienen ninguna disposición adecuada para ser eliminados, sino por el contrario, por la lluvia son transportados a los manantiales y absorbidos en el suelo y por tanto, llevados a los nacimientos que proveen agua a la zona y las corrientes llegan a desembocar en lugares como el río Cutzamala, el cual a su vez provee de este vital líquido a la Ciudad de México.

Bajo este contexto el presente trabajo de tesis plantea la utilización de los residuos generados de las granjas piscícolas para proveer beneficios a los habitantes de Amanalco y al medio ambiente. La tecnología propuesta es la degradación anaerobia, utilizando digestores de polietileno de bajo costo y prácticos para zonas rurales, ésta tecnología es utilizada en países en vías de desarrollo como Colombia, Venezuela y México, entre otros.

Se realizaron visitas al municipio de Amanalco en especial a una granja piscícola “Conejeras III” de la cual se recolectaron muestras de los desechos de trucha y del agua que abastece al lugar. Las pruebas de caracterización fisicoquímica de los residuos fueron realizadas en el laboratorio de Ingeniería Ambiental del postgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM y la estimación de producción de biogás en un reactor anaerobio a nivel laboratorio por Ayala (2008).

Con las pruebas de laboratorio se proyectó la cantidad de metano producido de la muestra de piscifactorías del municipio de Amanalco, dando un total real de 0.111 m³/día y teórico de 0.715 m³/día de CH₄. Asimismo, se determinó que esta cantidad de producción no es la suficiente para generar energía eléctrica, sin embargo aumentando la cantidad de desecho depositada en el digestor, se llegaría a generar energía eléctrica y aumentar la rentabilidad del proyecto.

Los resultados encontrados fueron que 1 kg de desecho de trucha produce 1.245 L de biogás/día con una concentración de metano del 59.5% en un régimen intermitente de 10 días de operación. Dentro de las contribuciones ambientales, la producción de

metano es equivalente a 0.027 Ton métricas equivalentes de CO₂ al año si se disponen de todos los residuos de trucha de Amanalco.

Los costos mínimos de materiales para la construcción de un digester de polietileno de 0.7728 m³ de volumen en la zona de estudio es de 2,052.5 pesos y que puede ser operado en forma manual y práctica por los habitantes de la zona.

El uso del biogás real producido por las piscifactorías es de 67,525 litros al año equivalentes a 37.170 litros de diesel.

Nomenclatura

acpm	: Aceite combustible para motor
atm	: Atmósfera
C	: Carbono
C.I.	: Combustión Interna
CFE	: Comisión Federal de Electricidad
CH ₄	: Metano
CHP	: Combined Heat and Power Units
Cl	: Cloro
Cm	: Centímetro
CO	: Monóxido de carbono
CO ₂	: Dióxido de carbono
CRE	: Comisión Reguladora de Energía
dlls	: dólares
DOE	: Entidad Operacional Designada
DQO	: Demanda Química de Oxígeno
EPA	: Environmental Program Agency
GEI	: Gases de Efecto Invernadero
h	: Hora
H ₂	: Hidrógeno
H ₂ O	: Agua
H ₂ S	: Ácido sulfhídrico
ha	: Hectárea
HP	: Caballos de fuerza
INEGI	: Instituto Nacional de Estadística y Geografía
kcal	: kilo caloría
kg	: kilogramo
kJ	: kilo Joule
kV	: kilo Volt
kVA	: kilo Volt Ampere
kW	: kilo Watts
kWh	: kilo Watts hora
l	: Litro
m ²	: Metro cuadrado
m ³	: Metro cúbico
MDL	: Mecanismo de Desarrollo Limpio
MJ	: Mega Joule
ml	: mililitro
mm	: Milímetro
MO	: Materia orgánica
Ms	: Materia seca
MT	: Micro Turbina
MW	: Mega Watts
MWt	: Mega Watts térmico
N	: Nitrógeno
°C	: Grados Centígrados
PJ	: Penta Joule

Ppm	: Partes por millón
Q	: Gasto
S	: Azufre
SEMARNAT	: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIMEPRODESO	: Sistema Metropolitano de Desechos Sólidos
ST	: Sólidos Totales
SV	: Sólidos Volátiles
Ton	: Toneladas
TRH	: Tiempo de Residencia Hidráulico
TRM	: Tiempo de Retención de microorganismos
TRS	: Tiempo de Retención de sólidos
USCUSS	: Uso de Suelo, Cambio de Uso de Suelo y Sivilcultura
V	: Volumen
W	: Watts
We	: Watts eléctricos



Capítulo 1

Introducción y objetivos

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

Introducción

El desarrollo de la sociedad está basado en el consumo de grandes cantidades de energía. La creciente demanda de las necesidades sociales y medioambientales son indicadores para poner en marcha acciones, que puedan cubrir los requerimientos energéticos de bajo impacto ecológico que éstas exigen. En los países en desarrollo, como México, las comunidades rurales son las más afectadas, dado que el costo de progreso es muy alto.

En este contexto la contribución a la contaminación ambiental por el uso de combustibles convencionales derivados de materiales fósiles, sumado al costo que involucra su obtención y su carácter finito, genera la necesidad de destinar mayores recursos y tiempo a las investigaciones relacionadas con energías renovables. Se ha estimado que México cuenta con un potencial de reducción y captura de emisiones cercanas a los 81 millones de toneladas de CO₂/anuales entre 2008 y 2012. En el mercado del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), esto podría traducirse en ingresos de alrededor de 500 millones de dólares por año. Estos ingresos ayudarán a promover el desarrollo de sectores energético, industrial, agrícola y forestal de México (Morrison, 2004; Rang, 2004).

Bajo estos términos, la utilización de energías renovables se presentan como soluciones efectivas que pueden resultar rentables, es decir, menor dependencia del mercado convencional, desarrollo de la economía local, creación de puestos de trabajo, etc. Adicionalmente, estas tecnologías puede disminuir la contaminación del medio ambiente, causada por las emisiones de gases de los sistemas convencionales, los cuales contribuyen al efecto invernadero y al calentamiento global de nuestro planeta.

La bioenergía se ha identificado como la más importante fuente de energía renovable. Ésta se enfoca a la reducción de emisiones de dióxido de azufre y carbono, a la electricidad y la generación de fuentes de calor, uso de biogás y obtención de energía a través de desechos. Existen diversos procesos para convertir la biomasa en energía, y en algunos de estos se utilizan las características bioquímicas de la biomasa y la acción metabólica de los microorganismos para producir combustibles, siendo el más importante la degradación anaerobia, que en países de alta población son muy

utilizados. La degradación anaerobia es un proceso en que la biomasa a través de las bacterias generan un gas combustible llamado biogás (Jeason y Carrera, 2002), que es una mezcla de metano, bióxido de carbono, hidrógeno, ácido sulfhídrico, amoníaco, oxígeno y vapor de agua dependiendo de los diferentes desechos degradados en un digestor. Además la materia sólida remanente del proceso es un buen fertilizante orgánico.

El método de degradación anaerobia es realizado en un digestor. El digestor es una instalación herméticamente sellada donde se introduce la materia orgánica a degradar y el biogás producido es recolectado. Aquí los desechos son sanitizados, es decir se eliminan los organismos patógenos; cualquier desecho orgánico produce biogás y biomasa estabilizada dentro del digestor.

La producción de biogás de todos los digestores en China es de 2×10^6 m³/año y es usado por 25 millones de personas para cocinar o para iluminar de 8 a 10 meses en un año. Existen 400 estaciones y 800 productoras de biogás con una capacidad total de 5,800 HP y 7,800 KW respectivamente que abastecen electricidad a 17,000 casas (Daton, 1989).

El metano generado en el biogás es el mismo que el gas natural utilizado actualmente en México. En el mercado de los energéticos, el biogás compite con: 1) La leña, 2) El gas natural, 3) La electricidad, 4) Fuentes energéticas utilizadas usualmente en la cocción; con el kerosene, las velas y la electricidad en la iluminación (sobre todo en lugares donde el servicio es deficiente o no existe); 5) Con el gas natural y la electricidad en la refrigeración y finalmente la gasolina o el diesel, como combustible para motores (Flotats y col., 2000). Lo anterior permite confirmar que esta tecnología, genera productos importantes que pueden sustituir a productos que tienen amplia demanda actualmente.

Dentro de los sustratos utilizados existen algunos muy estudiados como las aguas residuales urbanas, residuos agrícolas, estiércol de cerdo, estiércol de vaca y residuos orgánicos industriales. Sin embargo, hay sustratos o mezclas de éstos que despiertan gran interés por conocer la productividad que pueden alcanzar al tratarlos con sistemas anaerobios, tal es el caso de los desechos de granjas piscícolas. En la actualidad no se

han encontrado estudios de degradación anaerobia de desechos piscícolas. Lo cual, aporta la originalidad de este trabajo.

En Amanalco, un municipio rural marginado del Estado de México, las familias están compuestas por 5 personas en promedio y su actividad económica se sustenta en la comercialización de trucha arco iris de granjas piscícolas así como la crianza de otros animales. En visitas al lugar, se observó que los excrementos, desechos de vísceras de trucha arco iris y basura orgánica no tienen ninguna disposición adecuada para ser eliminados, sino por el contrario, por la lluvia son transportados a los manantiales y absorbidos en el suelo y por tanto, llevados a los nacimientos que proveen agua a la zona. Se han encontrado presencia de coliformes fecales y totales en los nacimientos que abastecen a las granjas piscícolas y al consumo de los habitantes. Actualmente existen 74 factorías pero el abastecimiento de gas LP, de electricidad y el tratamiento de sus residuos es inexistente o insuficiente. Es por lo anterior, que se ha planteado para este trabajo, la implementación de digestores para el tratamiento de los desechos y la utilización del biogás para producir energía eléctrica para las comunidades con problemas de contaminación y/o más marginadas.

Objetivos

Objetivo General

- Determinar la factibilidad de generación de energía eléctrica a partir de la digestión de los desechos de granjas piscícolas de Amanalco.

Objetivos específicos

- Determinar la producción de metano de los residuos de truchas
- Estudiar la factibilidad para la conversión de biogás a electricidad a bajo costo
- Determinar las contribuciones ambientales y sociales a la comunidad

Esta página se dejó en blanco intencionalmente



Capítulo 2

Biomasa

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

2.1 Energía de la Biomasa

La biomasa ha sido la fuente de energía más utilizada por el hombre durante casi toda su historia. La mayoría de los sistemas desarrollados por el ser humano para captar energía solar, si bien han representado un considerable esfuerzo investigador, adolecen de la falta de unas perspectivas económicamente rentables para aprovechar la energía solar en forma masiva. El modelo básico de captación y acumulación de energía solar es a través de los vegetales verdes seleccionados por la naturaleza a lo largo de más de 3,000 millones de años.

Esta forma de captación de energía es la única fuente renovable que conlleva asimismo un almacenamiento, lo que la distingue de la energía solar directa, la eólica u otras que han de concentrarse y almacenarse artificialmente, a menudo con dificultad. Así pues, la materia orgánica constituye energía solar almacenada y es la denominada energía de la biomasa.

Biomasa es un término genérico referido a cualquier producto biológico que puede convertirse en energía útil. La biomasa incluye madera, productos vegetales y animales y todo tipo de residuos orgánicos. La formación de materia viva o biomasa a partir de la luz solar se lleva a cabo por el proceso denominado fotosíntesis, gracias al cual se producen grandes moléculas de alto contenido energético, cuyo costo de almacenamiento es nulo y, en principio, sin pérdidas.

Mediante la fotosíntesis, los vegetales transforman productos minerales sin valor energético como dióxido de carbono y agua en materias orgánicas de alta energía. Este proceso sólo tiene lugar en las plantas verdes que contienen clorofila, pues ésta posibilita toda serie de reacciones químicas que tienen lugar para la fotosíntesis. Los productos que fabrican para sí las plantas (azúcares, proteínas, grasas, etc.) y el oxígeno que simultáneamente eliminan, sirven a su vez, directa e indirectamente, de alimentos o energéticos a todos los demás seres que habitan el planeta (Sarabo y Elortegui, 2000).

Desde la prehistoria, la forma más común de utilizar la energía de la biomasa ha sido por medio de la combustión directa, convirtiéndola en calor para suplir las necesidades de calefacción, cocción de alimentos, producción de vapor y generación de electricidad.

La utilización energética moderna de los residuos orgánicos requiere de un acondicionamiento especial para su uso. Los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de procesos más eficientes y limpios para la conversión de biomasa en energía; transformándola por ejemplo, en combustibles líquidos o gaseosos más convenientes y eficientes.

Las fuentes principales de biomasa son los campos forestales y agrícolas, pues en ellos se producen residuos. En la agroindustria, los procesos de secado de granos generan bagazo de caña de azúcar, cascarillas de café y cascarillas de arroz entre otros. Por otro lado, los centros urbanos generan cantidades de basura compuestas en gran parte por materia orgánica que puede ser convertida en energía, después de procesarla adecuadamente (BUN-CA, 2002). Así aparte de la combustión interna se pueden distinguir otros procesos que a continuación se describen brevemente.

2.2 Conversión de la biomasa en energía

El desarrollo de la civilización actual lleva consigo una generación continua de grandes cantidades de residuos, que están creando un problema por su magnitud y consecuencias. La mayor parte de estos residuos son de carácter orgánico. El tratamiento de los residuos es una actividad costosa, que hasta hace poco no se ha llevado con eficacia por falta de una legislación adecuada y por carencia de medios económicos. No obstante es posible el aprovechamiento de los residuos con fines energéticos.

La baja densidad física y energética de gran parte de la biomasa tal como se recupera de los residuos o de la recolección directamente del terreno, así como su contenido alto en humedad determina que en la mayoría de los casos no sea adecuado para reemplazar a los combustibles fósiles. Se hace necesaria, una transformación previa de la biomasa en combustible de mayor densidad energética y física, contándose para ello con diversos procedimientos que generan una gran variedad de productos (Sarabo y Elortegui, 2000).

El contenido de humedad de la biomasa es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es

imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30% puesto que los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad superior, que obliga a implementar operaciones de acondicionamiento, antes de ingresar al proceso de conversión de energía. La humedad esta directamente relacionada con el poder calorífico disponible en la biomasa.

Los procesos de conversión de biomasa más relevantes se pueden clasificar en tres categorías (Sarabo y Elortegui, 2000):

- Procesos termoquímicos
- Procesos fisicoquímicos
- Procesos bioquímicos

Los sistemas de conversión de energía de la biomasa van desde simples procesos tradicionales hasta tecnologías modernas altamente eficientes. En la actualidad, algunos de estos sistemas están establecidos comercialmente y se encuentran totalmente disponibles. Otros todavía requieren ciertas mejoras técnicas y que sus costos disminuyan; y algunos otros necesitan un financiamiento a largo plazo que permita el desarrollo de técnicas sostenibles y alentar su reproducción.

Desde el punto de vista energético, se puede hacer referencia a la Figura 2.1 en la cual se ponen de manera esquemática los procesos de conversión de la biomasa en energía (SE, 2004).

Las características químicas y físicas de la biomasa determinan el tipo de combustible o subproducto energético que se puede generar por ejemplo, los desechos animales producen altas cantidades de metano, mientras que la madera puede producir el denominado “gas pobre”, que es una mezcla rica en monóxido de carbono (CO). Por otro lado, las características físicas influyen en el tratamiento previo que sea necesario aplicar. Los elementos químicos más importantes son carbono (C), hidrógeno (H₂), nitrógeno (N), azufre (S), en algunos casos, cloro (Cl), y además del contenido de oxígeno (O).

Todas las formas de biomasa consisten en una parte orgánica, una inorgánica y agua. En la combustión se quema la parte orgánica. La inorgánica influye en el proceso de combustión y forma la ceniza o residuo sólido que permanece después de la combustión (BUN-CA, 2002).

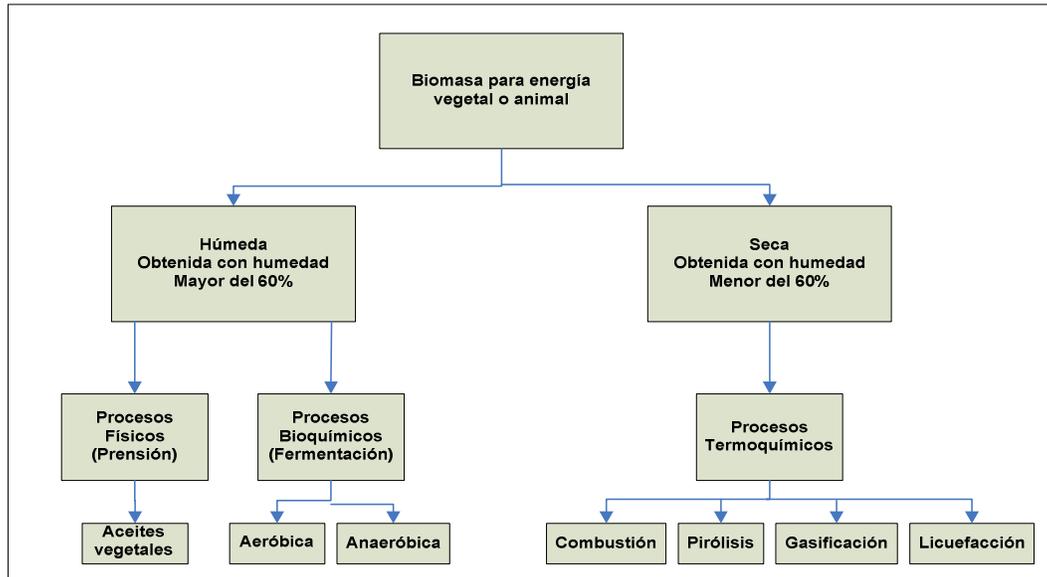


Figura 2.1 Procesos de conversión de la biomasa en energía (SE, 2004)

Biomasa seca es aquella que puede obtenerse en forma natural con un grado de humedad menor al 60%, como la leña, paja, etc. Este tipo se presta mejor a ser utilizada energéticamente mediante procesos termoquímicos o fisico-químicos, que producen directamente energía térmica o productos secundarios en la forma de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos.

Se denomina biomasa húmeda cuando el porcentaje de humedad supera el 60%, como por ejemplo en los restantes vegetales, residuos animales, vegetación acuática, etc. Ésta resulta especialmente adecuada para su tratamiento mediante procesos químicos, o en algunos casos particulares, mediante simples procesos físicos, obteniéndose combustibles líquidos y gaseosos (SE, 2004).

2.2.1 Procesos termoquímicos

Estos procesos se basan en someter la biomasa a la acción de altas temperaturas, en condiciones variables de oxidación, transformándola en un producto de más alto valor,

con una densidad y un valor calorífico mayor, los cuales hacen más conveniente su utilización y transporte. Cuando la biomasa se quema bajo condiciones controladas, sin hacerlo completamente (combustión incompleta), su estructura se rompe en compuestos gaseosos, líquidos y sólidos que pueden ser usados como combustible para generar calor y electricidad. Dependiendo de la tecnología, el producto final es un combustible sólido, gaseoso o líquido, como se puede observar en la Figura 2.2 (SE, 2004).

Los procesos termoquímicos pueden subdividirse en tres amplias categorías. Si el calentamiento se lleva a cabo con exceso de oxígeno se denomina combustión; en cantidades limitadas de oxígeno se denomina gasificación o en ausencia del mismo se le conoce al proceso básico como pirólisis o carbonización (modificado de BUN-CA, 2002).

Los materiales idóneos para su conversión termoquímica son los de bajo contenido en humedad y alto en lignocelulosa, tales como madera, paja, cáscaras, etc. El poder calorífico de la biomasa depende mucho del tipo de biomasa considerada y de su humedad. Así normalmente estos valores de poder calorífico de la biomasa se pueden dar en base seca o en base húmeda. En general se puede considerar que el poder calorífico de la biomasa puede oscilar entre los 12.5 y 14.58 MJ/kg para los residuos lignocelulósicos (SE, 2004).

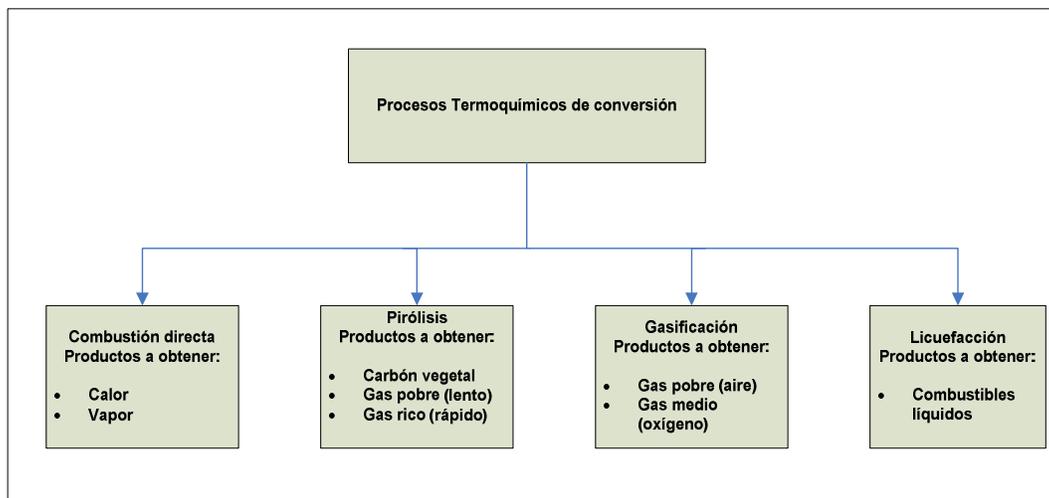


Figura 2.2 Procesos termoquímicos de conversión (SE, 2004)

A continuación se definirá brevemente cada uno de los procesos termoquímicos existentes:

Combustión directa: Se entiende por combustión, la oxidación completa de la materia para producir dióxido de carbono (CO_2), vapor de agua, cenizas y principalmente calor. Los sistemas de combustión directa son aplicados para generar calor, el cual puede ser utilizado directamente como por ejemplo, para la cocción de alimentos o para el secado de productos agrícolas. Además, éste se puede aprovechar en la producción de vapor para procesos industriales y electricidad.

Producción de carbón vegetal: Este proceso es la forma más común de la conversión termoquímica de temperatura mediana. La biomasa se quema con una disponibilidad restringida de aire, lo cual impide que la combustión sea completa. El residuo sólido se usa como carbón vegetal, el cual tiene mayor densidad energética que la biomasa original, no produce humo y es ideal para uso doméstico. Usualmente, este carbón es producido de la madera, pero también se usan otras fuentes como cáscara de coco y algunos residuos agrícolas.

Pirólisis: Es una descomposición térmica de biomasa en ausencia de aire que puede llevarse a cabo en régimen estacionario o en procesos continuos, es decir se trata de una combustión incompleta a altas temperaturas en condiciones anaerobias.

Cuando las temperaturas se controlan alrededor de los 205°C se obtienen principalmente líquidos, mientras que con temperaturas cercanas a los 650°C se obtienen gases como producto principal. En general los gases obtenidos de la pirólisis son de bajo contenido calorífico (370 a $1,110 \text{ kJ/m}^3$) y casi siempre una parte importante de ellos se quema para proporcionar el calor requerido en el proceso. Este gas, de poco poder calórico puede servir para accionar motores diesel, para producir electricidad, o para mover vehículos.

La destilación destructiva de la madera y otros productos agrícolas para producción de metanol, carbón vegetal y gas de bajo contenido calorífico es un ejemplo de pirólisis. Los aceites obtenidos de este proceso tienen un bajo contenido de azufre, cenizas y nitrógeno, y al quemarse crean pocos problemas de contaminación ambiental (Concheiro, 1985).

En el caso de la producción de combustibles líquidos y carbón se requiere una alimentación con humedad baja y constante, para lo cual se realiza una desecación previa, utilizando gases de la propia pirólisis.

No obstante, con objeto de mejorar los rendimientos en combustibles líquidos en la actualidad están suscitando gran interés los procesos de licuefacción, que es una variante de la pirólisis en el aspecto de que no utilizan comburente. Estos son llevados a cabo con un gas reductor, que puede ser monóxido de carbono, hidrógeno o gas de síntesis en presencia de catalizadores a alta presión. El proceso de la pirólisis y sus productos obtenidos podemos observar en la Figura 2.3.

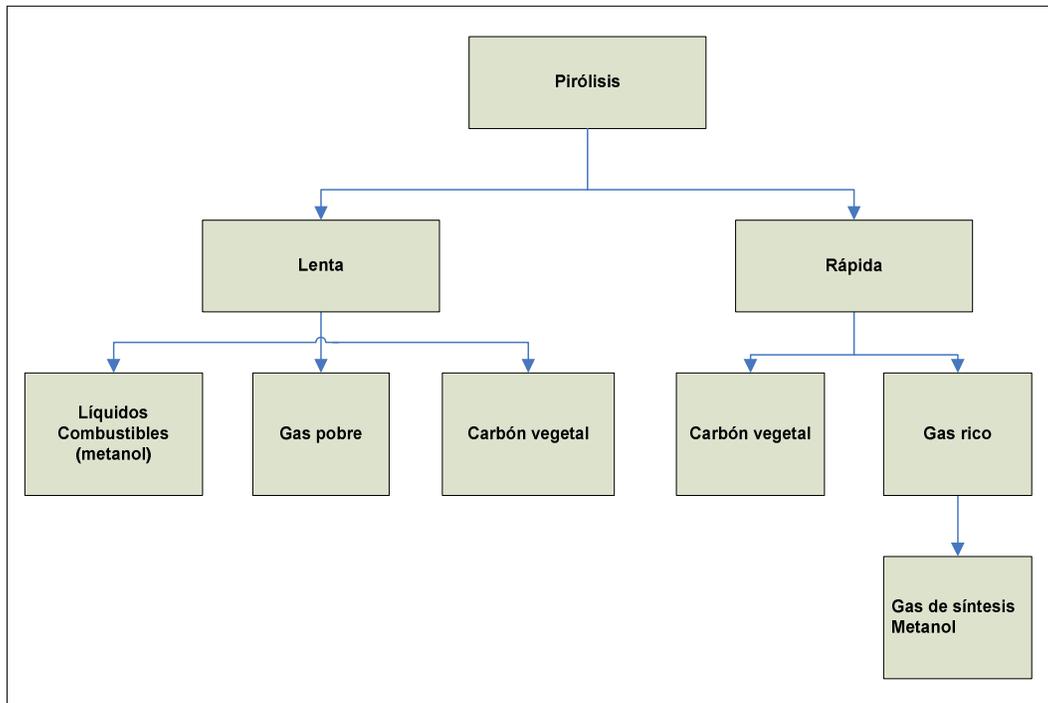


Figura 2.3 Pirólisis y sus productos (SE, 2004)

Gasificación: Proceso empleado para el tratamiento de la basura, el cual consiste en convertir un sólido a gas mediante pirólisis con nula o poca presencia de aire u oxígeno a temperaturas comprendidas entre 500°C y 1000°C (Reed, 2001). La gasificación no es un tema nuevo, ya que fue ampliamente usada durante la Segunda Guerra Mundial con aproximadamente un millón de gasificadores usados para operar carros, tractores, botes, trenes y generar electricidad (Penido y col., 1994).

La gasificación es el proceso mediante el cual la biomasa en general y la basura en particular es convertida en gases combustibles como monóxido de carbono, metano e hidrógeno. Los cuales idealmente contienen toda la energía original presente en la basura. En la práctica, las eficiencias de conversión fluctúan entre 60% y 90%. La gasificación es alcanzada por la degradación térmica de la materia orgánica en la ausencia o cantidad adecuada de aire para soportar la combustión completa (Reed, 2001).

En la gasificación se tienen como productos dos tipos de gases: El gas pobre y el gas de síntesis. El gas pobre se obtiene mediante la gasificación de biomasa seca, su poder calorífico es muy bajo entre 3.4 y 5.4 MJ/m³, se utiliza directamente en unidades de combustión para obtener electricidad y vapor. En cambio el gas de síntesis se produce cuando se opera en un gasificador con oxígeno y vapor de agua, su poder calorífico oscila entre los 5.0 y los 10.9 MJ/m³, este gas puede ser transformado en combustibles líquidos como metanol y gasolinas.

La mayor parte de las gasificaciones convencionales requieren un material de tamaño de partícula homogéneo de la biomasa, a fin de que pueda garantizarse la constancia de la reacción. La temperatura necesaria mínima de operación es de 700 a 800°C y la proporción de oxígeno es muy importante para optimizar la producción del llamado gas pobre y obtener un buen rendimiento de la mezcla gaseosa (BUN-CA, 2002). En general los gasificadores producen una mezcla de gases cuyos componentes principales son el CO, CH₄ e H₂. Este gas puede ser alimentado a un motor de combustión interna, a calderas y recientemente se está considerando para su empleo en celdas de combustible (Klein, 2002).

La presencia o no de nitrógeno en el comburente hace que se obtengan dos tipos diferentes de gas, no sólo en cuanto a su composición y capacidad calorífica, sino en cuanto a su utilización lo cual puede observarse en la Figura 2.4. Estos son el gas pobre o gas de gasógeno que es obtenido por la gasificación de biomasa con aire, y el gas de síntesis, producto de la gasificación con oxígeno (Modificado de Sarabo y Elortegui, 2000).

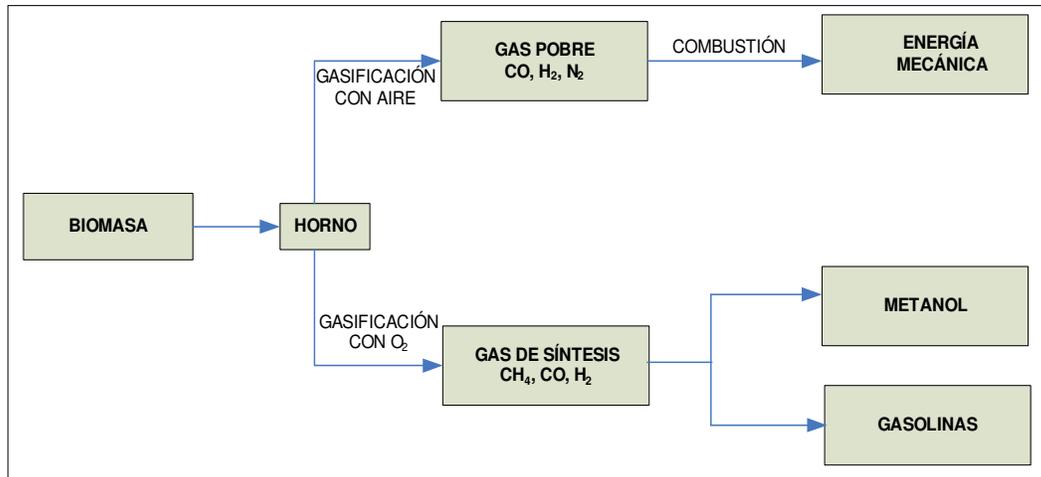


Figura 2.4: Proceso de gasificación (Sarabo y Elortegui, 2000)

El interés en la gasificación resurge en las empresas petroleras como la Texaco, Shell y otras, quienes en 1970 sumaban una capacidad de 4 mil MWt (340 millones de MJ) y que en 2004 alcanzaron los 42 mil MWt (4 mil millones de MJ). Los países con mayor capacidad instalada están en Europa con más de 15 mil MWt (1,290 millones de MJ), le siguen Asia con 10 mil MWt (860 millones de MJ), Norteamérica con 6.5 mil MWt (560 millones de MJ), África y Medio Oriente con 10 mil MWt (860 millones de MJ) y Centro y Sudamérica con 500 MW (40 millones de MJ) (SFA, 2002).

La inversión requerida para la generación de energía para plantas de gasificación oscila entre 2.2 y 2.3 millones de dólares por MWt instalado.

2.2.2 Procesos físico-químicos

Se puede considerar a los procesos fisicoquímicos aquellos en los que la biomasa puede ser modificada física y/o químicamente, así como la obtención de combustibles líquidos o gaseosos vegetales de los cuales podemos destacar el siguiente.

Prensado/extracción: La ruta de conversión físico-química produce un biocombustible líquido a partir de la biomasa que contiene aceite vegetal. Esta tecnología es similar a las rutas de conversión para producir aceite vegetal en la industria alimenticia.

El aceite vegetal se produce al prensar y/o extraer el aceite de la semilla. De manera que sólo se pueden usar especies que contienen aceite, como la semilla de colza, el girasol, el frijol de soya y el aceite de palma. La producción de aceite vegetal se considera, desde hace décadas, como una tecnología de punta, pero los costos energéticos son todavía altos y la reducción potencial de los precios es baja. El uso de este aceite como combustible es muy sencillo. En los sistemas de calefacción ambiental, por ejemplo, se puede usar puro o en mezclas dependiendo del tipo de quemador, también puede sustituir al diesel o ser añadido a éste sin problemas (BMFT, 1992). La producción del biodiesel se puede llevar a cabo ya sea a partir del aceite virgen o de los desechos de aceite y de grasas de origen vegetal o animal.

2.2.3 Procesos bioquímicos

Estos procesos mostrados en la Figura 2.5 utilizan la acción bioquímica de la biomasa y la acción metabólica de organismos microbiales para producir combustibles gaseosos y líquidos. Son más apropiados para la conversión de biomasa que los procesos termoquímicos. Los más importantes son:

- Degradación aerobia
- Degradación anaerobia y
- Relleno sanitario

De la **degradación aerobia** de la biomasa se pueden producir combustibles líquidos como etanol y metanol. El etanol se produce por medio de la fermentación de azúcares y, el metanol por la destilación destructiva de madera. La tecnología de la fermentación se ha utilizado durante siglos para la producción de licores y, más recientemente, para generar sustitutos de combustibles fósiles para transporte, particularmente en Brasil. Estos biocombustibles se pueden utilizar en forma pura o mezclarlos con otros, para transporte o para la propulsión de máquinas.

Se puede producir un gas combustible de la fermentación de los desechos sólidos urbanos en los **rellenos sanitarios**. El biogás de relleno sanitario es una mezcla de gases, compuesta por metano en una proporción del 55% de metano y dióxido de

carbono con un 35%, el resto es nitrógeno, hidrógeno y otros gases en cantidades traza. El biogás tiene un poder calorífico medio de aproximadamente 18.75 MJ/m^3 , se puede emplear en motores de combustión interna, turbinas de gas y celdas de combustible (Themelis, 2002).

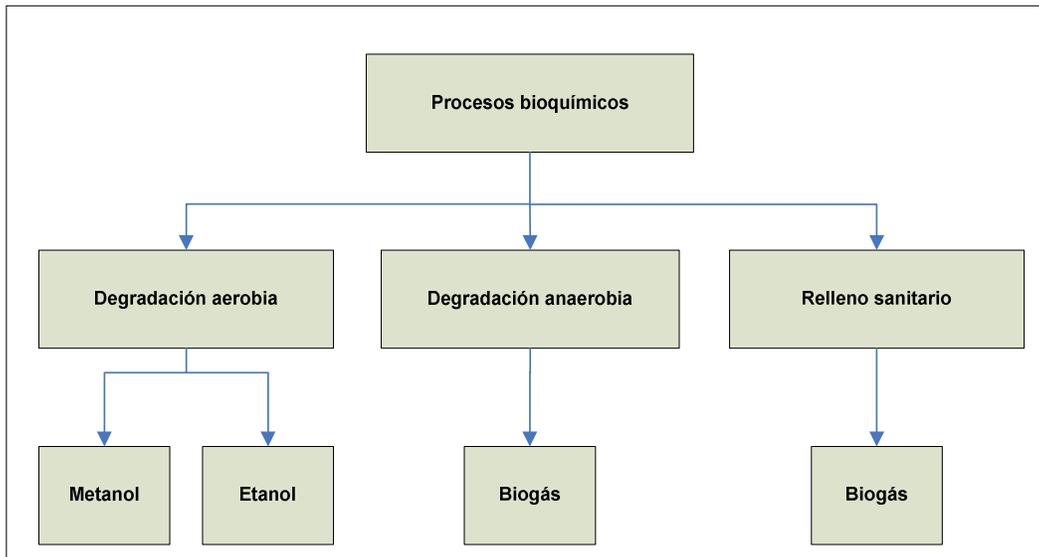


Figura 2.5 Procesos bioquímicos

La fermentación de los desechos y la producción de gas es un proceso natural y común en los rellenos sanitarios; sin embargo generalmente este gas no es aprovechado. Además de producir energía, su explotación y utilización reduce la contaminación y el riesgo de explosiones en estos lugares y disminuye la cantidad de gases de efecto invernadero (BUN-CA, 2002).

En México, los rellenos sanitarios son en la actualidad la forma más utilizada para disponer la basura en nuestro país. Cuando esto no se hace, la basura termina tirada en las calles, los bosques, o a la orilla de las carreteras, con los consecuentes impactos ambientales.

La producción diaria en México a nivel nacional de basura en el año 2000 se estimó en 84,200 toneladas, de las cuales, sólo el 53% (44,600 toneladas) se depositaron en 51 rellenos sanitarios ubicados en ciudades medias, zonas metropolitanas y muy poco en localidades pequeñas. Esto representa un confinamiento anual en rellenos sanitarios de 16'279,000 toneladas. Con el biogás que ya produce la basura confinada en los últimos

cinco años, sería posible soportar una capacidad de generación eléctrica cercana a los 80 MW, e incorporar 16 MW adicionales con la nueva basura que, año con año, se estará acumulando en los rellenos existentes (Arvizu, 2003).

En el 2002 habían en el mundo alrededor de 1,152 plantas que suman una capacidad de generación eléctrica de 3,929 MW y generan en promedio 3.1 m³/ton-año de biogás de relleno sanitario. De estas 1,152 plantas, 734 están en Europa y 354 en Estados Unidos, 15 en Canadá, 19 en Asia, 18 en Australia, 8 en Sudamérica y 4 en África. Las plantas en Europa en promedio tienen una capacidad instalada de 1.73 MW por planta, en tanto que en Estados Unidos es de 6.7 por planta, lo cual indica que las plantas de Estados Unidos son muy grandes comparadas con las de Europa (Themelis, 2002).

En México existe una planta de 7.4 MW instalada en el relleno sanitario de Salinas Victoria en la zona conurbada de Monterrey, está instalada en una celda que contiene 7 millones de toneladas de basura municipal. La energía generada es enviada por la red eléctrica de CFE hasta la zona metropolitana de Monterrey para ser usada en alumbrado público, bombeo de agua y el transporte colectivo de la ciudad (Gutiérrez-Vera, 2004).

Esta planta representa la primera experiencia en el ámbito nacional, sobre el aprovechamiento del biogás emitido por la basura dispuesta en rellenos sanitarios, para la generación de energía eléctrica y es utilizada para alimentar una línea de metro en la ciudad de Monterrey, en la Figura 2.6 se presenta una fotografía de la planta. El proyecto está enmarcado dentro de las políticas mundiales sobre el control de emisiones para la reducción de los gases de efecto invernadero (GEI), y su impacto en el cambio climático global (Flores, 2004).

La Planta está ubicada en el km 10.5 de la carretera del municipio de Salinas Victoria, N.L., dentro de los terrenos del relleno sanitario del Sistema Metropolitano de Procesamiento de Desechos Sólidos (SIMEPRODESO). Esta planta fue diseñada con tecnología de punta en forma modular para facilitar su instalación, operación, mantenimiento y flexibilidad para futuros incrementos de capacidad.



Figura 2.6 Central de biogás- SIMEPRODESO (Seisa, 2005)

La planta comprende dos sistemas principales, el primero es una red de captación de biogás sobre un área clausurada de 44 ha en la que se depositaron residuos sólidos municipales no peligrosos de 1991 a 1999, y que se ha estimado proveerá de biogás para operar la planta al menos 20 años. Este sistema consta de 160 pozos, 15.8 km de tubería de polietileno de media densidad de 63 mm y 315 mm de diámetro, 3 bombas de extracción con capacidad de 3,000 m³/h cada una, filtros y tanques separadores de condensados y sistema de control de flujos y 2 quemadores de excedentes de biogás de 1,250 m³/h. El segundo sistema corresponde a la central de producción de energía eléctrica compuesta por 7 motogeneradores de 1.06 MW cada uno y 7 transformadores de 1,250 kVA.

El biogás generado por el sitio es recuperado por los 160 pozos construidos en el relleno sanitario. El biogás está compuesto de 55% de metano, que es convertido por los motogeneradores a electricidad. Esta a su vez es acondicionada por los transformadores elevando su voltaje a 34.5 KV para ser suministrados a alimentadores de distribución de

CFE, y entrega la energía a los usuarios de la misma, para alumbrado público, bombeo y tratamiento de agua, transporte y edificios públicos (Gutiérrez-Vera, 2004).

El proyecto tiene el propósito de demostrar la efectividad tecnológica, económica, institucional y social del aprovechamiento del biogás, para ser reproducido en otras ciudades de México y Latinoamérica. La generación de biogás en el futuro y la rentabilidad del proyecto requieren periodos de 15 ó 20 años, que rebasan los periodos de las administraciones municipales y estatales. Por lo que una alternativa viable es el carácter autónomo de los organismos operadores como es el caso de SIMEPRODESO que pueden trascender a estos periodos administrativos. De tal manera que el Banco Mundial impulsó la realización del proyecto, teniendo como elemento fundamental la participación de SIMEPRODESO (Flores, 2004).

Entre los beneficios ambientales derivados del proyecto de Salinas Victoria contribuyen a la disminución del calentamiento global de nuestro planeta por evitar la emisión de 68 m³/min de biogás, que equivalen a dejar de consumir el equivalente a 1 millón de toneladas métricas de carbón, o a retirar 90,000 automóviles de circulación, aunado a que se refuerza una correcta disposición de la basura, evitando riesgos de disipación del biogás al medio ambiente, GEI, incendios, explosiones y malos olores (Gutiérrez-Vera, 2004).

Los beneficios energéticos radican en la generación de 52 millones de kWh anuales de energía eléctrica que equivalen a la requerida por 30,000 casas de interés social, y que es capaz de abastecer al 80% del alumbrado público de Monterrey beneficiando a una población de 50,000 mil familias promedio. La inexistencia de centrales de biogás en el país antes de la Planta de Salinas Victoria, ha dado lugar a una serie de situaciones en la realidad que deben mejorarse sustancialmente, para cumplir con las estrategias impulsoras del proyecto, como son los de tener una producción de energía eléctrica en la modalidad de cogeneración; la utilización de las líneas de transmisión de CFE; la venta de energía excedente a CFE a tarifa comercial; la mitigación del efecto invernadero; la generación de energía a precio competitivo que dé como resultado una inversión rentable; así como tener una generación de electricidad para apoyar el crecimiento acelerado en la demanda nacional y lograr que el biogás sea considerado como una fuente alterna de energía renovable.

Los costos de generación de cualquier sistema de energía renovable, solamente son competitivos con los precios de la tarifa de alumbrado público. Los sistemas de alumbrado público se conectan en mediana o baja tensión, lo cual implica costos de porteo elevados. El tamaño y capacidad de la central de biogás requiere que la conexión con la red de CFE sea en alimentadores de distribución (Arvizu, 2004). La inversión requerida para la generación de energía con biogás oscila entre 750 mil y 1.3 millones de dólares por MW instalado. En el caso de la generación con biogás los costos de inversión pueden reducirse en un 35% si el proyecto es financiado dentro del marco de los bonos de carbono (Antonioli, 2004).

2.3 Degradación anaerobia

El objeto de este estudio es la generación de energía eléctrica a partir de la digestión de la biomasa. Los procesos antes mencionados fueron para proporcionar un panorama corto sobre los diferentes procesos de conversión de biomasa en energía que se conocen hoy en día.

El abastecimiento de energéticos comerciales en el medio rural como la electricidad, kerosene, gas natural o gas licuado, y otros, tienen grandes restricciones debido fundamentalmente al aislamiento, dispersión y falta de vías de comunicación. Los habitantes de las áreas rurales presentan carencias importantes en cuanto a la disponibilidad de energía útil para fines domésticos y agroindustriales (Mandujano, 1981).

Las áreas rurales se caracterizan por disponer de grandes cantidades de desechos provenientes de las actividades agrícolas y pecuarias que allí se desarrollan. El estiércol de los animales, la paja de arroz, las hojas, los residuos de la cocina y demás materiales orgánicos similares pueden, teóricamente, ser convertidos en energía y en abono que retoma a la tierra de donde fueron tomados por las plantas. Esta transformación de los residuos prácticamente inútiles en nuevos productos, se logra mediante un proceso bioquímico conocido como la degradación anaerobia de la materia orgánica (IIT, 1983).

La digestión de la biomasa se lleva a cabo por bacterias en un ambiente sin oxígeno (anaerobio) produciendo un gas rico en metano. En el proceso se coloca la biomasa, generalmente de desechos animales, en un contenedor cerrado denominado digestor y allí se deja fermentar. Después de unos días, dependiendo de la temperatura ambiente, se habrá producido un gas, que es una mezcla de metano y dióxido de carbono. La materia remanente dentro del digestor (lodo o fango) es un buen fertilizante orgánico. Los digestores han sido promovidos fuertemente en China e India para usos domésticos en sustitución de la leña.

La digestión es un proceso de fermentación natural, conocido por el hombre desde tiempo atrás pero poco utilizado, especialmente en América Latina. El proceso ocurre en ausencia de oxígeno al interior de un digestor, reactor que facilita el crecimiento y la proliferación de un grupo de bacterias anaerobias, que descomponen y tratan los residuos dejando como resultado final, un gas combustible conocido como biogás. El biogás es rico en metano, así como dióxido de carbono y minoritariamente nitrógeno, amoníaco y ácido sulfhídrico. Como producto sólido de degradación, se tiene un efluente o lodo rico en nutrientes estable e inodoro rico en nitrógeno, fósforo y potasio (López, 1996). Las principales ventajas y desventajas de la digestión o tratamiento anaerobio pueden describirse en la Tabla 2.1.

En principio puede servir como materia prima para el proceso de degradación anaerobia todo tipo de biomasa, especialmente la de alto contenido en humedad. Sin embargo, la viabilidad del tratamiento de cada tipo de materia orgánica depende de una serie de factores relacionados con su composición y contenido en nutrientes, dado que se trata de un proceso microbiológico. Por ello, la biomasa más utilizada para someterla a digestión es la de tipo residual, destacando, por su importancia en este campo, los residuos ganaderos y los lodos de depuradora de aguas residuales urbanas. Al tratarse de residuos de alto contenido en humedad, no es conveniente para su tratamiento utilizar procesos térmicos, por su bajísimo rendimiento en este caso.

Al tratarse de residuos de alto contenido en humedad, no es conveniente para su tratamiento utilizar procesos térmicos, por su bajísimo rendimiento en este caso. Sin embargo, la tecnología de la degradación anaerobia presenta grandes ventajas para su aplicación a este tipo de biomasa (Sarabo y Elortegui, 2000).

Tabla 2.1 Principales ventajas y desventajas de la digestión (Noyola, 1990)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Baja producción de sólidos biológicos de desecho • Altas cargas orgánicas pueden ser aplicadas • La actividad de los lodos anaerobios pueden preservarse después de varios meses sin alimentación • Producción de energía en forma de metano • Bajo requerimiento de nutrimentos • No requiere de energía de aireación 	<ul style="list-style-type: none"> • Las bacterias anaerobias (particularmente las metanogénicas) son muy sensibles a la inhibición por varios compuestos (CHCl_3, CCl_4, CN^{-1} y metales pesados), por temperatura, pH, etc. • El arranque del proceso es lento si no se dispone de un inóculo • El tratamiento anaerobio demanda frecuentemente un postratamiento • En México existe poca experiencia sobre el proceso en sus fundamentos como en su aplicación

2.3.1 Etapas de la degradación anaerobia

El proceso global de la obtención de metano (CH_4) es el resultado de cuatro etapas consecutivas e independientes (Bullock, 1987; Pauss, 1987; Vesilind, 1981):

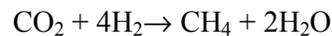
1. Hidrólisis o licuefacción
2. Acidogénesis o fermentación
3. Acetogénesis
4. Metanogénesis

Hidrólisis o licuefacción: En esta etapa las grandes y complejas moléculas del sustrato (lípidos, glúcidos, prótidos, etc.) son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas. La hidrólisis es por tanto, la conversión de polímeros en sus respectivos monómeros.

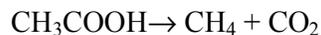
Acidogénesis: En esta etapa, parte de los monómeros producidos por la hidrólisis del sustrato es transformada en ácidos grasos (ácido acético, propiónico y butírico principalmente), alcoholes (metanol y etanol), dióxido de carbono e hidrógeno por medio de la población bacteriana estrictamente anaerobias.

Acetogénesis: Se le conoce también como acidogénesis intermediaria y la función de esta etapa es la de transformar algunos productos finales de la acidogénesis en precursores de metano. Las reacciones realizadas en esta etapa permiten evitar una acumulación de ácidos grasos volátiles, diferentes al acético, los cuales en concentraciones muy elevadas se convierten en inhibidores de la metanogénesis.

Metanogénesis: Las bacterias en esta etapa realizan la síntesis del metano, especialmente a partir del hidrógeno y del dióxido de carbono:



Y a partir del ácido acético:



Las cuatro etapas metabólicas que ocurren en los procesos de la degradación anaerobia pueden ser representadas según la Figura 2.7. Las bacterias requieren de un ambiente propicio para sobrevivir y luego para multiplicarse hasta alcanzar una población suficiente para que su acción sea apreciable. Estas condiciones son:

1. La ausencia de aire, para cumplir con el requisito de condición anaerobia que permite la supervivencia de los microorganismos
2. Las características del medio, llamado también sustrato donde crecen y se multiplican las bacterias, debe estar en equilibrio. Estas características se refieren a la temperatura, acidez, tipo de materia orgánica, tiempo de retención y relación nitrógeno/carbono (IIT, 1983).

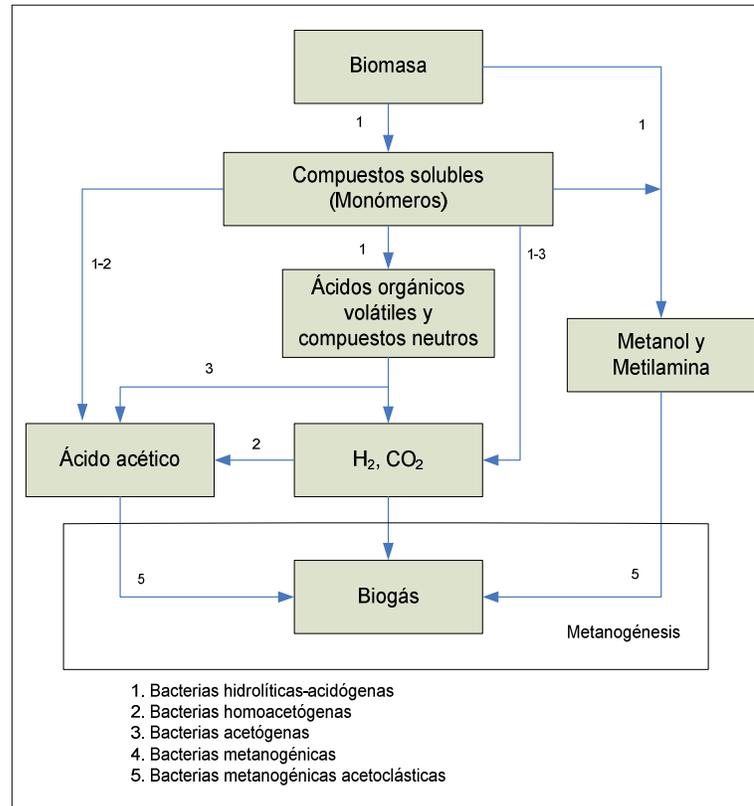


Figura 2.7 Etapas de la fermentación bacteriana

2.3.2 Parámetros de control de la degradación anaerobia

La degradación anaerobia es un proceso complejo desde el punto de vista microbiológico y forma parte del ciclo anaerobio del carbono. En ausencia de oxígeno es posible transformar la sustancia orgánica en biomasa en compuestos inorgánicos en su mayoría volátiles como CO₂, NH₃, N₂ y CH₄ (Soube, 1994). Naturalmente ocurre en el tracto digestivo de animales y debajo de aguas estancadas o pantanos, pero también puede realizarse en depósitos cerrados herméticamente, llamados digestores. Estos se utilizan cuando se quiere captar todos los productos obtenidos de la descomposición anaeróbica (gases y sólidos), en el cual se favorece en su interior un ambiente oscuro y sin aire para obtener un medio óptimo para el cultivo de bacterias anaerobias (Salazar, 1993).

La variedad de microorganismos que intervienen, sus amplias actividades y la amplia variedad de los constituyentes del sustrato, hacen que el desarrollo óptimo del proceso

de degradación anaerobia, por sí sólo, se dificulte. Sin embargo, con el conocimiento, manejo y control de los parámetros (internos y externos) relacionados directamente al proceso, darían como resultado, criterios para evaluar la operación de la degradación anaerobia. Los parámetros son los siguientes:

a) Temperatura

Generalmente, la degradación anaerobia se realiza a temperaturas comprendidas entre los 10 y 65°C. Dentro de estos límites, se distinguen dos puntos donde la producción de biogás es óptima, el mesofílico a los 35°C y el termofílico a los 55°C, y un punto de producción máxima que es superior a los 60°C. La principal regla es mantener constante la temperatura.

Rango mesofílico (30- 40°C): Trabajar en este intervalo de temperaturas, las bacterias se reproducen fácilmente y pueden permanecer activas si no ocurren cambios súbitos de temperatura que proporcionan menor producción de biogás y largos tiempos de retención. En una población bacteriana estable hay menores requerimientos energéticos y menos vapor de agua y de CO₂ en el biogás (Mandujano, 1981).

Rango termofílico (40-65°C): En este rango de temperatura se produce mayor cantidad de biogás que en el intervalo mesofílico y en tiempos más cortos, en general sólo es usado en las grandes instalaciones a nivel industrial, ya que se requiere de un control muy preciso, mayor reducción de patógenos y virus, digestores de menor volumen y mayor reducción del volumen del sustrato. Las bacterias termofílicas son muy sensibles a los cambios de temperaturas y en pequeños sistemas resulta antieconómico mantener esta temperatura controlada, especialmente en climas fríos.

Existe otro rango de operación, conocido como psicofílico, en donde la temperatura oscila entre los 10 y 25°C, y para obtener cantidades de gas apreciables es necesario que el residuo tenga bajo contenido en materia sólida (López, 1996).

En la Figura 2.8 se aprecian curvas de crecimiento de cada una de las bacterias dentro de los rangos de temperaturas respectivas.

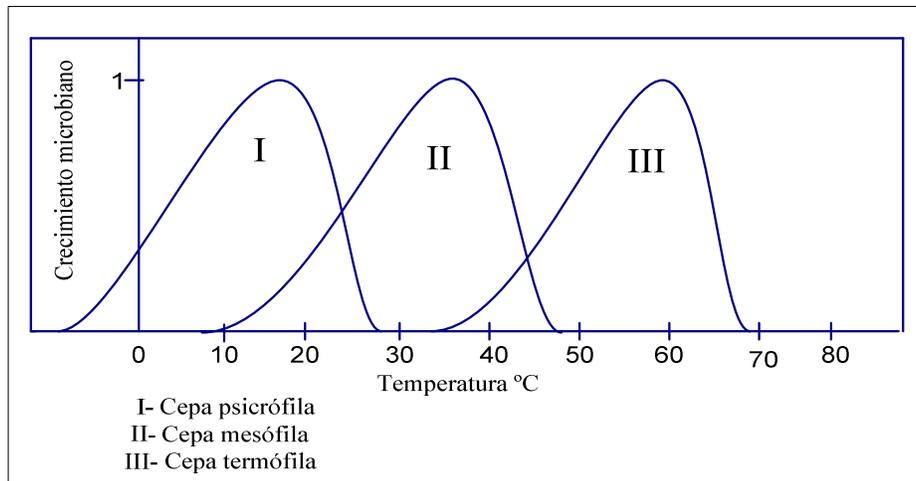


Figura 2.8 Crecimiento de bacterias (Castro-González, 2007)

b) pH

En las diferentes fases de la degradación anaerobia, el pH fluctúa entre 6.5 y 8.0, o sea un medio prácticamente neutro. El pH se mantiene en ese rango sólo si el digestor está operando correctamente. Si se pierde el equilibrio, por debajo de 6.5 se inhibirá la producción de metano debido a la presencia de grandes concentraciones de ácidos grasos volátiles. Por arriba de 8.0 la concentración de H_2 , H_2S y amoníaco en el biogás serán más elevadas. El equilibrio del pH está asegurado principalmente por bicarbonatos disueltos y en su desequilibrio las bacterias formadoras de metano se inhiben aumentando la proporción de dióxido de carbono en el biogás (Taiganides y col., 1963).

Las causas por la cuales puede descender el pH son, entre otras:

- Fluctuaciones de temperatura
- Velocidad de cargas del sustrato muy elevadas
- Presencia de elementos tóxicos como metales pesados y pesticidas

Las bacterias metanogénicas también son muy sensibles a los cambios de pH, teniendo un óptimo de 7.2 a 7.4 (Gollakota y Sarada, 1988). En algunos casos el pH bajo puede corregirse con adiciones de sustancias alcalinas como agua con cal (Mandujano, 1981). En la Figura 2.9 se muestra una gráfica que relaciona la concentración del CO_2 en el biogás y la alcalinidad ideal en el proceso de digestión.

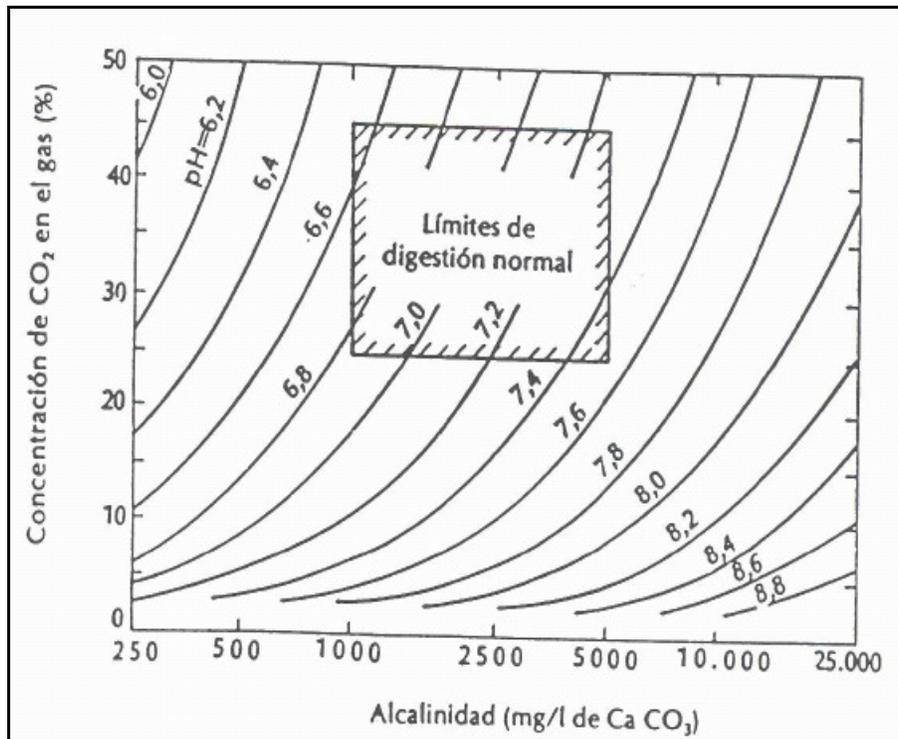


Figura 2.9 Concentración de CO₂ vs. Alcalinidad (Castro-González, 2007)

c) Tiempo de retención

Las bacterias requieren de un cierto tiempo para degradar la materia orgánica. La velocidad de degradación depende en gran parte de la temperatura, ya que a mayores temperaturas, el tiempo de retención requerido para obtener una buena producción de gas es menor, según se observa en la Figura 2.10.

En un digester que trabaja a régimen estacionario o sea de lote, el tiempo de retención es el que transcurre entre la carga del sistema y su descarga. En un sistema de carga diaria, el tiempo de retención va a determinar el volumen diario de carga que será necesario alimentar al digester, ya que se tiene la siguiente relación (Castro-González, 1997):

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

donde

TRH= tiempo de residencia hidráulica (días)

V = volumen del reactor (m^3)

Q = gasto ($m^3/día$)

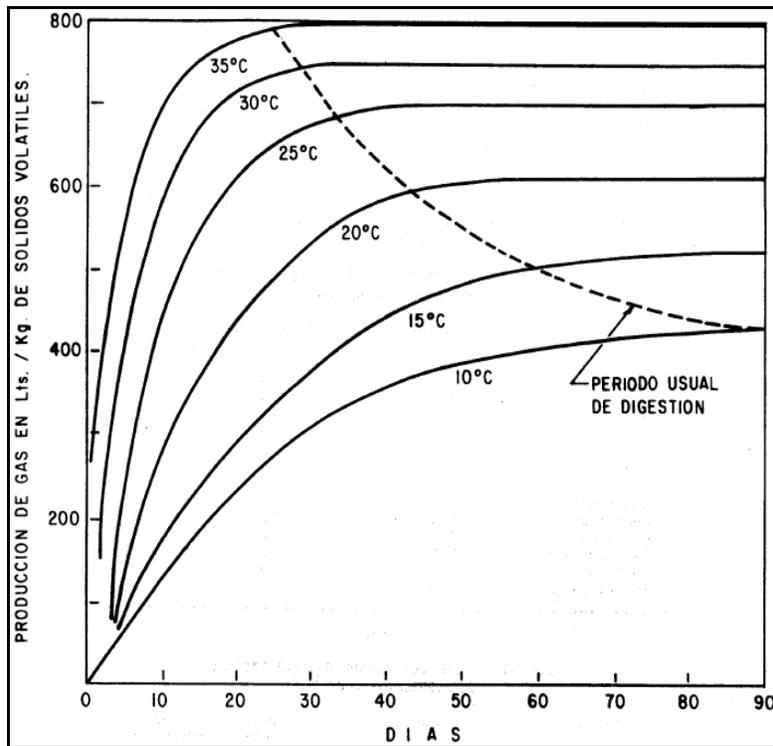


Figura 2.10 Producción de gas a diferentes temperaturas (Meynell, 1982)

Ya que las velocidades de crecimiento de las diferentes bacterias que participan en el proceso son diferentes, deben distinguirse tres tipos de tiempos: El tiempo de residencia hidráulico (TRH), el tiempo de retención de sólidos (TRS) y el tiempo de retención de microorganismos (TRM). Los tiempos de retención se utilizan para poder seleccionar el tipo de reactor. Así, largos TRS y TRM darán mayores producciones de CH_4 en el biogás, mientras que largo TRH aumentará el volumen del digestor (López, 1996).

El tiempo de generación de las bacterias metanogénicas está entre 2 y 20 días en temperaturas de 35 °C, el TRH típico para la degradación anaerobia es de 14 a 20 días. El contenido de sólidos volátiles controla la velocidad y cantidad de producción de biogás. Sin embargo, la concentración de sólidos totales afecta la capacidad de mezclado del lodo para eliminar proporciones de lodo crudo y porciones de lodo a diferentes temperaturas (Castro-González, 1997).

d) Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)

Prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometida a fermentación anaerobia, y la cantidad del biogás producido dependerá de la composición del desecho utilizado.

El carbono y el nitrógeno son las fuentes principales de alimentación de las bacterias formadoras de metano; el carbono es la fuente de energía y el nitrógeno contribuye a la formación de nuevas células (NAS, 1977). Las bacterias anaerobias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos elementos en la materia prima es de 30. Si no existe suficiente nitrógeno para permitir que las bacterias se multipliquen, la velocidad de producción de gas se verá limitado; al estar presente nitrógeno en exceso, se produce amoníaco, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso. Se incluye en la Tabla 2.2 una lista de las relaciones C:N de las materias comúnmente utilizadas, que permitirá tener una idea de las posibles combinaciones para obtener proporciones aceptables de carbono y nitrógeno para una operación anaerobia óptima.

Todos los materiales a degradar están compuestos en su mayor parte por carbono (C) y contienen nitrógeno (N). La relación C/N influye sobre la producción de gas, esta será óptima cuando C/N oscile entre 20:1 y 30:1.

Entre las materias primas más utilizadas en la generación de biogás, están los desechos animales, cuya relación C:N siempre es menor que la óptima, debido a que tienen un contenido importante de nitrógeno. Otro material muy usado son los residuos agrícolas, los que generalmente tienen relaciones C:N muy altas, ya que contienen muy poco nitrógeno, por lo que casi siempre se mezclan con desechos animales o se les agrega un compuesto nitrogenado, como puede ser urea, para acercarse a un balance adecuado de carbono-nitrógeno.

La relación C:N nos permitirá predecir cuánto biogás se puede producir así como estimar cuánto puede haber de cada uno de los gases que estarán presentes en la digestión, tal como se muestra en la Tabla 2.3.

Tabla 2.2 Relación C:N de diversos desechos disponibles en el medio rural (Meynell, 1982)

Material	% N (base seca)	% C (base seca)	C:N
Desechos Animales			
Bovinos	1.7	30.6	18:1
Equinos	2.3	57.6	25:1
Ovinos	3.8	83.6	22:1
Porcinos	3.8	76.0	20:1
Aves	6.3	50.0	7.9:1
Excretas humanas	0.85	2.5	3:1
Desechos Vegetales			
Paja de trigo	0.53	46.0	87:1
Paja de arroz	0.63	42.0	57:1
Rastrojo de maíz	0.75	40.0	53:1
Hojas secas	1.00	41.0	41:1

Tabla 2.3 Producción de gases dependiendo de la relación C:N (Castro-González, 2007)

Relación C:N	Biogás			
	CH ₄	CO ₂	H ₂	N ₂
Baja 20:1	Poco	Mucho	Poco	Mucho
Media	Mucho	Poco	Poco	Poco
Alta 30:1	Poco	Mucho	Mucho	Poco

e) Porcentaje de sólidos

El contenido de sólidos es un factor que influye de manera considerable en el proceso anaerobio. Si la alimentación está muy diluida, los microorganismos no tienen alimento suficiente para sobrevivir. Por el contrario, una alimentación muy concentrada, reduce

la movilidad de las bacterias y, por tanto, la efectividad del proceso al dificultar el acceso de las bacterias a su fuente de alimentación.

En la Tabla 2.4 se presentan datos promedio sobre el contenido de sólidos totales de diversos desechos, y la cantidad de agua que hay que agregar por cada kilogramo fresco para obtener el 8 % de sólidos totales deseado, estos datos solo se dan como una guía, ya que la humedad contenida en un material depende de muchos factores externos, entre ellos la temperatura ambiente, las lluvias y el tiempo que lleva expuesto al aire.

Tabla 2.4 Datos promedio sobre el contenido de sólidos totales de diversos desechos (Santander, 1978)

Material	Sólidos totales (%)	Litros de agua por kilogramo de desecho para obtener 8% de sólidos totales (L/kg)
Heces humanas	17.0	1.1
Estiércol de vaca	20.0	1.5
Caballos, bueyes y mulas	25.0	2.1
Cerdos	18.0	1.3
Ovejas	32.0	3.0
Gallinas	44.0	4.5
Cáscara de cacahuate	96.6	11.1
Hojas secas	50.0	5.3
Paja de arroz	92.6	10.6
Rastrojo y hojas de maíz	77.0	8.6
Papel periódico	93.0	10.6

Para que se produzca el crecimiento y la actividad microbiana adecuadas, las células necesitan nutrientes. Los elementos que han de estar disponibles en el medio son carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales, ya que su ausencia o escasez pueden reducir la velocidad del proceso de degradación anaerobia. Toda materia

orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida; esta última es llamada sólidos totales. Experimentalmente se ha demostrado que una carga que contenga entre 7 y 9% de sólidos totales es óptima para la digestión (IIE, 1997).

Para calcular el volumen de agua que debe ser mezclada con la materia prima para dar la proporción deseada, es indispensable conocer el porcentaje de sólidos totales de ésta. En el estiércol de bovino fresco, que tiene de 17 a 20% de sólidos totales, se deberán agregar de 1 a 1.5 litros de agua por cada kilogramo de estiércol para así obtener una mezcla de alrededor del 8% de sólidos totales. La cantidad de sólidos se determina en laboratorios químicos con pruebas para la eliminación de agua contenida en la muestra.

f) Carga orgánica volumétrica

Se calcula la carga orgánica volumétrica como el total de materia seca (MS) o materia orgánica (MO) que se introduce diariamente en el digestor, en términos del volumen de su fase líquida, expresada en metros cúbicos. La MO o sólidos volátiles (SV) se refieren a la parte de la MO o sólidos totales (ST) que se volatilizan durante la incineración o reducción a cenizas de toda la materia orgánica. En teoría, la MO contiene todos los compuestos orgánicos que pueden convertirse en metano.

Normalmente, las excretas animales suelen tener una concentración de MS por encima del 10%. Puesto que los requerimientos de operación de un reactor anaerobio establecen que el contenido total de MS en la carga no puede exceder este valor de 10%, en muchos casos, los desperdicios de la granja deben diluirse antes de cargar el digestor (Loehr, 1974).

La producción de biogás se calcula referida al rendimiento de biogás generado por unidad de masa de MS o MO. Para la producción de biogás se requiere de un cierto rango de concentración de MS, que en la práctica es amplio, generalmente desde 1 hasta 30%. La producción de biogás depende también de la temperatura (Yongfu, 1989), como se observó en el apartado 2.3.2 inciso a).

g) Agitación o Mezclado

La generación de biogás depende totalmente de que las bacterias cumplan de forma óptima su ciclo biológico. Los microorganismos y la materia prima o sustrato deben estar en íntimo contacto, por lo que es necesario agitar el contenido interno del digestor.

Con plantas de gas operando a nivel mesófilico, la agitación requerida es muy leve siendo suficientemente la que provoca la carga diaria al entrar al digestor. En el caso de digestores que trabajan a nivel termofilico, la agitación requerida es continua para establecer un mejor contacto entre bacterias y sustrato, proporcionando además una temperatura interna más uniforme.

En la superficie de la mezcla se tiende a formar una “nata” debido al material fibroso no digerible, la cual se debe romper por medios mecánicos para que el biogás salga brevemente del seno de la mezcla (Fry, 1975).

Respecto a los tóxicos, dado que la degradación anaerobia tiene etapas desarrolladas por microorganismos estrictamente anaerobios, la primera sustancia que no debe existir es el oxígeno. Concentraciones elevadas de amoníaco, producidas por un exceso de nitrógeno en la biomasa también inhiben la digestión. Por su parte tanto el exceso de sales minerales como el de diversas sustancias orgánicas (pesticidas y detergentes) pueden inhibir el proceso.

Los beneficios de la degradación anaerobia son: a) El biogás, que puede utilizarse para producir energía; b) el fertilizante, que por sus características constituye un abono orgánico de calidad y c) el control de la contaminación que se origina por la descomposición espontánea e incontrolada de la materia orgánica (IIT, 1983).

Esta página se dejó en blanco intencionalmente



Capítulo 3

Digestores

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

3.1 Definición de un digestor

Un digestor es un tanque definido por el diseño de la planta en función de las variables del proceso, ambientales y de utilización del sistema. Se utilizan tanques cilíndricos, rectangulares, esféricos o semiesféricos, dependiendo de las preferencias del usuario y de las facilidades que se tengan para su construcción. Sin embargo, desde el punto de vista físico y del proceso no se recomienda emplear tanques rectangulares debido a que requieren mayor cantidad de materiales de construcción y crean dentro de la masa en digestión zonas de diferente composición y temperatura que impiden el mayor provecho del sistema (IIT, 1983).

Los residuos sólidos orgánicos, sean de origen urbano o rural al ser introducidos en el digestor son descompuestos por bacterias, en diferentes intervalos térmicos, de modo que se completa un ciclo natural y las basuras orgánicas se convierten en abono orgánico.

Las excretas contienen nutrientes que los cultivos pueden utilizar, pero también altas concentraciones de coliformes fecales que producen enfermedades infecciosas, capaces de causar la muerte en los humanos. Por ello, para utilizarlas como fertilizantes, es necesario darles un tratamiento que elimine estos agentes infecciosos. Una forma de hacerlo es mediante la digestión. Al usar un digestor se utilizan los nutrientes contenidos en las excretas y, además, se reduce la contaminación ambiental, ya que convierte las excretas que contienen microorganismos patógenos como bacterias, larvas y huevos en residuos útiles y sin riesgo de transmisión de enfermedades (McCaskey, 1990).

El uso de digestores es una alternativa para evitar la contaminación de suelos y corrientes de agua. Por otro lado, se evita la expulsión al aire del gas metano, considerado el principal componente de los gases de efecto invernadero y cuyo tratamiento adecuado es quemarlo o convertirlo en electricidad. El digestor es una forma económica y de fácil obtención de energía que tiene gran potencial para ser desarrollada y utilizada ampliamente.

Los materiales orgánicos que pueden tratarse mediante la digestión son mezclas de baja concentración de sólidos totales. Sólo una fracción de los sólidos totales son sólidos volátiles y son los que interesan para la degradación anaerobia.

Todo el tipo de estiércol es aprovechable en los digestores. Los más investigados han sido de ganado vacuno o porcino, siguiéndoles los de aves de corral, caballo y carneros. El estiércol de ganado vacuno es el más favorable, ya que una vaca excreta aproximadamente el 8% de su peso vivo al día, entre estiércol y orina, estando la mayor parte del primero triturado y semidigerido por microorganismos existentes en el rumen del animal. Por su parte, el estiércol de ganado porcino tiene un olor muy penetrante y posee una notable tendencia a bajar su nivel de pH durante el proceso de digestión (Concheiro, 1985).

3.2 Características del digestor convencional

La selección del digestor apropiado para un determinado tipo de influente, es un elemento clave en la estabilidad del proceso, por lo tanto es importante conocer los principios de operación de los digestores más representativos.

Para que un digestor de desechos orgánicos opere en forma correcta, deberá reunir las siguientes características (Mandujano, 1981):

- a) El digestor deberá ser hermético con el fin de evitar la entrada de aire, dado que interfiere con el proceso, y fugas del biogás producido
- b) El digestor deberá estar térmicamente aislado para evitar cambios bruscos de temperatura, lo que usualmente se consigue construyéndolos enterrados
- c) El digestor aún no siendo un recipiente de alta presión, el contenedor primario de gas deberá contar con una válvula de seguridad
- d) El digestor deberá contar con medios para efectuar la carga y descarga del sistema
- e) Los digestores deberán tener acceso para mantenimiento
- f) Se deberá contar con un medio para romper las natas que se forman

Según la forma de alimentación pueden distinguirse dos tipos diferentes de digestores: Intermitentes y continuos. Cuando la alimentación es intermitente el digestor se llena y se cierra. La producción de biogás se manifiesta algún tiempo después, alcanza un máximo y vuelve a declinar. Al llegar a una producción muy pequeña de biogás el digestor se destapa, se limpia y se cierra nuevamente para repetir el ciclo. Esto ocurre típicamente cada 3 ó 6 meses, aunque este tiempo puede reducirse drásticamente calentando y/o agitando el digestor. En los digestores de alimentación continua, una vez establecidas las condiciones normales de operación, la materia orgánica se alimenta diariamente (una o dos veces por día) de acuerdo al volumen del digestor y al tiempo de retención hidráulica de diseño. La alimentación máxima al digestor depende de la naturaleza del desecho y se determina experimentalmente (Concheiro, 1985).

Para llevar a cabo, la digestión o tratamiento anaerobio a nivel industrial y/o doméstico se han propuesto varios procesos con configuraciones que buscan optimizar el sistema. Tales configuraciones pueden ser agrupadas por la forma en que se encuentra la biomasa en su interior o bien por el grado de evolución tecnológica que presentan. En el primer caso se distinguen dos grandes bloques: Reactores con crecimiento celular en suspensión y reactores con biomasa fija (Castro-González, 1997).

La evolución de la tecnología anaerobia ha dado lugar a tres generaciones de reactores apreciables en la Figura 3.1. La primera generación, comprende procesos en donde la biomasa se encuentra en suspensión. En los de la segunda generación, los microorganismos son retenidos en el reactor, ya sea al suministrarle un soporte para que se adhieran en forma de biopelícula, o bien por medio de su sedimentación. Los reactores de la tercera generación, tienen también los microorganismos en forma de biopelícula, pero el soporte es fluidificado con altas velocidades de flujo. A continuación se describen los diferentes tipos de reactores existentes (Castro-González, 1997).

a) **Reactores anaerobios de la primera generación:** Los reactores anaerobios más primitivos son, por una parte la fosa séptica y, por otra parte, los digestores del tipo rural con alimentación semicontinua, de los que se tienen referencias desde el siglo pasado. Estos digestores son utilizados para la producción de biogás a partir de desechos agrícolas y ganaderos.

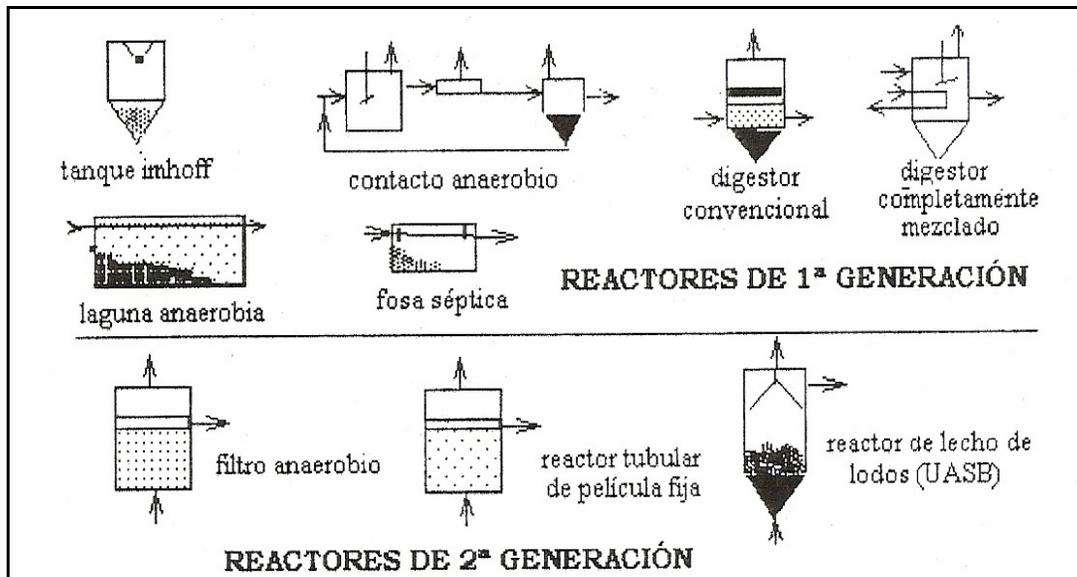


Figura 3.1 Esquema ilustrativo de los reactores anaerobios, 1ª y 2ª generación (Noyola, 1990)

a.1) **Digestores:** se clasifican en reactores de baja tasa, alta tasa y sistemas combinados.

Los *digestores de baja tasa* son los digestores convencionales, donde el lodo se efectúa en una sola fase, el espesamiento del lodo y la formación de sobrenadante se efectúa simultáneamente. En un proceso de fase única, se añade el lodo crudo en la zona en que el lodo se esté digiriendo activamente y liberando biogás. El lodo se calienta por medio de un intercambiador de calor exterior. Cuando el gas sube a la superficie, arrastra consigo partículas de lodo y de otras materias, tales como grasas y aceites. Dando lugar a la formación de una capa de espumas.

Los *digestores de tasa alta* tienen una carga de sólidos mayor. El lodo se mezcla íntimamente mediante recirculación del gas, bombeo o mezcladores con tubos de aspiración (no existe separación de espumas y capa sobrenadante), calentándose seguidamente para lograr rendimientos óptimos de digestión. A excepción de las cargas más elevadas y de un mejor mezclado, son pocas las diferencias existentes entre el digestor primario de un proceso convencional de dos fases y de un digestor de alta tasa. El equipo de mezclado deberá tener una mayor capacidad y llegar hasta el fondo del tanque; las tuberías del gas serán algo mayores, unas pocas salidas para la extracción del lodo sustituirán a las salidas del sobrenadante y, finalmente, el tanque será más profundo, para facilitar el proceso de mezclado que puede observarse en la Figura 3.2.

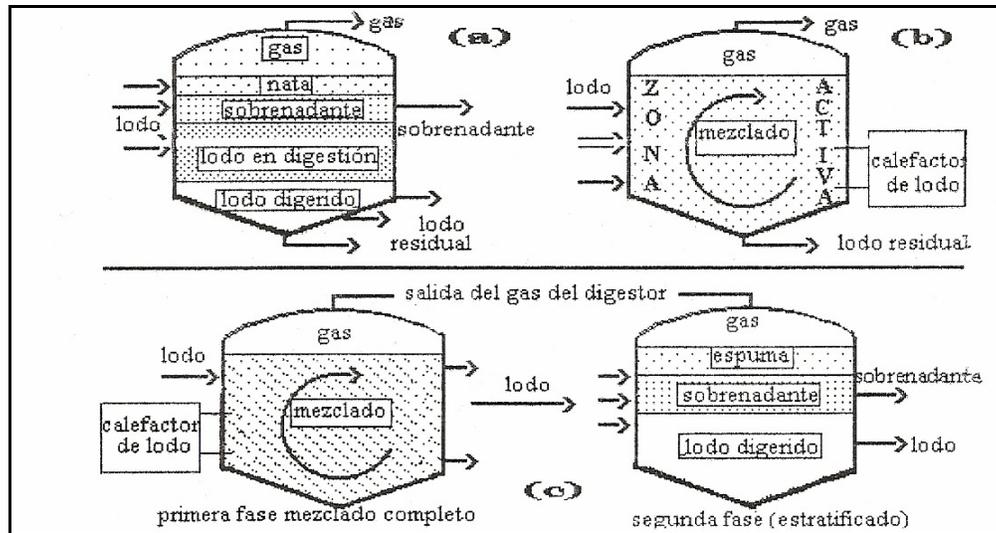


Figura 3.2 Digestores típicos: a) proceso convencional de fase única y baja tasa; b) proceso de fase única tanque de mezcla completa y de alta tasa; c) proceso de doble fase (Durán de Bazúa, 1993)

La *digestión combinada*, se trata de un sistema de dos fases, el primer tanque se utiliza para la digestión propiamente dicha. El tanque está calentado y equipado con medios de mezclado que consisten en uno o más de los dispositivos que son:

1. Bombas de recirculación de lodo
2. Recirculación de gas utilizando tubos cortos para mezclado, uno o más de aspiración profunda o difusores montados en el fondo del tanque
3. Mezcladores mecánicos con tubos de aspiración
4. Mezcladores de turbina y de hélice

El segundo tanque es para el almacenamiento y concentración del lodo digerido y para la formación de una capa de sobrenadante relativamente clarificado. Con frecuencia, los tanques se construyen idénticos, en cuyo caso cualquiera de ellos puede ser el primario. En otros casos, el segundo puede ser descubierto, sin calefacción o una laguna de lodos. Los tanques pueden tener cubiertas fijas o móviles. Por lo general, los tanques son circulares y raramente tienen diámetros menores a 6 m o mayores a 35 m. deberán tener una profundidad de agua no inferior a 7.5 m en el centro y pueden llegar a tener una profundidad de hasta 14 m o más. El fondo deberá ser inclinado hacia el punto de extracción situado en el centro, con una pendiente mínima de 1 (vertical) por 4 (horizontal).

b) **Reactores anaerobios de segunda generación:** El progreso logrado con este tipo de reactores se manifiesta en tiempos de residencia hidráulica substancialmente menores de 0.5 a 3 días, lo que implica una importante reducción de los volúmenes del reactor y una mayor estabilidad y facilidad en su operación. Esto se logra al retener la biomasa anaerobia dentro del reactor mediante la formación de una película de microorganismos fijos sobre soportes, o bien, por medio de la sedimentación de flóculos microbianos con muy buenas características de sedimentación. Con esto, la limitación provocada por la reducida tasa de crecimiento de las bacterias anaerobias es prácticamente eliminada. Otras ventajas obtenidas son un cierto grado de resistencia a productos tóxicos, una adaptación rápida a cambios en la alimentación y un arranque rápido después de periodos prolongados sin alimentación.

c) **Reactores anaerobios tercera generación:** Estos reactores se encuentran básicamente aún a nivel piloto o semi-industrial. Son también reactores de película fija, pero el soporte utilizado es lo suficientemente pequeño y ligero para que pueda ser fluidificado con recirculación del efluente (Durán de Bazúa, 1993). Los dos tipos de reactores, el reactor de lecho expandido y el reactor de lecho fluidificado, son semejantes entre sí, diferenciándose en el grado de fluidez del soporte (20% para el lecho expandido y superior al 50% para el lecho fluidificado). Su avance consiste en tiempos de residencia aún inferiores a 12 horas, ya que la superficie de soporte disponible es superior a $200\text{m}^2/\text{m}^3$ y la agitación en el lecho es vigorosa, eliminando los problemas de transferencia de sustrato. Otra ventaja es que no presentan problemas de taponamiento. Sin embargo, requieren energía para la recirculación y la fluidificación del lecho; además, su arranque y operación son en extremo delicados. Las cargas aplicadas pueden sobrepasar los $40\text{ kgDQO}/\text{m}^3\text{día}$ (DQO, demanda química de oxígeno), (Castro-González, 1997).

3.3 Digestores usados en zonas rurales

Los digestores pueden ser de varios tipos. En la Figura 3.3 se muestran algunos modelos y tipos de digestores que se utilizan para una pequeña producción de biogás, como es el caso de países en desarrollo donde se puede aprovechar los residuos de animales y cultivos apropiados para disponer de energía. Este concepto es muy aplicable,

especialmente en las zonas rurales o agropecuarias. Un número pequeño de ganado puede satisfacer las necesidades energéticas para cocina o iluminación de una granja, finca o comunidad rural o indígena. Las características así como ventajas y desventajas se desglosan en la Tabla 3.1.

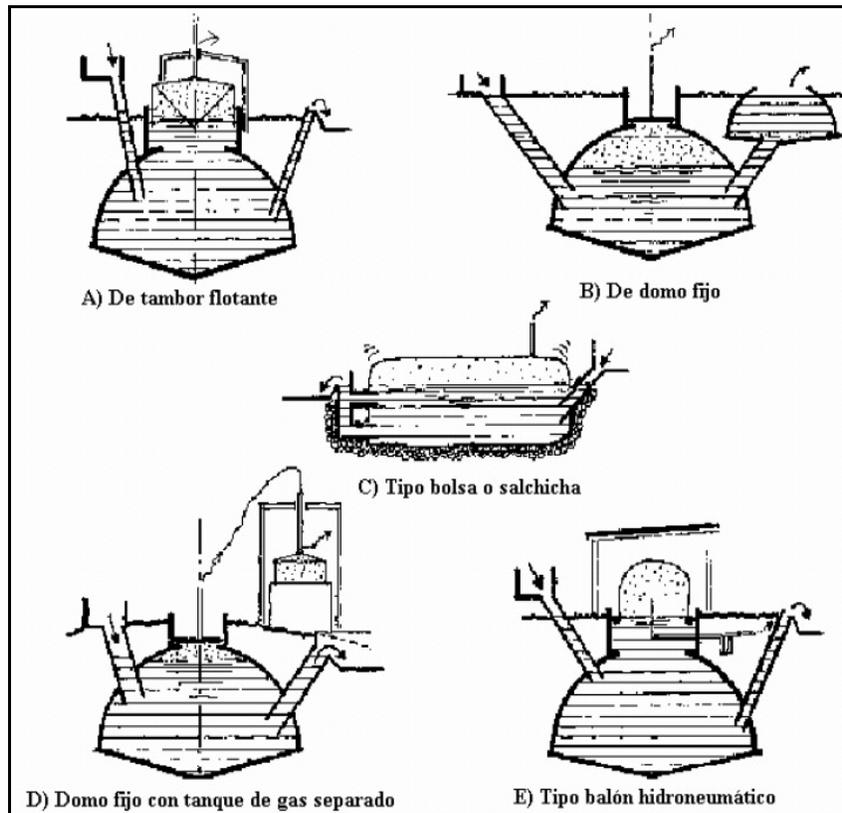


Figura 3.3 Tipos de digestores (Sánchez, 2003)

Los digestores pueden ser contruidos bajo tierra o sobre la superficie. En zonas frías es mejor hacerlo bajo tierra. Sobre la superficie, se puede construir bajo un invernadero o utilizar sistemas de calentamiento de tanque. Al hacerlo bajo tierra se evita daños por el ambiente o accidentes. El material de construcción es generalmente en ladrillo con cemento. Puede hacerse también en concreto pero su construcción es más complicada por la forma de vasija que tiene. Sistemas de más de 20 m³ de volumen prefieren hacerse en la superficie, en cajones de hormigón o en tanques de metal protegidos para la corrosión.

Tabla 3.1 Los tipos de digestores, características, ventajas y desventajas (Sánchez, 2003).

Digestor	Características	Ventajas	Desventajas
Balón hidráulico	<ul style="list-style-type: none"> • El gas se almacena en una bolsa de plástico o de polietileno sobre el digestor • También hay el digestor tipo salchicha que es un tubo de PVC 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo • Facilidad de transporte y construcción • Soporta altas temperaturas del digestor • Facilidad para la limpieza, vaciado y mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Corto periodo de vida (máximo 4 ó 5 años) • Susceptible al daño • No fomenta el empleo local
Domo fijo	<ul style="list-style-type: none"> • El tanque de gas es fijo sobre el digestor 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo de construcción • Construcción subterránea que ahorra espacio y protege de cambios de temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificultad en la presión del gas y hermeticidad de la unión • Presión de gas variable • Bajas temperaturas de digestión
Tambor flotante	<ul style="list-style-type: none"> • Tanque de gas que flota sobre otro de agua y puede ubicarse sobre el digestor o en otro lugar 	<ul style="list-style-type: none"> • Operación simple • Se puede ver el volumen del gas • Fácil construcción, mantenimiento y control 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo mayor por el tambor de metal • Sujeto a corrosión • Menor periodo de vida • Mayor mantenimiento

Los digestores en un régimen semi-continuo son más usados en el medio rural, cuando se trata de sistemas pequeños para uso doméstico. Los diseños más populares son el hindú y el chino.

- **Tipo Hindú:** existen varios diseños de estos digestores, pero en general son verticales y enterrados, semejando un pozo, se cargan por gravedad una vez al

día, con un volumen de mezcla que depende del tiempo de fermentación o del tiempo de retención y producen una cantidad diaria más o menos constante de biogás si se mantienen las condiciones de operación (Ram, 1975).

El gasómetro está integrado al sistema, o sea que en la parte superior del pozo flota una campana donde se almacena el gas, balanceada por contrapesos, y de ésta sale el gas para su uso. En ésta forma, la presión del gas sobre la superficie de la mezcla es muy baja, de menos de 20 cm de columna de agua (0.02 atm), lo que facilita su salida desde el seno de la misma. Además, la presión de utilización del biogás es constante, lo que permite una operación eficiente de los equipos que alimenta. Este tipo de digestor presenta una buena eficiencia de producción de biogás, generándose entre 0.5 y 1 volumen de gas por volumen de digestor.

- **Tipo Chino:** Los digestores de este tipo son tanques cilíndricos con el techo y el piso en forma de domo, y se construyen totalmente enterrados. En este tipo de digestores no existe gasómetro, almacenándose el biogás dentro del mismo sistema. A medida que aumenta el volumen del gas almacenado en el domo de la planta, aumenta su presión, forzando al líquido en los tubos de entrada y salida a subir, y llegándose a alcanzar presiones internas de hasta más de 100 cm de columna de agua (0.1 atm). A pesar de que este tipo de digestor es poco eficiente para generar biogás, es excelente en la producción de abono (Mandujano, 1981).

3.4 Digestores de polietileno de bajo costo

La introducción de digestores de plástico de bajo costo, basados en el uso de láminas de polietileno soldadas en forma tubular, ha puesto esta tecnología al alcance de un número mayor de usuarios, una ilustración de este tipo de digestores es la Figura 3.4. La simpleza del proceso de instalación ha facilitado la difusión de la tecnología de agricultor a agricultor. Avances recientes se han centrado en la integración del digestor dentro del sistema agrícola y han demostrado que el proceso de digestión produce mejoras importantes en el valor del estiércol de ganado como fertilizante para los cultivos, como también para las plantas acuáticas o los peces cultivados en estanques.

El digestor de polietileno es una tecnología muy económica, que permite a los agricultores de pequeña escala producir gas. Es atractiva para los habitantes del campo debido a su bajo costo de instalación y, por lo tanto, también del gas, así como a la mejora en la calidad del ambiente que resulta de su uso. Sin embargo, en el efluente se pierde continuamente una cierta cantidad de biomasa bacteriana. Esto implica que una parte del residuo es utilizada por la síntesis de nuevas bacterias, disminuyendo la cantidad de materia orgánica que es convertida en biogás. Puede ser utilizado en zonas rurales o urbanas, tanto en lugares planos por donde el paisaje es accidentado. Ya no es necesario obtener subsidios para la compra de los materiales de construcción, pues éstos pueden ser adquiridos en la mayoría de ciudades de los países en vías de desarrollo.

Un componente esencial del digestor de polietileno es la instalación de un tanque para gas, de preferencia sobre el techo de la cocina, lo más cerca posible al fogón donde se utilizará el gas. Esto se debe a que la presión del gas en el digestor es muy baja, y si el tanque está ubicado a mucha distancia de la cocina, la velocidad del flujo de gas a lo largo de la tubería será demasiado lenta y no alcanzará para mantener la llama en el fogón. Tener el tanque cerca del punto donde el gas será utilizado permite reducir al mínimo las pérdidas por fricción. Cuando se necesita mayor presión de gas es fácil pasar una faja alrededor del tanque para aumentarla.



Figura 3.4 Digestor de polietileno (Preston, 2005)

La naturaleza relativamente frágil de las láminas de polietileno es un punto débil del sistema y su modo de operación es relativamente ineficiente si se compara con el de otros digestores más sofisticados. Sin embargo, también en comparación con otros

sistemas, el precio de construcción del digestor de polietileno es muy bajo, como son los requerimientos de habilidades necesarias para construirlo. El precio de la manga de polietileno está alrededor de 10 dólares (Preston, 2005).

El digestor de polietileno esta constituido por 2 ó 3 largas mangas de plástico, el largo depende de la capacidad de sustrato a digerir, éstas van encajadas una dentro de la otra, con los extremos envueltos alrededor de dos tubos que se utilizarán para la carga y descarga diaria del sustrato. En la parte superior de la manga se abrirá una válvula para la salida del biogás producido.

Se debe identificar la ubicación más adecuada para la implementación del digestor, este deberá estar cerca de la disposición del excremento, de tal forma que puedan ser escurridos con agua y luego por gravedad hasta la entrada del digestor. Hay que controlar que en el sitio escogido no se acumule agua en los días de lluvia. Cuando grandes cantidades de agua entran en el suelo alrededor del digestor se debilita el suelo, y las paredes de la fosa podrían perder estabilidad, además la lluvia enfría el sustrato dentro del digestor, causando una disminución en al producción de biogás. Si el área circundante es muy sombreada entonces la temperatura del terreno será generalmente baja lo que conduce también a una disminución en la producción de biogás. Parte del volumen es ocupado por el fluido en digestión mientras en la parte superior del digestor se acumula el biogás producido y se puede instalar un gasómetro. Es posible aprovechar hasta el 90% del volumen total del digestor para la digestión de la mezcla.

La bolsa de polietileno necesita una estructura que la contenga y la proteja, por lo que se excava una fosa adaptada a las dimensiones del digestor. Es importante considerar que los lados y el piso deben ser lisos, sin piedras o raíces que sobresalgan y puedan dañar la lámina de polietileno. Los lados deberán ser inclinados para evitar que la zanja se colapse. El suelo deberá tener una ligera pendiente alrededor del 2% para permitir el flujo continuo del estiércol líquido a lo largo del digestor. En la Figura 3.5 se muestra el esquema de cómo deberá ser excavada la fosa, presentado los espacios que deberá ocupar la tubería de carga y descarga. Para las tuberías se abren dos pequeñas zanjas a partir de la mitad de la pared, con una inclinación aproximadamente de 45°.

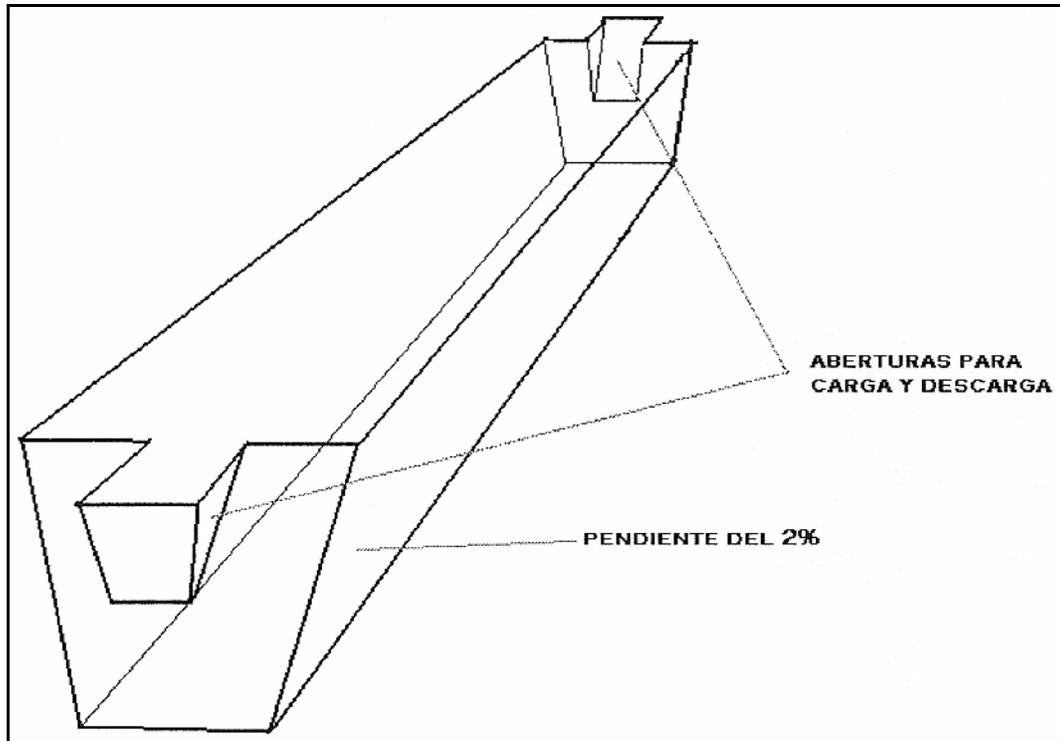


Figura 3.5 Esquema de una fosa para un digestor de polietileno (Poggio, 2007)

Comercialmente se encuentran mangas de polietileno de diferentes anchos, dando diferentes diámetros de la bolsa para el digestor. En el mercado las mangas están comercializadas con ancho de 60 cm, 1 m, 1.5 m, 2 m, que corresponden a diámetros de 38.2 cm, 63.7 cm, 95.5 cm, 1.27 m. Para escoger el tipo de manga de polietileno se debe obtener una relación entre el largo y diámetro del digestor que sea entre 5:1 y 10:1. La proporción para determinar la altura es de 2:1 con respecto al ancho del digestor.

La vida útil del digestor de polietileno coincide con la durabilidad de la película plástica. Sencillamente se puede decir que con el tiempo, las características mecánicas de la película plástica disminuyen, hasta que, literalmente, el plástico “se hace tiras”. Cualquier tipo de manutención es entonces insuficiente y hace falta proceder a la sustitución de la manga. Otros eventos accidentales pueden abreviar aún más la durabilidad del polietileno como la caída de objetos, rupturas causadas por animales, entre otros, justificando la necesidad de una protección eficiente del digestor. La vida útil del digestor de polietileno es entonces determinada por los siguientes factores (Luostarinen, 2005):

- Las características químicas, tipo de polímero, aditivos contenidos y grosor de la película plástica
- El número de capas de plástico con las cuales se realiza el digestor de polietileno. Generalmente se utilizan de 2 a 3 mangas insertadas una dentro de la otra. Un mayor número de capas no aumenta proporcionalmente la vida del digestor, y se considera una solución vana
- Las condiciones ambientales: Temperatura, radiación solar, humedad, viento, lluvia y granizado.
- La protección del digestor de polietileno de otros agentes externos: animales, rocas y piedras
- La recolección y separación de la alimentación de ramas, piedras, y otros materiales puntiagudos contenidos en el influente que pueden dañar el plástico desde el interior

Dado los factores anteriores, se estima que el digestor de polietileno tiene una vida útil de hasta cinco años; los digestores construidos con paredes en ladrillos y hormigón pueden alcanzar los 15 a 20 años, con una adecuada construcción y manutención. La sustitución del plástico permite seguir utilizando el resto de la instalación (Foo, 2001).

3.5 Costos de construcción

En la actualidad, por el desarrollo creciente de la industria, se han incrementado las exigencias en las instalaciones de servicio, las necesidades de combustibles en los medios de transporte y otros aspectos de necesidades sociales, que han puesto en evidencia que debe darse una respuesta adecuada a los requerimientos energéticos que se exigen.

Los principales factores que fijan el costo de un digestor son la tasa de producción y calidad del biogás y lodos, y el tiempo de retención de la mezcla en el interior del digestor.

Los digestores intermitentes suelen requerir una inversión bastante menor que los de alimentación continua, pero su eficiencia de conversión es menor y su tiempo de retención bastante mayor que los de éstos últimos (Concheiro, 1985).

Los costos de inversión varían entre un digestor y otro. A continuación se determinan los costos fijos y variables de un digestor en su operación e implementación.

Costos variables: Se refieren al tipo de digestor, tipo de sustrato, sistema de calefacción, sistemas de agitación, tratamiento de los efluentes e influentes, sistema de eliminación de H₂S, entre otros.

Costos fijos: Se refieren a la obra civil, técnicas de tratamientos de los sustratos, gastos de planificación y sistemas para calefacción.

De acuerdo con un estudio estadístico efectuado en Alemania en el año 1997 por la Asociación de Biogás de dicho país, se determinó de manera porcentual el costo de inversión en función a 100 digestores de diferente tamaño como se observa en la Figura 3.6. Lo cual nos ofrece una visión general de los costos de construcción en un digestor.

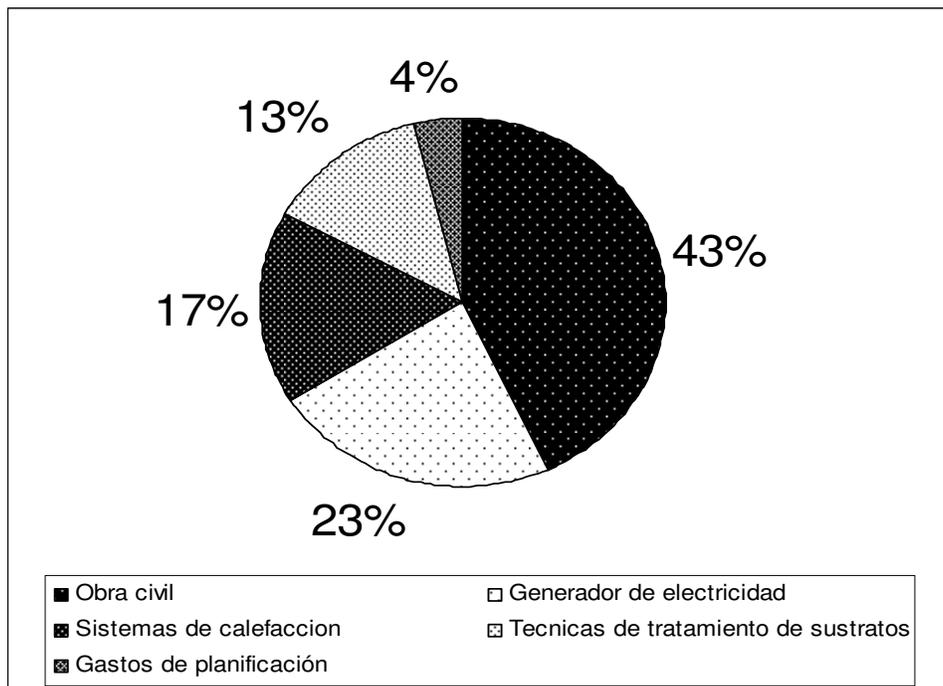


Figura 3.6 Rubro de gastos de inversión para la construcción de un digestor (Infantes, 2006)

3.6 Costo de generación de energía

De acuerdo con el balance nacional de energía, en México el costo de producción de energía eléctrica es de 0.04 a 0.06 dls/kWh, lo cual es un costo competitivo comparado con el del combustóleo que es de 0.0452 dls/kWh.

La generación de biogás a partir de residuos sólidos municipales, es factible. En el país se producen 90 mil toneladas diarias, las cuales podrían soportar una capacidad de generación aproximada de 850 MW. La producción de biogás con desechos animales y agua residual también es viable a pequeña y gran escala, con apoyo del Mecanismo de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kyoto.

Para la agroindustria, tenemos que si la industria cañera modernizase sus instalaciones de generación de vapor y energía eléctrica, podría disponer de excedentes de capacidad del orden de 1,000 MW. La energía así producida sería de bajo costo, del orden de 2 dls/kWh los bajos costos del combustible.

Entre las acciones que contempla México para la reducción de los gases responsables del cambio climático se encuentra el empleo de fuentes renovables de energía. En donde, el empleo de la biomasa proveniente de la actividad agropecuaria, tanto de cultivos desarrollados para este fin como de los residuos, es una de las alternativas que México requiere. Existen diversas disposiciones normativas relacionadas con la generación de energía, pero éstas resultan insuficientes para la promoción y desarrollo de los bioenergéticos provenientes de la biomasa. Adicionalmente, México tiene un enorme potencial energético para la producción de la energía renovable.

El uso apropiado de la biomasa como fuente de energía ofrece las posibilidades de mejorar las economías rurales, reduciendo costos por insumo de energéticos, con la posibilidad de que lleguen a ser auto-suficientes energéticamente, y habilitar opciones alternativas de ingreso económico al vender sus excedentes energéticos (electricidad, residuos forestales o agrícolas, carbón o hidrocarburos). Además, de hacer frente a la liberación comercial y una aparente desventaja, convertirlo en una fortaleza de manera proactiva, que permita generar opciones para el mercado internacional.

Esta página se dejó en blanco intencionalmente



Capítulo 4

Productos de la digestión

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

4.1 Biogás

El metano es un gas combustible, incoloro, inodoro, cuya combustión produce una llama azul y productos no contaminantes. El metano es el principal constituyente del gas natural en un 90 % y un 60% en el biogás.

El biogás es uno de los productos de la digestión, constituido por una mezcla de gases cuyos principales componentes son el metano, el dióxido de carbono. El biogás se produce como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire, por la acción de un grupo de microorganismos, como se describió en el apartado 2.3.

En la naturaleza se encuentra una gran variedad de residuos orgánicos a partir de los cuales puede obtenerse biogás, como los desechos provenientes de animales domésticos como vacas, cerdos y aves, excretas humanas, residuos vegetales como paja, pastos y hojas secas y basuras domésticas (Mandujano, 1981).

Los residuos orgánicos están constituidos por carbohidratos, lípidos (grasas) y proteínas. Dependiendo del peso molecular de cada compuesto o sustancia, se puede estimar la producción máxima de metano y dióxido de carbono por la siguiente relación:



donde:

$$x = 1/8 (4c+h-2o-3n-2s)$$

$$y = 1/4 (4c-h-2o+3n+2s)$$

La producción específica de biogás de los residuos orgánicos y su porcentaje de metano en el biogás esperado se muestra en la Tabla 4.1

La composición de biogás depende del tipo de desecho utilizado y las condiciones en que se procesa. En promedio su composición es la que se observa en la Tabla 4.2 en rangos porcentuales.

Tabla 4.1 Producción específica de biogás (Sánchez, 2003)

Residuo orgánico	Producción específica de biogás [l/kg]	Contenido proporcional en el biogás [%]	
		CH ₄	CO ₂
Carbohidratos	790	50	50
Lípidos	1,250	68	32
Proteínas	700	71	29

Tabla 4.2 Composición promedio del biogás (Mandujano, 1981)

Gas	Fórmula química	[%]
Metano	CH ₄	54 a 70
Dióxido de Carbono	CO ₂	27 a 45
Hidrógeno	H ₂	1 a 10
Nitrógeno	N ₂	0.5 a 3
Acido sulfhídrico	H ₂ S	.01

Se le conoce también como “gas de granja”, ya que son residuos gaseosos generalmente encontrados en el estiércol de los animales, desperdicios agrícolas, paja y otros tipos de plantas en descomposición. Su característica es el gran porcentaje de gas metano que contiene entre 50 y 70%, lo que le otorga importante rendimiento calorífico (apartado 4.2). Su peso específico es de 0.86, en consecuencia es más liviano que el aire. Contiene además, otros gases como el hidrógeno, oxígeno, dióxido de carbono y vestigios de anhídrido sulfuroso (Mandujano, 1981).

En el año 1667, por haber sido hallado imprevistamente en zonas pantanosas, Shirley lo denominó “gas de los pantanos” y en 1776, Volta descubrió por primera vez metano en el gas resultante de la descomposición de vegetales en “atmósferas confinadas”. A partir de estos antecedentes, diversos investigadores llegaron a demostrar que después de la muerte del vegetal y reunida las condiciones, la fermentación anaerobia descompone la celulosa, produciendo metano.

Simultáneamente, otros investigadores estudiaban el proceso de fermentación partiendo del estiércol y diversas mezclas, proceso del cual se obtenía un gas combustible con importante contenido de metano. En el siglo XVII, se descubren las propiedades combustibles del gas de los pantanos, al cual denominan entonces “aire inflamable”.

En 1920, Karl Imhoff consigue proponer un sistema de fabricación de gas metano en forma continua, al introducir periódicamente una determinada cantidad de sustancias orgánicas en una masa de fermentación anaerobia.

A partir de esta operación, se comprueba que el ciclo para el comienzo de la producción de gas metano se cumple en aproximadamente ocho días, tiempo en el cual comienza el burbujeo en la mezcla de fermentación, desprendiéndose el gas, que va acumulando en un recipiente o campana. La presión va elevándose a medida que aumenta la cantidad de gas bruto producido. La presión que llega a obtenerse es de 75 a 150 mm de columna de agua (de 7.5×10^{-6} a 1.5×10^{-5} atm.), presión adecuada para su uso directo en artefactos como cocinas o lámparas de alumbrado. La cama de residuos líquidos y sólidos sobrantes de la operación es un excelente fertilizante que se aplica directamente como abono sobre el terreno.

Los sistemas para la obtención de biogás toman importante difusión en Europa durante la Segunda Guerra Mundial, especialmente en Francia e Italia, aunque las instalaciones de estas características ya funcionaban en París, Estambul, Munich y Zurich, ya se había adoptado en Estados Unidos y otros países.

La India dispone desde 1939, de una estación experimental exclusivamente dedicada a estudiar diseños de digestores, gasómetros y artefactos para uso de biogás, además del ensayo de distintas materias orgánicas que aumentan la eficiencia y el rendimiento de los sistemas tanto en climas cálidos como fríos. China es el país donde más se ha avanzado en la implementación práctica de los digestores rurales, donde existen ya más de siete millones en funcionamiento.

En Canadá, Francia y Alemania así como también en Australia, se experimentan nuevos diseños y materiales para el diseño de plantas, al par que se profundizan las investigaciones de los aspectos microbiológicos, con miras de optimizar los procesos y

la obtención de nuevas cepas que aceleren la fermentación metanogénica y reduzcan el tiempo de retención dentro del digestor, así como también que no requieran de temperaturas elevadas para desarrollar plena actividad.

En caso de la fermentación anaerobia mesofílica es necesario incrementar, en los climas desfavorables, la temperatura del digestor hasta los 35° C, considerada óptima para una mayor producción de biogás. Sin duda, la producción de biogás es mayor a mayor temperatura, pero ello requiere provisión adicional de energía externa. Cuando son grandes los volúmenes diarios de residuos, se tiene que reducir el tiempo de retención en el proceso de fermentación, aumentando la temperatura (Modificado de Lemme, 1985).

El biogás posee naturalmente un olor característico que lo identifica respecto a los demás gases y pone en evidencia su existencia en casos de escape del mismo; en consecuencia no necesita ser odorizado. Este gas puede ser utilizado en artefactos a gas y en motores de combustión interna utilizables como bombas o generadores de electricidad.

4.2 Caracterización del biogás

Poder calorífico

El poder calorífico varía dependiendo del tipo de proceso en el cual se realiza la combustión. Se han definido dos tipos de poderes caloríficos: El poder calorífico superior, que incluye el calor latente de vaporización del agua producida por la combustión y el inferior, en el cual el agua producida por la combustión se encuentra en forma de vapor. Si la composición de la mezcla es conocida, tanto la energía superior e inferior desprendidas en aire son calculadas a condiciones normales de 15 °C y 1 bar (Melvin, 1988).

El poder calorífico del biogás es de 5500 kcal/m³, es decir, 1 m³ de biogás puede reemplazar 0.46 kg de gas propano, 0.71kg de gasolina, ó 3 kg de leña, todo esto dependiendo del porcentaje de metano existente en el gas. El poder calorífico

aprovechable depende del rendimiento de los quemadores o de los aparatos. Se debe tener especial cuidado con el ácido sulfhídrico del biogás, ya que ocasiona corrosión prematura en los equipos, por esta razón es necesario colocar trampas en las líneas de transporte del biogás (Cofré, 2001). En la Tabla 4.3 se presenta una comparación del poder calorífico del biogás con otros combustibles.

Tabla 4.3 Combustibles típicos y su poder calorífico (SEC, 2003)

Combustible	Poder calorífico	
	Inferior	Superior
Petróleo	10,000 kcal/kg	10,500 kcal/kg
	8,850 kcal/l	9,293 kcal/l
Gas Natural	8,300 kcal/m ³	9,300 kcal/m ³
Gas licuado	10,950 kcal/kg	11,951 kcal/kg
Leña seca	4,600 kcal/kg	5,200 kcal/kg
Biogás	5,5000 kcal/m ³	6,000 kcal/m ³

El biogás es un poco más liviano que el aire y posee una temperatura de inflamación de alrededor de 700 °C a diferencia del diesel de 350 °C y la gasolina y propano alrededor de 500 °C. La temperatura de la llama del biogás alcanza 870 °C (Chynoweth, 2002).

Toxicidad y corrosividad

Uno de los elementos tóxicos del biogás es el H₂S y puede ser identificado por su olor característico a huevo podrido, aún a bajas concentraciones. Una larga exposición a éste puede bloquear el sentido del olfato, hecho que puede hacer creer en la dispersión del gas y exponerse aún más con las posibles consecuencias mostradas en la Tabla 4.4 (Craig, 1993).

Si bien el H₂S reacciona fácilmente con algunos metales (principalmente con las aleaciones de cobre) en combinación con agua se incrementa su actividad corrosiva, que depende de la concentración del H₂S y del pH de la solución. Los daños que puede ocasionar esta solución van desde el desprendimiento local de campanas de material

superficial hasta la horadación pasando por fracturas y ampollas. De igual forma, el CO₂ en combinación con agua forma soluciones de ácido carbónico altamente corrosivas, aún más que las formadas con H₂S. La actividad corrosiva de soluciones H₂O-CO₂, dependen de la presión parcial del CO₂ y de la temperatura. Los daños ocasionados por el ácido carbónico pueden ser un ataque puntual, un adelgazamiento uniforme de la superficie o la formación de una capa semiprotectora de carbonato de hierro (FeCO₃), a altas concentraciones de CO₂ y altas temperaturas (Lopez, 1996).

Tabla 4.4 Efectos fisiológicos* en personas expuestas a H₂S (Craig, 1993)

H ₂ S ppm	Posible efecto
50-100	Nulo, irritación media a los 30 min.
100-150	A los 2 min. pérdida del olfato, irritación de ojos y garganta a la primera hora, hemorragias y muerte después de 8 horas.
150-200	Irritación de ojos y garganta dentro de la primera hora, hemorragias y muerte a las 8 horas.
250-350	Dolor al llorar en 1 hora, dificultad para respirar a las 4 horas, hemorragias y muerte antes de las 8 horas.
350-450	Inconciencia a las 4 horas con posible deceso pasando las 4 horas.
500-600	A la hora, dolores severos en ojos y cabeza, inconciencia, temblor en el cuerpo y muerte.
600-1500	A los 15 min. colapso, inconciencia y muerte.

*El tiempo de exposición y la concentración varían de persona a persona

4.3 Purificación del biogás

El biogás debe ser purificado antes de ser usado. Dentro de la composición del biogás existen gases que pueden ocasionar efectos adversos tales como: CO₂, H₂S y el vapor de agua presentes en la aplicación directa del biogás como fue descrito en el apartado anterior. La reducción o eliminación total de los elementos gases anteriores hará que las cualidades del biogás como combustible sustituto y renovable sean más atractivas. Para remover dichos gases el biogás puede ser tratado con diferentes procesos físicos, biológicos, químicos y mixtos que se detallan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Procesos para purificación de biogás

Proceso	Descripción	Referencia
Absorción física	El elemento gaseoso a remover es disuelto en el solvente, con la posibilidad de ser separado posteriormente para que el solvente sea reciclado en el proceso.	Hines y Maddox, 1987
Absorción química	Para la fijación del soluto en el solvente es necesario que el soluto reaccione químicamente con el solvente	Hines y Maddox, 1987
Adsorción física	Es cuando la adherencia se lleva a cabo por medio de fuerzas de Van der Waals, durante la cual se libera una cantidad de calor de magnitud aproximada al de condensación.	Walley, 1987
Separación por medio de membranas	Separación de los gases que componen una mezcla por medio de una membrana de polímeros porosos o fibras que tienen la capacidad de transportar selectivamente a algunos componentes a través de ellas.	Stookey y col., 1984
Condensación	Es el paso de la fase vapor a la líquida de un determinado elemento, por la disminución de su temperatura. Este proceso extrae el vapor de agua del biogás.	Stookey y col., 1984
Remoción biológica	Existen bacterias capaces de oxidar el H ₂ S. Las bacterias precipitan el H ₂ S en azufre elemental y otros compuestos menos dañinos.	Zhuang y col., 1994

Remoción del vapor de agua por trampas de condensación

En este proceso se aprovecha el efecto Joule-Thomson, al pasar el biogás por una cámara de expansión colocada en las líneas de colección y distribución del biogás. Al disminuir la temperatura, el vapor de agua se condensa y es colectada en la cámara para posteriormente ser drenada. La misma línea de colección del biogás puede inducir la

condensación del vapor de agua en puntos bajos de las líneas, si éstas se encuentran a temperaturas inferiores a la del rocío o de saturación del biogás, por lo que una válvula de drenado en esos puntos será suficiente, lo anterior es ilustrado en la Figura 4.1.

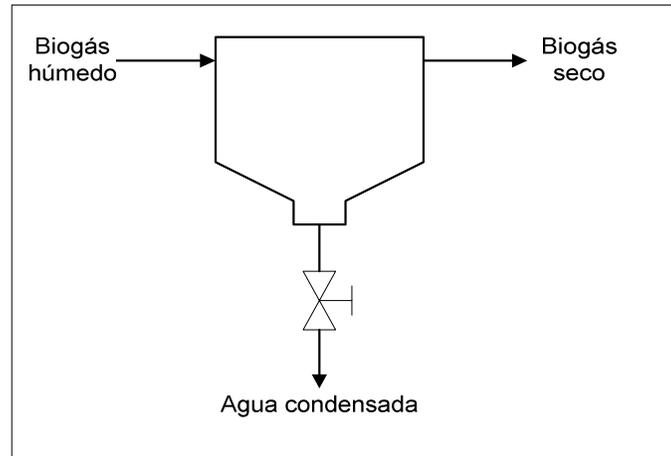


Figura 4.1 Trampa de condensación para vapor de agua (López, 1996)

Remoción del CO₂

El porcentaje de CO₂ presente en el biogás va a depender de múltiples factores, como las características del influente a digerir, el tipo de digester empleado, la estabilidad del digester y las condiciones de operación. Por ejemplo, se sabe que la solubilidad del CO₂ en agua aumenta cuando se incrementa la presión, de modo que si se recircula el biogás producido al substrato en digestión, se podrá obtener un biogás rico en CH₄ (Vesilind, 1981). Para el caso en que el CO₂ deba reducirse o eliminarse, se pueden emplear los procesos siguientes:

- **Absorción química:** Puede llevarse a cabo con solventes sólidos o líquidos. Dentro de los sólidos el más utilizado es la cal viva sin embargo, se requieren grandes cantidades y genera problemas de disposición de productos secundarios. Con respecto a los solventes líquidos, las soluciones más empleadas son las de NaOH, KOH, Ca(OH)₂, Na₂CO₃ y K₂CO₃. El agua puede absorber físicamente tanto al CO₂ como al H₂S. Sin embargo se requieren grandes cantidades, aún incrementando la solubilidad del CO₂, cuando se aumenta la presión de

alimentación del biogás en la columna de absorción (Almanza R. y Muñoz F., 1981).

- **Absorción:** Es llevada a cabo introduciendo el biogás en fibras moleculares, hechas de adsorbentes como carbón ó zeolita natural caracterizadas por una estructura porosa tal, que permite entrar solo ciertas moléculas, dependiendo de su tamaño, forma y polaridad (Richter y col., 1985).
- **Separación por medio de membranas:** Son capas extremadamente delgadas de polímeros como el acetato de celulosa o polisulfonato, dispuestas en dos modos:
1) Una capa, o más, enrolladas en un tubo en cuyo interior fluyen los gases permeables, y varias membranas atadas paralelamente por los extremos y 2) El segundo caso las membranas están hechas por dos capas de otro tipo de membranas de menor capacidad de separación, 10 a 20 veces más delgadas que la capa principal, además de incrementar la razón de flujo a través de la membrana, las capas secundarias protegen a la fibra de la abrasión y del manejo normal. El biogás es alimentado por el lado de la coraza a elevadas presiones de tal manera que fluya sobre la superficie de las membranas, para que de ésta manera los gases reaccionen ante la presión diferencial parcial entre el exterior y el interior de la membrana, permeándola y fluyendo a través de ella, por el lado de los tubos (Parkinson, 1984).

Remoción del H₂S

La concentración del H₂S varía mucho, dependiendo de la cantidad de sulfatos en el sustrato a digerir y de la estabilidad del digestor. Las concentraciones no se detectan al inicio de operación del digestor, pero en cuanto se estabiliza, la concentración alcanza un nivel máximo y después disminuye hasta su nivel mínimo, permaneciendo ahí mientras el digestor opere establemente. A diferencia de los gases anteriores, el H₂S, tiene que ser reducido lo más que se pueda, no por que afecte las propiedades reactivas del metano, sino por que sí solo es altamente corrosivo aún a las bajas concentraciones en las que se encuentra en el biogás. Además de que los productos de la combustión del H₂S son altamente tóxicos y corrosivos (SO₂ y H₂SO₄). Entre los procesos de que se dispone para su reducción o eliminación total se encuentran los siguientes:

- **Adsorción:** El H_2S es probablemente adsorbido en carbón activado. Sin embargo, la presencia de O_2 da paso a una oxidación catalítica produciendo azufre y vapor de agua por lo que se requiere pequeñas cantidades de O_2 para tener altas eficiencias de remoción, generalmente este elemento se encuentra presente en el biogás.
- **Absorción:** El método mas simple y económico para la remoción selectiva del H_2S por absorción química, es hacer pasar al biogás a través de una esponja porosa, constituida por óxido férrico, aserrín burdo y agua confinada en un recipiente y su regeneración se logra exponiéndola al aire (Jensen, 1985).

4.4 Purificación de biogás en instalaciones rurales

La purificación, en los casos en que el uso se reduce a calefacción, alumbrado o cocción de alimentos, tiene por objeto eliminar o disminuir el contenido de ácido sulfhídrico para proteger de la corrosión los equipos, y a la reducción del contenido de agua presente en el gas como resultado del proceso de digestión. En la Figura 4.2 se muestra una idea aproximada de los accesorios para realizar estas operaciones y de su colocación en la línea.

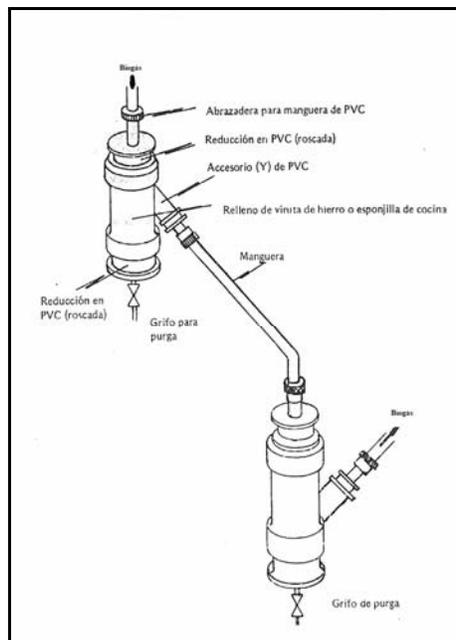


Figura 4.2 Accesorios para la purificación del gas (IIT, 1983)

Trampas de ácido sulfhídrico

Están constituidas por un recipiente relleno con material de hierro finamente dividido formando un lecho poroso a través del cual debe circular el gas para que reaccione con el metal y se deposite en un lecho.

La condición de porosidad se alcanza utilizando como relleno virutas de hierro o esponjillas de cocina de marca comercial. Estos materiales tienen la ventaja de ser de bajo costo y de oponer poca resistencia al flujo de gas lo cual es un aspecto importante en razón de las bajas presiones que se manejan en este tipo de sistemas.

La trampa de ácido sulfhídrico actúa también como trampa de llama no sólo por la presencia del relleno sino por el mayor diámetro del recipiente con relación a la línea de conducción.

La forma del recipiente y las características del material utilizado para su construcción dependen del propietario de la planta. El único requisito es el que sea completamente hermético para evitar fugas de gas. Así, es posible encontrar en plantas en operación, trampas como las siguientes (IIT, 1983):

- Rectangulares de en hierro o acero, pintadas con el mismo material empleado en el endurecimiento y protección de la campana.
- Cilíndricas de acero que se construyen a partir de secciones de tubería estándar de 2" o más. Al igual que las anteriores, requieren de pintura para protegerlas de la corrosión.
- Cilíndricas de PVC que se construyen a partir de tubería estándar o se arman utilizando accesorios en "Y" de PVC disponibles en el mercado. No requieren pintura protectora pero deben en lo posible no exponerse a los rayos del sol.

Trampas para vapor de agua

El agua arrastrada por el gas se separa cuando la corriente se encuentra en su trayectoria una expansión brusca y una contracción posterior. Para lograr este propósito será suficiente instalar sobre la línea un accesorio idéntico a las trampas de ácido sulfhídrico,

con la diferencia de que no se necesitará el relleno de material de hierro. Las trampas están provistas de un grifo de purga por donde se debe evacuar periódicamente el agua depositada en el fondo.

4.5 Usos del biogás

El biogás puede tener dos usos:

- a) Para calentamiento, en sustitución de leña o del gas licuado de petróleo (LP).
- b) Como combustible para motores de combustión interna.

El biogás puede usarse directamente en quemadores, como por ejemplo en estufas, lámparas y refrigeradores o bien puede ser utilizado como combustible en máquinas de combustión interna.

Si el biogás se va a quemar directamente, sólo es necesario eliminar las gotas de agua en suspensión que son arrastradas por el gas al salir del digestor, evitando así la obstrucción de las tuberías en las que se maneja el biogás. Una forma de eliminar esta agua es haciendo pasar el gas a través de un separador de líquidos, que consiste básicamente en un recipiente que guarda una temperatura más baja que el biogás, para condensar el vapor de agua y atraparlo.

Si el gas va a ser usado como combustible en un motor de combustión interna, es necesario eliminar las trazas de ácido sulfhídrico (H_2S). Para quitar esta impureza se hace pasar el biogás a través de una trampa de limadura de hierro, mediante la cual quedan eliminadas las trazas de H_2S . La limadura de hierro se regenera periódicamente por una simple exposición de aire durante 3 ó 4 días.

La utilización del biogás en equipos comerciales requiere de adaptaciones sencillas para quemarlo eficientemente. En general los quemadores diseñados para gas LP se adaptan utilizando espreas de mayor tamaño y distintos ajustes de aire primario.

Para la adaptación de motores de combustión interna, se puede optar por la modificación del carburador de gasolina o bien usar un carburador especial para gas. En el caso de los motores diesel, lo que se hace es operarlos en forma dual (85% de biogás y 15% de diesel), para prevenir los daños en los inyectores (IIE, 1979).

El biogás, con su alto contenido de metano, es una fuente de energía que puede usarse para cocinar, iluminar, generar calor, operar maquinaria agrícola, bombear agua o generar energía eléctrica. En la Tabla 4.6 se presentan sus equivalentes con otros combustibles.

Tabla 4.6 Equivalencia de biogás con otros combustibles (Lemme, 1985)

Biogás*	Estado bruto 5,500 kcal/m ³	Depurado 8,500 kcal/m ³
Nafta	0.730 l	1,100 l
Alcohol	1.100 l	1,700 l
Gasoil	0.650 l	1,000 l
Gas natural	0.620 l	0.950 l
Carbón mineral	0.820 kg	1.250 kg
Carbón vegetal	1.240 kg	1.900 kg

*Desde el punto de vista calórico, un metro cúbico de biogás en estado bruto o depurado el CO₂ expresa los valores indicados.

A pequeña y mediana escala, el biogás ha sido utilizado en la mayor parte de los casos para cocinar en combustión directa en estufas simples. Sin embargo, también puede ser utilizado para iluminación, para calefacción y como reemplazo de la gasolina o el combustible diesel en motores de combustión interna. En la Figura 4.3 se puede representar los usos que pudiésemos darle a un metro cúbico de biogás en medio rural, como los mencionados anteriormente.

Las presiones que se obtienen en el proceso de degradación de la masa pueden variar, de acuerdo con el tipo de digestor empleado y a la capacidad de la campana de almacenamiento.

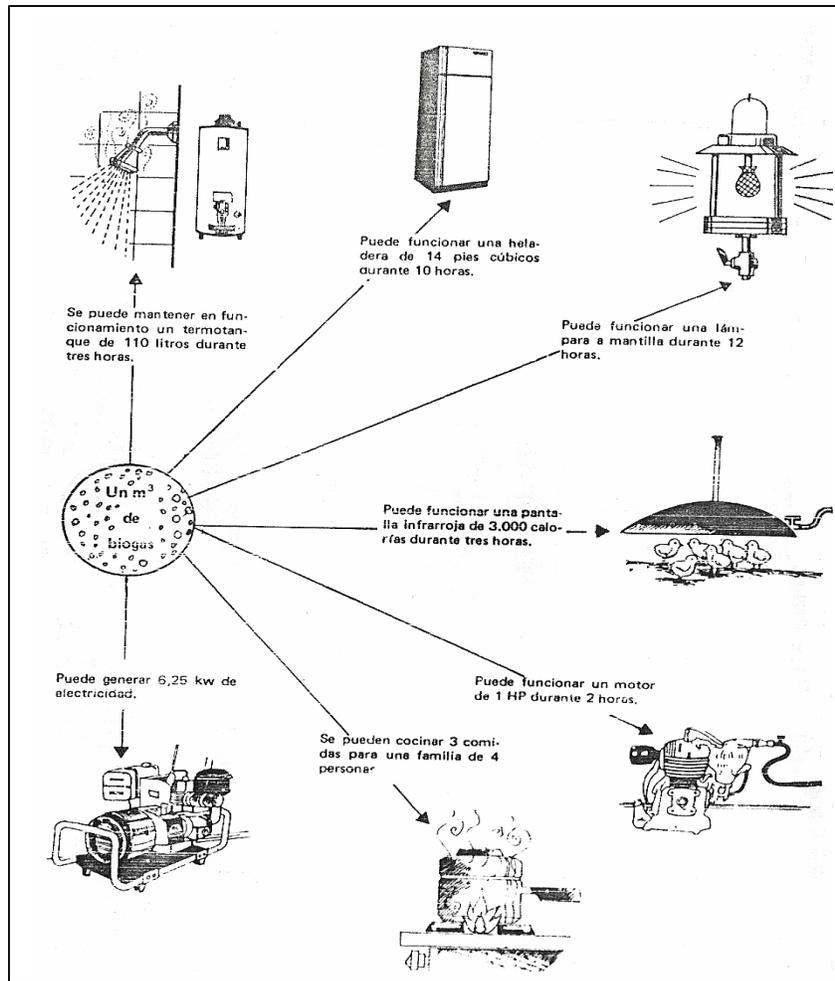


Figura 4.3 Gráfico de las alternativas de rendimiento de 1 m³ de biogás en medio rural (Lemme, 1985)

En la Tabla 4.7 se expresan los valores medios de consumo de biogás en artefactos más comunes y el consumo por HP en horas en motores.

Tabla 4.7 Valores medios de consumo de biogás en artefactos (Lemme, 1985)

Artefacto	Consumo l/h	Consumo kcal/h
Cocina de 1 hornilla	120 a 135	660 a 748
Heladera de 13 pies	100 a 120	550 a 660
Lámpara de mantilla	87 a 96	47.8 a 52.8
Termotanque de 110 litros	250 a 300	137.5 a 165
Estufa infrarroja de 300 cal	305 a 317	167.7 a 173.2
Motor por 1 HP/hr	500 a 800	2750 a 4400

4.6 Bioabono

Además de generar gas combustible, la digestión de la materia orgánica produce un residuo orgánico de excelentes propiedades fertilizantes, no solamente por su contenido de nitrógeno, fósforo y potasio muy similar al de la tierra natural, sino por las fibras y el humus que permiten cohesionar a la tierra a diferencia de los fertilizantes químicos. De esta forma se evitan la competencia que se podría presentar con el aprovechamiento tradicional de los residuos animales y agrícolas con fines fertilizantes o como combustibles. La composición del bioabono en promedio tiene 8.5% de materia orgánica, 2.6% de nitrógeno, 1.5% de fósforo, 1.0% de potasio y un pH de 7.5 (Botero y Thomas, 1987).

Antes de utilizar el lodo residual como fertilizante, debe ser expuesto al aire al menos por 10 días para liberar los gases tóxicos como el H₂S. Para ello es conveniente hacerlo sobre unas piscinas de poco fondo de 30 a 50 cm por donde circule por gravedad el lodo. El fondo de estas piscinas deberá ser en concreto o recubiertas de plástico para impedir que el nitrógeno del fertilizante se escurra por el suelo. Deberán además estar cubiertas del sol y de la lluvia. El fertilizante así tratado es de mucho mejor y puede ser empleado directamente para alimento de animales, una vez secado, o dentro de los sistemas de riego para cultivos agrícolas. Se ha empleado con mucho éxito como alimento para peces ya que el contenido de nutrientes es ideal, especialmente para trucha y tilapia (Sánchez, 2003).

El bioabono sólido o líquido no posee mal olor, a diferencia del estiércol fresco, tampoco atrae moscas y puede aplicarse directamente al campo en forma líquida, en las cantidades recomendadas (McCaskey, 1990). El bioabono sólido puede deshidratarse y almacenarlo para usarlo posteriormente en el entendido de que, al deshidratarse puede haber pérdidas sobre todo de nitrógeno por volatilización hasta de un 60%. De acuerdo con Mandujano (1981), un metro cúbico de bioabono producido y aplicado diariamente, puede fertilizar más de 2 ha de tierra por año y proporcionar hasta 200 kg N/ha. El bioabono no deja residuos tóxicos en el suelo, eleva la calidad del mismo y puede considerarse como un buen fertilizante que puede competir o complementarse con los fertilizantes químicos.

Puede servir como materia prima para producir compostas mezclado con rastrojos. También puede utilizarse para cultivos por hidroponía, en los que se proporciona a la planta la humedad y los nutrientes que requiere sin utilizar tierra. Se puede usar para fertilizar estanques de peces ayudando a formar su alimento.

Las principales ventajas del efecto fertilizante de los lodos digeridos radican en lo siguiente:

- Se posee mayor cantidad de nitrógeno que la materia prima original en base seca, el que mediante el proceso de digestión se toma más asimilable por las plantas
- Es un buen material para el mejoramiento de suelos
- Se eliminan los olores desagradables a diferencia del estiércol fresco
- Se eliminan las bacterias patógenas o semillas de malas hierbas
- Se puede fertilizar 2 hectáreas de tierra por año con 1 metro cúbico de bioabono alcanzando un nivel de 200 kgN/ha
- Se puede alcanzar un promedio de 10 a 20% de incremento en la producción agrícola por el uso del bioabono

4.7 Calor y electricidad

El biogás puede ser utilizado como combustible para motores diesel y gasolina, a partir de los cuales se puede producir energía eléctrica por medio de un generador en este caso (IIT, 1983). En el caso de los motores diesel, el biogás puede reemplazar hasta el 80% del acpm. La baja capacidad de ignición del biogás no permite reemplazar la totalidad del acpm en motores diesel y gasolina pues carecen de bujías para la combustión. Aunque en los motores de gasolina, el biogás puede reemplazar la totalidad del consumo de gasolina, en general en los proyectos a nivel agropecuario se le ha dado preferencia a los motores diesel considerando que se trata de un motor más resistente y que se encuentra con mayor frecuencia en el medio rural.

En el caso del uso como gas, 1 kg de metano equivale a 55 MJ mientras que 1 kg de gas LP es 50 MJ. Debido a la presión baja del metano, debe usarse quemadores de cocina con orificios más grandes para el paso del gas. No es conveniente comprimir el biogás para uso como combustible líquido porque la presión requerida es muy alta y esto eleva su costo. Al usar el metano como combustible de motores, el octanaje es menor por lo que la cantidad de combustible requerido es mayor que cuando se usa gasolina o diesel. Se puede usar una mezcla de biogás y el combustible normal, para lo cual es necesario modificar el sistema de inyección o carburador para este propósito (Sánchez, 2003).

4.7.1 Generación de energía eléctrica a partir de biogás

Para la generación de energía eléctrica existen varias tecnologías que pueden ser utilizadas. Se cuenta con motores de combustión interna, turbinas a vapor, turbinas a gas, micro turbinas, motores de ciclo combinado y celdas de combustible. En la Tabla 4.8 se presentan algunos modelos de tecnologías disponibles y sus respectivas eficiencias.

Tabla 4.8 Eficiencias de algunas tecnologías que utilizan biogás como combustibles (Ochoa y Ortega, 2007)

Tecnología	Eficiencia eléctrica (%)
Motor de combustión interna	33
Turbina de gas	28
Microturbina 70	29
Microturbina 250	30
Microturbina STM	30
Microturbina C30	27
GE Jenbacher	39

El biogás obtenido por fermentación tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110, lo cual lo hace muy adecuado para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión. Por otro lado, una desventaja es su baja velocidad de encendido.

Es muy importante que el biogás, cuando es producido se quemé, aunque preferiblemente debe ser usado como combustible, porque las emisiones de CH_4 hacia la atmósfera lo convierten en peligroso por el efecto invernadero que produce (Cervantes y col., 2007). En los motores de ciclo Otto, el carburador convencional es reemplazado por un mezclador de gases. Estos motores son arrancados con gasolina y luego siguen funcionando con un 100% de biogás con una pérdida de la potencia máxima del 20% al 30%.

A los motores de ciclo diesel se les agrega un mezclador de gases con un sistema de control, manteniendo el sistema de inyección convencional. De esta manera estos motores pueden funcionar con distintas proporciones de biogás y diesel. Pueden convertirse fácil y rápidamente de un combustible a otro lo cual, los hace muy confiables. El gasoil no puede ser reemplazado en los motores funcionando a campo del 85% al 90%, debido a que la autonomía conseguida es menor, comparada con la original.

La proporción de H_2S en el biogás causa deterioros en las válvulas de admisión y de escape de determinados motores obligando a un cambio más frecuente de los aceites lubricantes. Es por ello, que es importante purificar el biogás antes de su utilización.

4.8 Unidades CHP

La cogeneración es una tecnología que no sólo se limita a su uso en edificios de las áreas urbanas o a industriales. Al contrario, las unidades de potencia y calor combinado (Combined Heat and Power Units, CHP por sus siglas originales) de micro y pequeña escala están creciendo al encontrar excelentes aplicaciones en el sector agrícola y rural.

La unidad CHP es una forma eficiente de transformar los combustibles en calor y potencia. Comparado con la forma tradicional de producir calor y potencia en plantas separadas, las plantas con unidades CHP tienen el potencial de disminuir el consumo de combustible entre un 20 y un 30 por ciento. Sin embargo, tales incrementos en eficiencia solamente pueden ser logrados cuando la electricidad y el vapor son producidos al mismo tiempo y en el mismo lugar. Por lo tanto, estas plantas han sido

usadas principalmente para calentar grandes zonas urbanas y por lo general con grandes turbinas de vapor que usan combustibles fósiles.

Las pequeñas plantas con unidades CHP ofrecen la posibilidad de generación distribuida, y esto presenta dos grandes ventajas. La primera se refiere a la eficiencia de las unidades CHP puede ser usada ventajosamente en pequeñas áreas urbanas y en industrias. La segunda es que los recursos locales de biomasa pueden reemplazar los combustibles fósiles, y las cenizas pueden ser recicladas sin costos adicionales ocasionados por el transporte de las mismas (Lund y Münster, 2001). En general, las unidades CHP son motogeneradores que producen calor a la par que generan energía eléctrica. En la Figura 4.4 y 4.5 se muestran motogeneradores de pequeñas plantas y grandes existentes en el mercado.



Figura 4.4 Motogenerador marca Perkins (Ochoa, R. y Ortega, C. 2007)



Figura 4.5 Generador con motor de biogás marca Jenbacher (Ochoa, R. y Ortega, C. 2007)

Considerando que una de las necesidades es el aprovechamiento del biogás para la generación de energía eléctrica, se hace necesario establecer los requerimientos que dicha energía que demande. De esto, dependerá el tipo de motogenerador, la capacidad y la cantidad de los mismos. Las capacidades de generación de energía eléctrica, para distintos tipos de motogeneradores, se pueden observar en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7 Capacidades de generación de energía eléctrica (Ochoa y Ortega, 2007)

Capacidad del motogenerador kW	Capacidad estimada de generación de energía eléctrica (Concentraciones de metano al 50%) kW/h
60	48.43
50	35.47
40	30.52
30	24.38
20	17.09
15	11.47

4.8.1 Costo de los motogeneradores

La respuesta a las necesidades del consumo de la energía eléctrica provenientes del aprovechamiento del biogás, establecerán el costo de uno o varios motogeneradores más convenientes para su utilización e instalación como sistemas de generación de energía eléctrica. En la Tabla 4.8 se recopilan cotizaciones sobre motogeneradores que se han instalado en México y que se tiene información por visitas a SAGARPA.

Tabla 4.8 Costos de motogeneradores (Ochoa y Ortega, 2007)

Marca	Características	Capacidad del Generador (kW)	Costo total (2006)
SIEI	Generación automática de energía eléctrica y de agua caliente. Importado de Europa	30	404,600.00 (M.N.)
		75	1'009,500.00 (M.N.)
Perkins	Generación de electricidad únicamente. Origen nacional e incluye instalación.	60	254,725.00 (M.N.)
Guascor	Modelo FG 180. Generación de energía eléctrica. Importado de Europa	170	340,500.00 (Euros)
Caterpillar	Generación de energía eléctrica. Importado. Sin instalación.	85	75,900.00 (Dólares US)
Sproesser	Unidad de generación eléctrica, con motor de combustión interna de ciclo stirling. Para adaptarse a biogás, generando energía eléctrica y agua caliente. Importado	55	190,361.00 (Dólares US)

4.9 Uso del biogás en México

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, el biogás se produce a partir de residuos vegetales y animales, como por ejemplo, estiércol animal o humano, aguas negras y residuos agrícolas. Al 2005, la Comisión Reguladora de Energía (CRE) autorizó 19 MW para generar 120 GWh/año con biogás como se puede apreciar en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Permisos autorizados en México por la CRE para generar electricidad a partir de biogás (CRE, 2005).

Permisionario	Modalidad	Capacidad MW	Energía Autorizada GWh/AÑO	Energético primario	Tipo de planta
Servicios de agua y drenaje de Monterrey, planta. Dulces Nombres	Auto-generación	9.20	40.20	Biogás	C.I.*
Servicios de agua y drenaje de Monterrey, planta norte	Auto-generación	1.60	14.02	Biogás	C.I.*
Bioenergía de Nuevo León, S.A. de C.V. (BENLESA)	Cogeneración	8.48	66.58	Biogás	C.I.*

*Combustión Interna

La basura es cada día más utilizada en el ámbito mundial como recurso energético. Su utilización depende mucho del tipo de basura, es decir, de la composición de la misma. La cantidad de material orgánico y el porcentaje de humedad son características importantes que determinan su poder calorífico; que puede variar desde 4.2 a 21.2 MJ/kg. En general, la basura en México esta constituida aproximadamente por 50% de materia orgánica (SENER, 2005).

La captura de metano de los rellenos sanitarios de México para la generación de electricidad tiene dos beneficios. El primero trata sobre la reducción de emisiones de

metano en el relleno y el segundo sobre su aprovechamiento para generar electricidad. Lo cual, reduce el consumo de energéticos en el Sistema Eléctrico Nacional y reducción de las emisiones de CO₂.

Es importante señalar que los costos de generación de cualquier sistema de energía renovable, solamente son competitivos con los precios de la tarifa de alumbrado público. Los sistemas de alumbrado público se conectan en mediana o baja tensión, lo cual implica costos de porteo elevados.

La planta de Salinas Victoria mencionada en el apartado 2.2.3 representa la primera experiencia sobre el aprovechamiento de biogás emitido por la basura dispuesta en rellenos sanitarios para la generación de energía eléctrica en nuestro país. El objetivo del proyecto fue demostrar esta tecnología y reproducir el proyecto en otras ciudades de México.

4.10 Marco regulatorio en México

En México existen regulaciones con respecto a:

Contaminantes en agua

En cuanto a los problemas de contaminación, para atender estos aspectos en términos de la legislación vigente, se han establecido diversos instrumentos en México tales como la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley de Aguas Nacionales, la Ley General de Salud, la Ley de Derechos y la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

La Ley Federal de Derechos es donde se establece el pago de derechos por el uso y aprovechamiento de cuerpos receptores de las descargas de aguas residuales, de acuerdo con el tipo del cuerpo receptor, al volumen de agua descargada y los contaminantes vertidos respecto a los límites máximos permisibles.

Dado esta normatividad, los sistemas de aprovechamiento de biogás están demostrado que con mucho se coadyuva en la disminución de los impactos de las excretas de animales (Ponce, 2007).

Gases efecto invernadero (GEI)

La contaminación del aire es considerada como un problema asociado a la actividad del hombre, incluyendo el consumo de combustibles que en los centros urbanos es elevado, debido a que afecta directamente la salud y la calidad de vida de la población.

En Latinoamérica se llevan a cabo 82 proyectos en varias fases de desarrollo. Los tipos de proyectos propuestos son los mostrados en la Figura 4.6 y abarcan diversas tecnologías para la reducción de emisiones de GEI incluyendo CO₂, CH₄, N₂O, y HFCs.

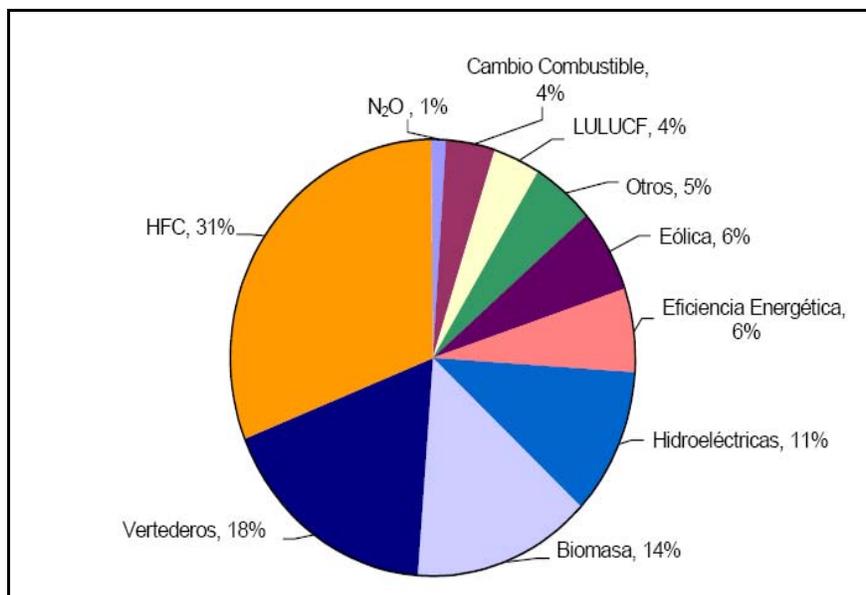


Figura 4.6 Porcentaje de reducción de emisiones por tipo de proyecto (SEMARNAT, 2004)

De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (INEGEI) en 2002 se estimaron las emisiones de los principales GEI a nivel nacional en equivalentes de CO₂ fue de 643,183 mil toneladas para categorías 6 categorías contempladas por el Protocolo de Kyoto. En la Figura 4.7 se observa la composición química porcentual de las emisiones GEI en equivalente de CO₂. En la Figura 4.8 se muestran los sectores que generan las emisiones considerando los GEI.

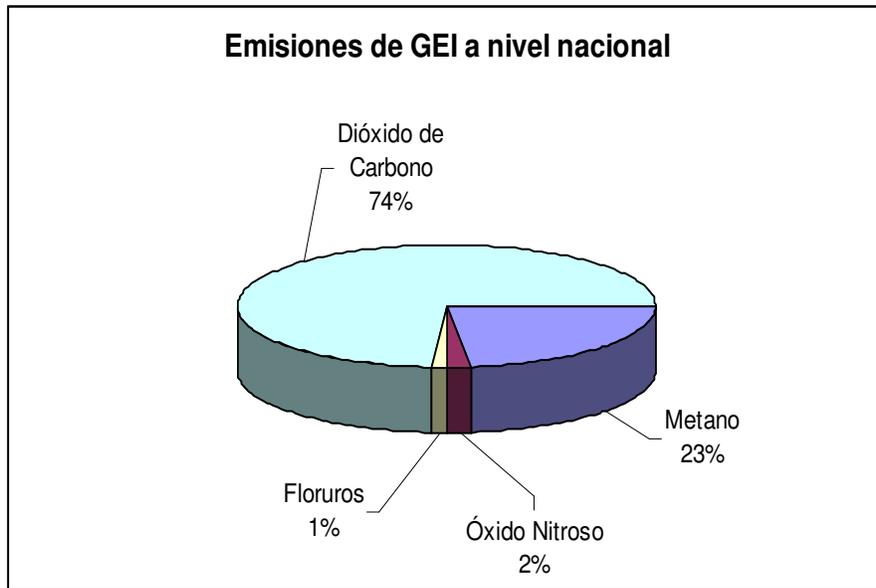


Figura 4.7 Emisiones porcentuales de GEI a nivel nacional

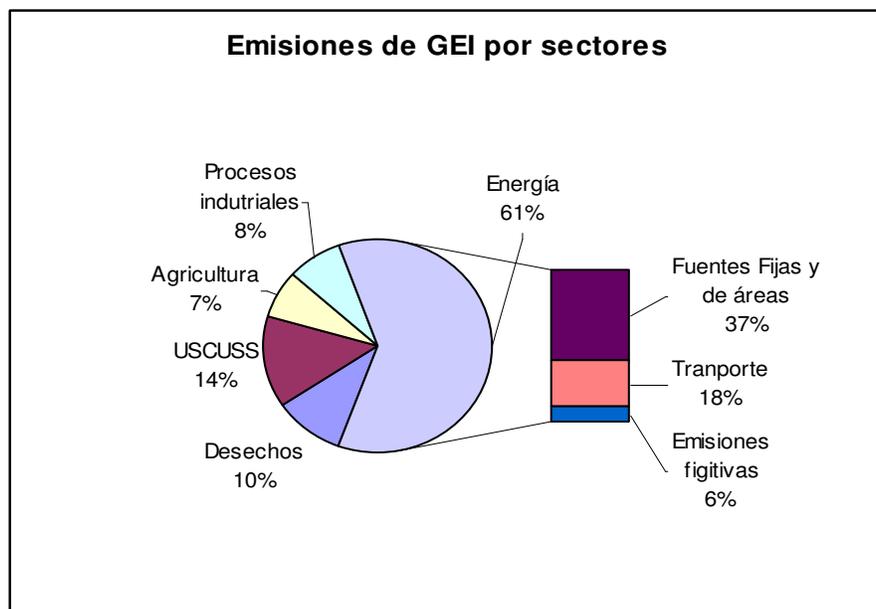


Figura 4.8 Emisiones de GEI por sectores

La categoría de Energía representa la mayor contribución de emisiones de gases de efecto invernadero con una participación del 61 por ciento, considerando únicamente el consumo de combustibles por los subsectores de: generación de electricidad, transporte, residencial y servicios y agropecuario, clasificados como fuentes fijas y móviles de áreas de combustión.

Una parte importante de la emisión de gas metano, es la actividad ganadera, cuya fermentación entérica de los semovientes y la fermentación anaerobia del manejo de las excretas se estima, en un equivalente de CO₂ de 2,123 mil toneladas. Bajo esta consideración, el aprovechamiento de biogás y la utilización de metano, al transformarlo en CO₂ por su combustión o como combustible para motogeneradores es el principal beneficio ambiental que incide en el cambio climático. Además, que va de acuerdo con los objetivos del Protocolo de Kyoto y el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).

Bioenergéticos

En el año 2007 se aprobó en México la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, que autoriza la producción de etanol y otros biocombustibles a partir del maíz, bagazo de caña de azúcar y otros productos agrícolas. La nueva legislación busca promover la inversión privada en la agroindustria y en el desarrollo de fuentes alternas de energía, mediante la instalación de plantas de producción de etanol. La Ley de Bioenergéticos promueve que México se integre a la tendencia mundial de usar fuentes de energía alternas eficientes, modernas y limpias, que implican mejores condiciones de vida para el campo.

La Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos promueve la agricultura, dándole un valor adicional que es la producción de energía, por lo que existe una consideración diferente de los precios y otros factores de la economía. Es entonces que esta iniciativa se inserta no en el marco reglamentario del sector agroalimentario sino que se inserta en una nueva dinámica respecto de una regulación del sector energético, que es muy novedoso en el país. México no cuenta con una ley de energía ni con leyes de energéticos en específico sino que se trata de diferentes energéticos, una ley reglamentaria del artículo 27 constitucional en materia del servicio de energía eléctrica y una ley reglamentaria del artículo 27 en materia de energía nuclear.

En el caso de la ley de bioenergéticos, se combinan en una sola ley los postulados energéticos constitucionales también los principios de desarrollo económico, desarrollo social y la actividad del sector, junto con el tema ambiental para legislar en la materia.

También considera que el empleo de la biotecnología, incluyendo los procesos de fermentación y enzimáticos permitirán el empleo de residuos de las actividades agroindustriales en la producción de biocombustibles, también conocidos de segunda generación.

La iniciativa propone el uso de un combustible amigable para el ambiente que busca estabilizar los gases de efecto invernadero derivados del cambio climático, lo que permite efectivamente cumplir con este compromiso internacional y mejorar la calidad del aire en las zonas metropolitanas.

4.11 Protocolo de Kyoto y Mecanismo de Desarrollo Limpio

En esencia, el Protocolo de Kyoto convoca a una reducción de las emisiones de los gases de invernadero (CO₂, metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos y hexafluorocarbonos de azufre) a los países desarrollados y a algunos países con economías en transición. Esta iniciativa, surgida en diciembre de 1997 bajo la Convención Marco sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas, podría tener en el futuro profundos efectos sobre el uso de combustibles de los países que lo ratifiquen. Cabe señalar que México firmó su adhesión a este protocolo como país miembro del Anexo II, el 9 de junio de 1998 y la ratificó el 7 de septiembre de 2000.

Bajo los términos del protocolo de Kyoto, los países se agrupan en dos anexos. El Anexo I incluye a los países industrializados, mientras que en el Anexo II incluye a los países en vías de desarrollo. Por lo que, para el período de 2008 a 2012, los países del anexo I acordaron reducir sus emisiones en 5.2% con respecto a los niveles de 1990 para el período de 2008 a 2012. Las metas cuantificadas de emisiones son establecidas para cada país de manera diferenciada.

Para alcanzar las metas de reducción, los países del Anexo I pueden implementar medidas internas de reducción de emisiones o los llamados mecanismos flexibles (llamados también mecanismos de Kyoto o mecanismos de mercado), diseñados para ayudar a los países a alcanzar sus metas de reducción de la manera más eficiente en costos, a través de los mecanismos descritos en los siguientes párrafos.

Los mecanismos servirán para promover el desarrollo sustentable de los países en desarrollo y facilitar el cumplimiento de los países desarrollados en el marco del Protocolo de Kyoto.

El Protocolo de Kyoto estableció tres mecanismos flexibles para crear un Mercado de Carbono:

- Comercio internacional de emisiones.- Este mecanismo permite que a partir del 2008 los países del Anexo I transfieran algunas de sus emisiones permitidas hacia otros países del mismo anexo con base en el costo de un crédito de emisión. Por ejemplo, un país del Anexo I que en el año 2010 haya reducido sus emisiones de GEI en 10 millones de toneladas de CO₂ más allá de su meta establecida puede vender este excedente, a otros países del Anexo I que no hayan podido cubrir su cuota de reducción.
- Implementación conjunta.- Permite a los países del Anexo I invertir, a través de sus gobiernos u otras instituciones legales, en proyectos de reducción o secuestro de emisiones en otros países del Anexo I. De esta forma, las reducciones externas de emisiones representan una ganancia en créditos que se pueden aplicar para alcanzar sus metas internas de reducción de emisiones.
- Mecanismos de desarrollo limpio.- Este mecanismo es similar al de la implementación conjunta, con la diferencia de que los países destinatarios de la inversión no pertenecen al Anexo I, lo que abre la posibilidad de que este tipo de proyectos beneficie a economías en desarrollo. Al estar las energías renovables fuertemente vinculadas con el uso de fuentes limpias, este mecanismo representa una gran oportunidad para impulsar su desarrollo en México. Desde el 2002 nuestro país participa dentro de este mecanismo como receptor de inversión con el proyecto de energía eólica Cruz Azul y con el proyecto hidroeléctrico El Gallo, en Cutzamala, Guerrero.

Con el MDL se pueden emprender proyectos que:

- Eviten emisiones de gases de invernadero por medio de energías renovables, medidas de eficiencia energética, cambio de combustibles y otros,

- Capturen carbono por medio de la fotosíntesis en el sector forestal.

Para el caso del MDL se plantea una “lista positiva” de opciones de proyectos que podrán desarrollarse pues mitigan el cambio climático y no generan ningún tipo de riesgos ambientales. Esta “lista positiva” está centrada en diversas opciones de tecnologías limpias y renovables. La integran las siguientes tecnologías sustentables: Biomasa y biocombustibles, energía geotérmica, energía solar (electricidad fotovoltaica y calefacción solar), dispositivos de almacenamiento de energía renovable (celdas de combustibles), micro y mini centrales hidroeléctricas, energía mareomotriz, turbinas y bombas eólicas, procesos y tecnologías para el uso eficiente de la energía.

4.12 Barreras en el desarrollo de energías renovables en México

El Centro de Investigación en Energía de la Universidad Nacional Autónoma de México, en el 2000 reporta una oferta interna bruta de energía primaria en el país de 5,635 PJ, integrada por el 51.2 % de petróleo crudo y condensados, en comparación con el 29.3 % de gas natural o un 6.1 % de biomasa. Es por ello que se vuelve imprescindible recurrir a fuentes renovables de energía que aseguren un leve impacto ambiental.

Sin embargo, en México se enfrentan barreras para la reforma energética tales como la falta de claridad sobre la problemática financiera, dado que el 35 % de los ingresos federales provienen del petróleo. Es por ello que el Sector Energético ha quedado bajo el control del Estado, por lo que se requiere de lo siguiente: 1) La integración de empresas energéticas, tanto públicas como privadas, 2) Incorporar a los recursos renovables en la Constitución de los Estados Unidos Mexicanos, 3) Evaluar de forma obligatoria el impacto sobre el desarrollo sustentable de los proyectos energéticos y la creación de un fondo especial para la investigación y, 4) El desarrollo de tecnologías energéticas nacionales.

Ahora bien, los obstáculos a los que se enfrentan las fuentes renovables de energía son entre otros, la desconfianza dada la falta de conocimiento y cultura por el desarrollo sustentable, tanto de los inversionistas como de la población en general; el costo de

capital relativamente alto (en algunos casos) y el desinterés de la Comisión Federal de Electricidad para incorporar sistemas de generación distribuidos (SEMARNAT, 2007)

La falta de valoración de los beneficios que las energías renovables aportan a la economía nacional, además del hecho de contar con importantes recursos energéticos fósiles nacionales, hacen que las políticas y prospectivas energéticas nacionales sigan basándose en combustibles fósiles. Existen limitaciones constitucionales y legales a la participación privada en el sector energía, se obliga a las empresas públicas de electricidad a adquirirlas al menor costo económico de corto plazo.

Bajo este enfoque, la generación de energía eléctrica a través de energías renovables (ER) resulta más costosa, comparada con fuentes fósiles convencionales, por lo que se requieren mecanismos que permitan fomentarlas, similares a los que se han implementado en los países donde su participación es relevante. Para lograrlo, es necesario establecer incentivos económicos y fiscales, así como metodologías para valorar el aporte de capacidad que las fuentes renovables otorgan al sistema eléctrico nacional (IC, 2007).

En este sentido la iniciativa de Ley para el Aprovechamiento de las Fuentes Renovables de Energía (LAFRE) cuenta con un abanico de instrumentos de este tipo que, en este caso de aprobarse, contribuirán al desarrollo de las ER. La iniciativa tiene la creación de un fideicomiso que otorgaría incentivos temporales a proyectos que generen mediante fuentes renovables electricidad para el servicio público. Se define como meta para el 2012 un porcentaje mínimo de participación de la ER en sus distintas modalidades, respecto a la generación total de electricidad, del 8%, sin incluir a las grandes hidroeléctricas.

La primera prospectiva para ER prevé como escenario base que la oferta de energía primaria se duplicará entre 2002 y 2030. El gas natural tendrá una tasa de crecimiento anual del 3.5%; la demanda de petróleo para el año 2030 se estima en 3.4 millones de barriles diarios, en cuanto a ER, la hidroeléctrica crecerá 2.3% anual, la biomasa y desechos 3.7% y otras renovables 4.1% (IC, 2007).



Capítulo 5

Caso de estudio

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

5.1 Comunidades rurales mexicanas

De acuerdo con datos del INEGI, se considera una población rural, a aquellas comunidades con menos de 2,500 habitantes, además de considerar la baja densidad de población, un patrón de población disperso y un tipo de paisaje físico, así como la forma de vida y actividades económicas desarrolladas. El porcentaje de personas que habitan las comunidades rurales ha disminuido; en 1950 representaba un poco más del 57% del total de la población, para el 2005 se contaba con solo un 24% debido a la migración del campo a las ciudades.

Esta migración se ha dado básicamente a la falta de apoyo gubernamental para el desarrollo del campo, así como la marginación y el rezago debido a la falta de servicios básicos, como agua, electricidad, carreteras, educación etc. Y sobre todo por el grave problema de desempleo que se vive en las comunidades rurales de nuestro país, que ha provocado que vivan en condiciones de pobreza extrema.

Esta marginación asociada a la condición de pobreza de la población rural trae como resultado el deterioro del medio ambiente, debido al uso intensivo de la tierra, a la mala planeación agrícola, al uso de maquinaria y fertilizantes. Así mismo a la contaminación generada por el ganado, entre otras actividades que se realizan en las comunidades (INEGI, 2008).

Sin embargo, el espacio rural tiene una relevancia crucial en México en términos económicos, sociales y especialmente ambientales. Es aquí en donde se destacan actividades agropecuarias y forestales como productoras de alimentos y materias primas para las grandes ciudades del territorio nacional.

Este contexto que expresa un desarrollo asimétrico en el nivel de vida de la población, se vincula con la serie de problemas derivados del uso también diferencial de los recursos naturales. El aprovechamiento de los recursos se caracteriza por ser heterogéneo en

cantidad y calidad y por generar cuadros problemáticos que atentan contra los propios recursos naturales y contra la población que los aprovecha.

5.2 Comunidad de Amanalco

El municipio se sitúa en la parte central de la porción occidental del Estado de México, pertenece a la Región VII Valle de Bravo y cuenta con una extensión territorial de 21,949 hectáreas, en la Figura 5.1 se muestra donde está localizado el municipio de Amanalco.

El terreno es accidentado y sinuoso; aproximadamente el 31% de la superficie total es propicia para la agricultura de temporal (1,327 ha) y riego (5,397 ha). El cultivo predominante es el maíz, generalmente asociado con frijol y se obtienen otros productos como cebada, haba, trigo, aguacate y durazno. El municipio cuenta con múltiples mantos acuíferos: 2 ríos, 24 manantiales, 13 arroyos, 2 bordos, un lago y un acueducto.

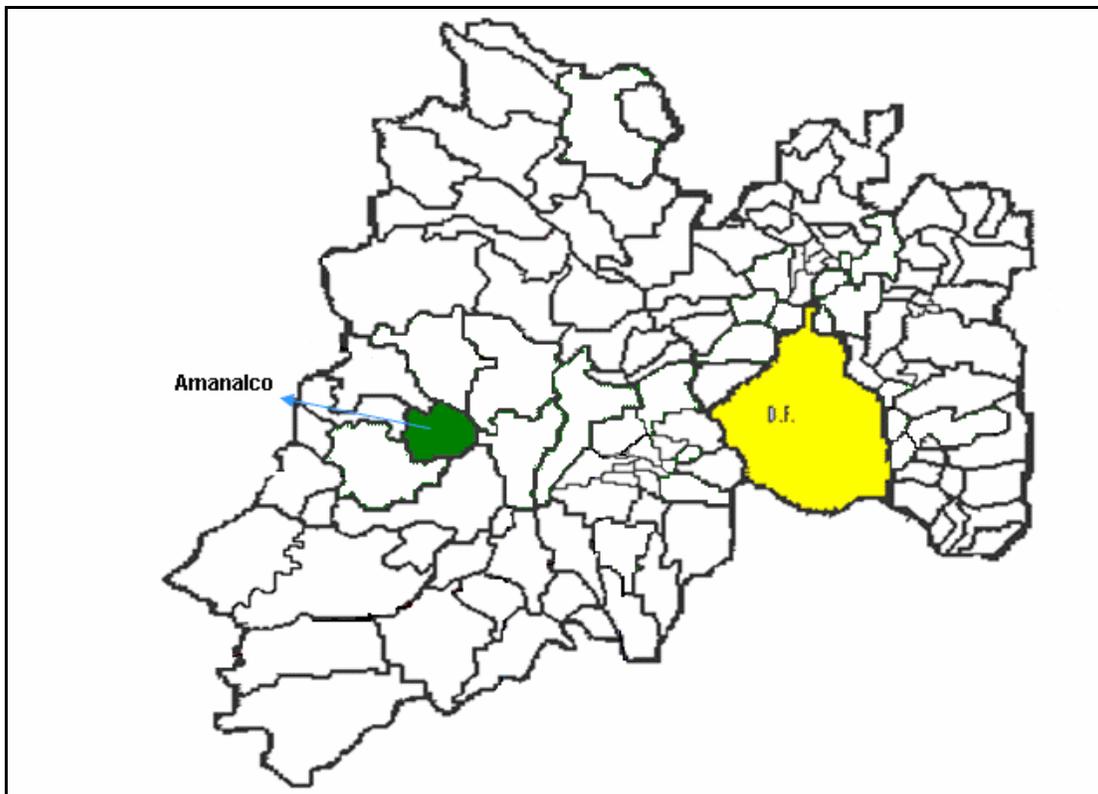


Figura 5.1 Localización de Amanalco

En la Figura 5.2 se muestra un mapa a escala donde se pueden localizar las comunidades de Amanalco: Rincón de Guadalupe 1ª y 2ª sección, San Sebastián 1ª y 2ª sección, San Miguel Tenextepec 1ª y 2ª sección, San Lucas 1ª, 2ª y 3ª sección, San Lucas (San Francisco) 4ª sección y San Jerónimo 1ª y 2ª sección.

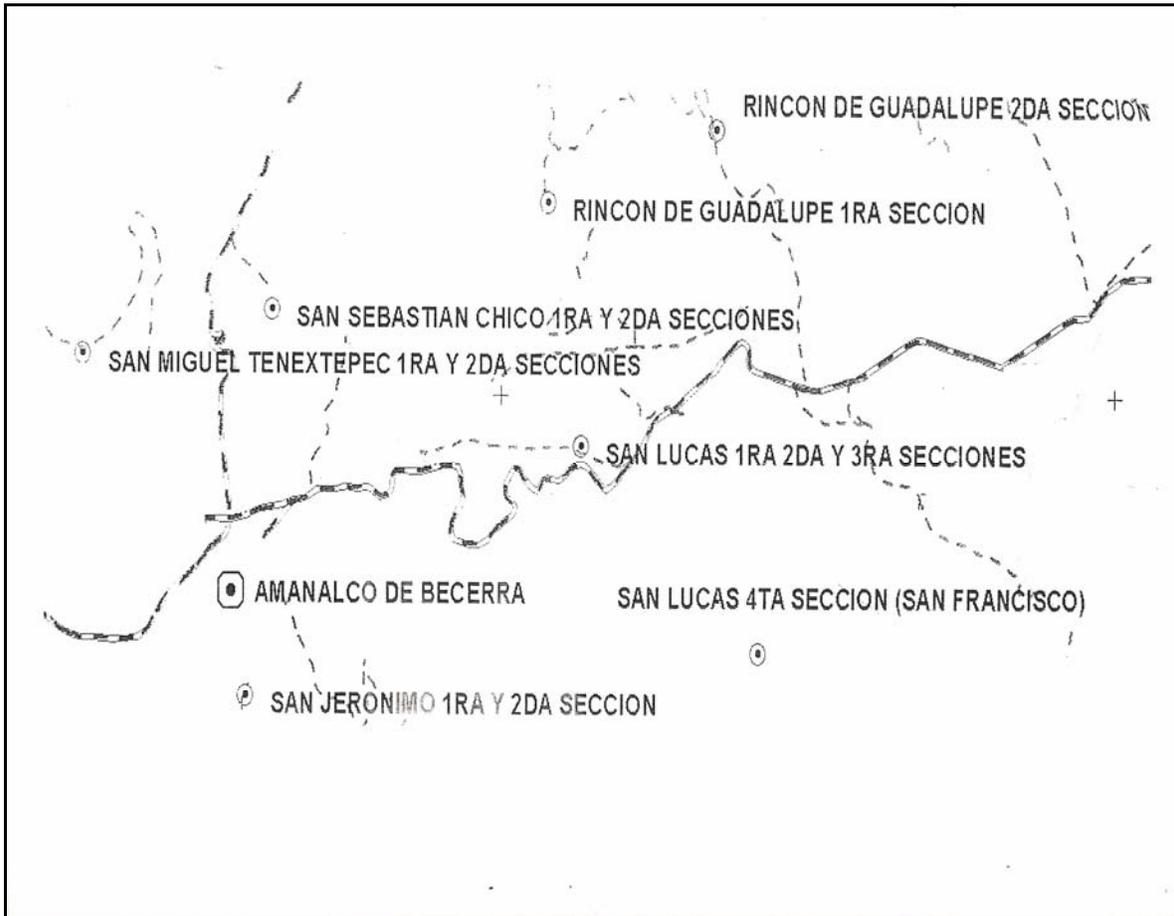


Figura 5.2 Mapa a escala de Amanalco y sus comunidades

El clima en Amanalco es subhúmedo con lluvias en verano, la temperatura media anual es de 13.4°C, con una máxima de 29.7°C. La precipitación pluvial promedio es de 1,156 mm.

En invierno se originan heladas muy intensas y en época de lluvias, fuertes granizadas y vientos que soplan de occidente a oriente.

De acuerdo a los resultados del II Censo de Población y Vivienda del 2005, el municipio de Amanalco cuenta con un total de 30,343 habitantes; con 4,331 viviendas en las cuales habitan 4.91 personas en promedio. Sus principales actividades son la agricultura, la ganadería, la silvicultura y la piscicultura.

El rendimiento ganadero en el municipio es bajo y se reduce únicamente a la crianza para el consumo local, siendo el ganado bovino, porcino, caprino, equino, aves de corral y conejos.

Dentro de la actividad piscícola en el municipio de Amanalco, se cría principalmente la trucha arco iris, para 1998 había 28 unidades piscícolas productoras de trucha de incubadora y engorda con una producción anual de 250 toneladas de trucha. Actualmente se cuentan con alrededor de 74 granjas piscícolas.

En la zona se tienen desechos de la materia orgánica derivada de las piscifactorías, de las actividades diarias, de excretas de los animales y los desechos de la actividad agropecuaria. Actualmente, se ha generado un grave problema de contaminación del agua, por presencia de coliformes que ha desencadenado al mismo tiempo en la infección de la trucha arco iris que se encuentran en las granjas piscícolas. La mayoría de las zonas no tienen drenaje y no cuentan con la cultura necesaria en cuanto al desecho.

Sin embargo, las corrientes del agua contaminada del municipio de Amanalco desembocan en lugares como el río Cutzamala, el cual a su vez provee de este vital líquido a la Ciudad de México. Este problema ha generado la preocupación del Gobierno del Estado de México, pues la contaminación del agua es un problema cada vez más grave.

Dado el panorama anterior, se propone disponer de los residuos orgánicos generados de la actividad piscícola en el municipio principalmente. Con esto se pretende reducir el problema de la contaminación, además de proveer el combustible a la zona rural, por el biogás generado de la degradación anaerobia de la materia orgánica. Este estudio podrá constituir un desarrollo para las comunidades en términos no solo ambientales sino también económicos, energéticos, sociales y de salud.

El municipio de Amanalco alberga 13 comunidades: Rincón de Guadalupe 1ª y 2ª sección (La Loma), San Sebastián Chico 1ª y 2ª sección, San Lucas 1ª, 2ª y 3ª sección, Amanalco de Becerra, San Lucas 4ª sección (San Francisco), San Miguel Tenextepec 1ª y 2ª sección y San Jerónimo 1ª y 2ª sección En la Tabla 5.1 se muestran datos relevantes para el estudio del año 2005 del municipio.

Tabla 5.1 Desechos orgánicos de las comunidades de Amanalco (INEGI, 2005)

Comunidad	Habitantes	Residuos/día (Basura)	Piscifactorías	Producción de trucha Ton/año
Rincón de Guadalupe 1ª y 2ª sección (La Loma)	985	1477.5	3	97.941
San Sebastián chico 1ª y 2ª sección.	473	709.5	3	52.925
San Miguel Tenextepec 1ª y 2ª sección.	862	1293.0	0	0
San Lucas 1ª, 2ª y 3ª sección.	1217	1825.5	6	335.8
San Lucas 4ª sección.(San Francisco)	278	417.0	0	0
Amanalco de Becerra	1362	2043.0	0	0
San Jerónimo 1ª y 2ª sección.	1931	2896.5	7	429.97

5.3 Visita al municipio de Amanalco

Para el presente trabajo se realizó una visita al municipio de Amanalco, con la finalidad de conocer la zona para la posible implementación de digestores de polietileno de bajo costo, así como las condiciones de vida de los habitantes y recolección de muestras de los residuos generados de las actividades pecuarias de crianza de trucha arco iris. Se

recolectaron muestras de excremento de cerdos, ovejas y trucha arco iris. En la Figura 5.3 y 5.4 se muestran unas fotografías de las viviendas y estanques para truchas en San Jerónimo, los recursos de la zona son limitados debido al difícil acceso de estos asentamientos como se muestra en la Figura 5.5 y 5.6, quedando básicamente aislados del resto de los habitantes y de todo servicio de drenaje y electricidad.



Figura 5.3 San Jerónimo



Figura 5.4 San Jerónimo II



Figura 5.5 Vías de acceso a las comunidades rurales



Figura 5.6 Improvisación de puentes en las zonas rurales

En San Jerónimo llegamos a la piscifactoría Conejeras III en la cual trabajan alrededor de 7 personas, constituida de 20 estanques para la crianza de trucha arco iris, una casa de concreto, otra pequeña construcción para la letrina con conexión a una fosa séptica

construida por el propietario, cocina de madera donde se cocina con leña, sin drenaje y energía eléctrica ni gas o combustible. En las Figuras 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10 se muestran las fotografías tomadas a la piscifactoría.



Figura 5.7 Estanques 1 de Conejeras III

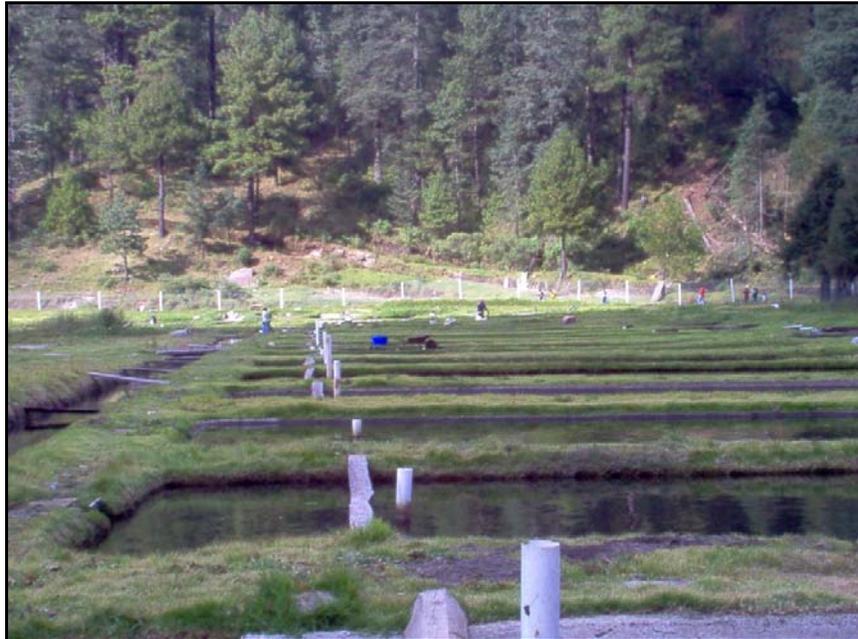


Figura 5.8 Estanques 2 de Conejeras III



Figura 5.9 Estanques 3 de Conejeras III

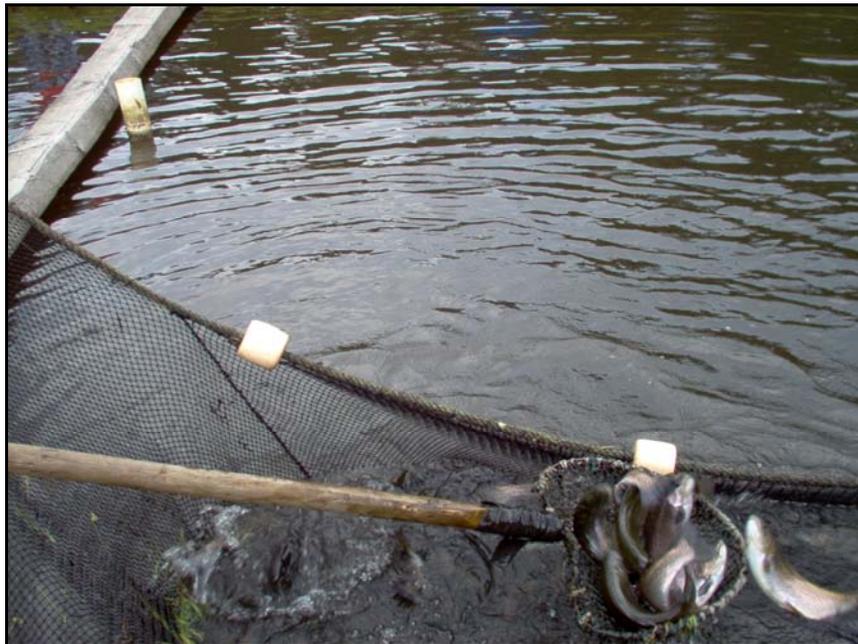


Figura 5.10 Truchas de la piscifactoría

El propietario de la piscifactoría lleva las truchas vivas a las zonas turísticas. La trucha es transportada en tinacos marca rotoplas en una camioneta con destino a la Marquesa, también los habitantes aledaños son consumidores. En las Figuras 5.11 y 5.12 se muestra la

contaminación a suelos y mantos acuíferos derivada de la dicha actividad pecuaria. En las Figuras 5.13 y 5.14 se presentan fotografías de la cocina del propietario y se puede observar que los alimentos se cocinan con leña y alrededor se evidencian envases PET, los cuales según el propietario cuando acumulan alrededor de 20 los queman.



Figura 5.11 Residuos removidos de los estanques



Figura 5.12 Contaminación del agua con vísceras de trucha



Figura 5.13 Cocina del propietario de Conejeras III



Figura 5.14 Lugar donde se cocina con leña

5.4 Producción de residuos

Con la información contenida en la Tabla 5.1 se puede obtener la cantidad de excremento por habitante de cada comunidad al día utilizando la proporción estimada de producción por persona de 0.3 kg/hab·día. Del mismo modo dado la producción de trucha arco iris se puede obtener el peso promedio y solo el 6% son residuos de alimento para la trucha, resultados que se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Cantidad de residuos por comunidad

Comunidad	Habitantes	Producción de excremento kg/hab·día	Piscifactorías	Producción de residuos de trucha kg/día
Rincón de Guadalupe 1ª y 2ª sección (La Loma)	985	295.5	3	16.10
San Sebastián chico 1ª y 2ª sección.	473	141.9	3	8.7
San Miguel Tenextepec 1ª y 2ª sección.	862	258.6	0	0
San Lucas 1ª, 2ª y 3ª sección.	1217	365.1	6	55.2
San Lucas 4ª sección.(San Francisco)	278	83.4	0	0
Amanalco de Becerra	1362	408.6	0	0
San Jerónimo 1ª y 2ª sección.	1931	579.3	7	70.68

5.5 Pruebas experimentales de producción de biogás de los desechos

Estas pruebas fueron realizadas por Ayala (2008) en su trabajo de investigación y que son clave para determinar la factibilidad de la generación de electricidad a partir del biogás producido de los desechos de trucha.

La metodología que se siguió puede dividirse en tres, la caracterización de la materia prima (los desechos), el arranque y operación de los digestores. Durante este periodo se llevaron a cabo pruebas químicas como la demanda química de oxígeno (DQO) que mide indirectamente la materia orgánica presente en una muestra, el porcentaje de humedad de cada uno de los excrementos, así como la determinación de todos los sólidos presentes en las muestras. Se midió también la cantidad de biogás producido, el porcentaje de metano y se tomaron algunas muestras.

Estas pruebas se llevaron a cabo según el APHA (1992). Los desechos caracterizados en la primera etapa fueron excremento de pez, oveja y cerdo. En ésta etapa, la caracterización fue necesaria para determinar las cargas orgánicas que se combinarían con el inóculo anaerobio en digestores a nivel laboratorio. Se realizaron varias proporciones de mezcla de los desechos que se presentan en la Tabla 5.3. El objetivo de las mezclas fue la evaluación del desecho para una mayor producción de metano.

Tabla 5.3 Proporciones de mezclas de los reactores (Ayala, 2008)

Mezcla	Porcentaje de excremento (%)		
	Pez	Oveja	Cerdo
1	100	0	0
2	0	100	0
3	0	0	100
4	60	30	10
5	10	60	30
6	30	10	60

La segunda etapa de las pruebas fue la puesta en marcha de los reactores anaerobios a nivel laboratorio. Para ello, se utilizaron matraces que se adaptaron para tener condiciones anaerobias.

Para la realización de las pruebas se utilizaron 6 matraces kitazato de 500 ml con sellos herméticos a régimen intermitente y completamente mezclados a una temperatura de 35 °C. Las Figuras 5.15, 5.16 y 5.17.

A cada uno de los reactores se les adicionó un inóculo previamente de un reactor anaerobio de una industria cervecera. El volumen de inoculación fue de 200 ml. Los parámetros de arranque fueron, un tiempo de residencia de 15 días y una carga orgánica de $0.1 \text{ kgDQO/kgSSV}_{\text{inóculo}} \cdot \text{día}$.



Figura 5.15 Preparación de las mezclas de excrementos (Ayala, 2008)



Figura 5.16 Mezcla del desecho de las granjas de Trucha arco iris 100 % (Ayala, 2008)



Figura 5.17 Reactores de laboratorio en operación (Ayala, 2008)

Para la tercera etapa, que fue la operación de los digestores siguió con las determinaciones químicas analíticas. Con esta etapa la producción de biogás fue diferente en cada uno de los

reactores. En la Figura 5.18 se observan las burbujas generadas de biogás de uno de los reactores. El biogás fue medido mediante desplazamiento de agua en una probeta.



Figura 5.18 Evidencia de producción de biogás

En la operación de digestores, la relación de humedad que contienen los desechos es un parámetro muy importante. La humedad debe estar en proporción 1:1. Si los desechos contienen poca humedad, habrá que adicionarla. En la Tabla 5.4 se muestra la proporción de agua que se adicionó a cada 100 g de excrementos, y con la que se llegó a la consistencia deseada.

Tabla 5.4 Proporción de agua adicionada por excremento (Ayala, 2008)

Excremento	ml agua/g de desecho
Trucha arco iris	0.25
Oveja	0.35
Cerdo	0.50

En la Tabla 5.5 se muestran los parámetros de caracterización del inóculo de los desechos de trucha, con estos valores se determinó la cantidad de materia orgánica en volumen que sería adicionada en la mezcla de 100% trucha.

Tabla 5.5 Parámetros de caracterización para residuos de trucha (Ayala, 2008)

Parámetro	Inóculo mg/l	Residuos de Trucha mg/l
Sólidos Totales (ST)	40,725	204,350
Sólidos Solubles Totales (SST)	37,333	201,400
Sólidos Totales Fijos (STF)	10,120	150,750
Sólidos Solubles Fijos (SSF)	8,467	162,000
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	3,392	2,950
Sólidos Totales Volátiles (STV)	30,605	53,600
Sólidos Solubles Volátiles (SSV)	28,867	39,400
Sólidos Disueltos Volátiles (SDV)	1,738	14,200
Sólidos Disueltos Fijos (SDF)	1,653	Nd
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	-----	33,957

Nd: no determinado

5.6 Parámetros para la producción de biogás y metano

Para una estimación teórica de la producción de biogás a partir de residuos orgánicos se considera la siguiente ecuación:

$$P_{biogás} = t \times DM \times OM \times MBP$$

donde:

t= Cantidad de sustrato (ton)

DM= Fracción de materia seca en el sustrato (%)

OM= Fracción orgánica de materia seca (%)

ODM= Partícula orgánica del sustrato = DM x OM

MBP= m³/tonODM

Cuando son más de dos sustratos a degradar se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_{biogás} = \left[M \times DM_M \times \frac{OM_M}{DM_{CS}} \times \frac{m^3 biogás}{kg OM_M} \times 1000 \right] + \left[CS \times DM \times \frac{OM_{CS}}{DM_{CS}} \times \frac{m^3 biogás}{kg OM_{CS}} \times 1000 \right]$$

donde:

M = Desecho (ton/año)

DM= Contenido de materia seca

OM/DM= Fracción orgánica de materia seca

OM= Producción de biogás por kg de desecho

CS= Otro sustrato

Uno de los parámetros que permite evaluar la generación de metano a partir de la degradación de la materia orgánica es la productividad de metano (Sanchez y col., 2001). Este parámetro se define como la cantidad de metano generado en la unidad de tiempo de la materia dispuesta en el reactor. La expresión matemática que permite calcular la productividad de metano de un determinado residuo orgánico en un tiempo determinado es la siguiente:

$$P_{CH_4} = \frac{V_{CH_4}}{V_{reactor} \times t}$$

donde:

V_{CH_4} = Volumen de metano generado

$V_{reactor}$ = Volumen de materia dispuesta en el recinto fermentador

t = Tiempo considerado para la degradación

La producción de metano, tiene un límite y este depende fundamentalmente de la naturaleza de la materia dispuesta en el digestor. La ecuación que permite estimar la máxima generación de metano para un producto determinado, es:

$$M_{Max} = \frac{V_{CH_4}}{S_{org.total}}$$

donde:

V_{CH_4} = es el volumen de metano generado

$S_{org.total}$ = es la cantidad de materia orgánica total utilizada en todo el proceso

5.7 Resultados

El objeto de estudio del presente trabajo fue determinar la factibilidad de generación de electricidad de acuerdo al biogás producido de los desechos de trucha. En la Figura 5.19 se presentan los resultados promedios de la producción de biogás en un tiempo de residencia de 15 días. A la fecha, no existen estudios donde se haya determinado la producción de biogás a partir de desechos de granjas piscícolas y esta es una parte que hace constar de la originalidad de este proyecto.

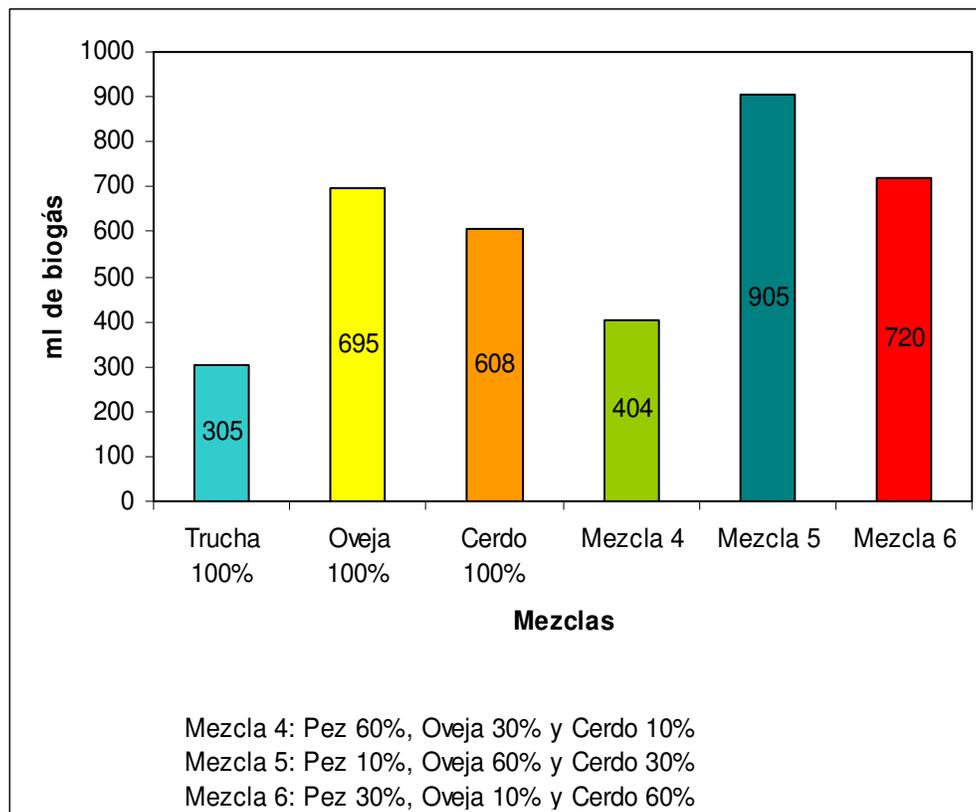


Figura 5.19 Producción de biogás en las mezclas (Ayala, 2008)

La posible utilización del biogás para la generación de energía eléctrica brindará una opción de combustible y evitará la tala y contaminación de los bosques en las áreas de las piscifactorías.

La concentración de metano se determinó por cromatografía de gases. La muestra se introduce al equipo mediante inyección, utilizando una jeringa para cromatografía de gases de 1 ml. Una vez ingresada la muestra en el inyector del equipo, ésta eleva su temperatura hasta la temperatura del inyector y la muestra es arrastrada por una corriente de gas transportador hasta la columna cromatográfica que permite la separación de moléculas de la muestra. De esta forma, el cromatógrafo nos da cualitativa y cuantitativamente las moléculas en una muestra, que en este caso fue el metano y el dióxido de carbono.

El proceso cromatográfico concluye con la detección de los componentes de la mezcla y la generación de una señal medible, proporcional a la cantidad de materia de cada componente separado, para este fin se utiliza un detector de ionización de llama (FID) el cual da la señal al registrador que despliega un gráfico de intensidad en función del tiempo y que finalmente se integra calculando el área del pico correspondiente de metano. En la Tabla 5.6 se muestran los resultados de los reactores en su operación, donde puede observarse que las mezclas produjeron cantidades de metano en un tiempo diferente a una misma concentración de materia orgánica, medida indirectamente como DQO.

Tabla 5.6 Producción de metano en relación al TRH y a la materia orgánica degradada.

TRH óptimo días	Volumen de prueba ml	Mezcla	ml CH ₄ /g DQO-removida	g DQO ·removida/día
10	456	1	6.6	2.75
5	466	2	13.0	8.43
5	481	3	29.6	2.05
10	478	4	109.1	0.23
11	415	5	33.2	1.91
11	402	6	60.5	0.79

La mayor conversión de metano a partir de la materia orgánica fue en la mezcla 4, pero lenta. La conversión más rápida es la mezcla 2 pero con una menor eficiencia en la conversión a metano. Puede tomarse como muestra óptima la mezcla 4, por que la conversión puede acelerarse con un inóculo que vaya adaptándose al sustrato conforme al tiempo y el TRH se acortará.

5.8 Producción de biogás

Una vez obtenidos la producción de biogás y las concentraciones de metano de las pruebas de residuos en el laboratorio se procedió a hacer estimaciones sobre la producción anual de biogás de acuerdo a la producción de trucha de la zona. Los parámetros considerados para las estimaciones son: La temperatura promedio del municipio de Amanalco, la producción de trucha, un tiempo de residencia hidráulico de 10 días de tal manera que se operen bajo condiciones mesofílicas que es el tiempo óptimo para el proceso de obtención de biogás de los sustratos (Ayala, 2008).

En la Tabla 5.7 se muestra la relación de las comunidades con granjas piscícolas, la producción total anual de trucha y nuevamente la estimación de los residuos de trucha obtenidos en la Tabla 5.2. Para los cálculos se utilizaron datos presentados en las Tablas 5.5 y 5.6:

Para la producción real:

- Rincón de Guadalupe 1ª y 2ª sección:

$$33,957 \frac{mgDQO}{Kg_{residuo}} \left(16.1 \frac{Kg_{residuo}}{día} \right) = 546,708 \frac{mgDQO}{día}$$

$$546,708 \frac{mgDQO}{día} (40\%) = 218,683 \frac{mgDQO_{rem}}{día}$$

$$218,683 \frac{mgDQO_{rem}}{día} \left(55 \frac{mLCH_4}{gDQO_{rem}} \right) \left(\frac{1g}{1000mg} \right) \left(\frac{1L}{1000mL} \right) = 12.03 \frac{LCH_4}{día} \rightarrow 0.012 \frac{m^3CH_4}{día}$$

- San Sebastián chico 1ª y 2ª sección:

$$33,957 \frac{\text{mgDQO}}{\text{Kg}_{\text{residuo}}} \left(8.7 \frac{\text{Kg}_{\text{residuo}}}{\text{día}} \right) = 295,425.9 \frac{\text{mgDQO}}{\text{día}}$$

$$295,425.9 \frac{\text{mgDQO}}{\text{día}} (40\%) = 118,170.3 \frac{\text{mgDQO}_{\text{rem}}}{\text{día}}$$

$$118,170.3 \frac{\text{mgDQO}_{\text{rem}}}{\text{día}} \left(55 \frac{\text{mLCH}_4}{\text{gDQO}_{\text{rem}}} \right) \left(\frac{1\text{g}}{1000\text{mg}} \right) \left(\frac{1\text{L}}{1000\text{mL}} \right) = 6.49 \frac{\text{LCH}_4}{\text{día}} \rightarrow 0.006 \frac{\text{m}^3\text{CH}_4}{\text{día}}$$

- San Lucas 1ª, 2ª y 3ª sección:

$$33,957 \frac{\text{mgDQO}}{\text{Kg}_{\text{residuo}}} \left(55.2 \frac{\text{Kg}_{\text{residuo}}}{\text{día}} \right) = 1'874,430 \frac{\text{mgDQO}}{\text{día}}$$

$$1'874,430 \frac{\text{mgDQO}}{\text{día}} (40\%) = 749,772 \frac{\text{mgDQO}_{\text{rem}}}{\text{día}}$$

$$749,772 \frac{\text{mgDQO}_{\text{rem}}}{\text{día}} \left(55 \frac{\text{mLCH}_4}{\text{gDQO}_{\text{rem}}} \right) \left(\frac{1\text{g}}{1000\text{mg}} \right) \left(\frac{1\text{L}}{1000\text{mL}} \right) = 41.23 \frac{\text{LCH}_4}{\text{día}} \rightarrow 0.041 \frac{\text{m}^3\text{CH}_4}{\text{día}}$$

- San Jerónimo 1ª y 2ª sección:

$$33,957 \frac{\text{mgDQO}}{\text{Kg}_{\text{residuo}}} \left(70.68 \frac{\text{Kg}_{\text{residuo}}}{\text{día}} \right) = 2'400,080.76 \frac{\text{mgDQO}}{\text{día}}$$

$$2'400,080.76 \frac{\text{mgDQO}}{\text{día}} (40\%) = 960,032.3 \frac{\text{mgDQO}_{\text{rem}}}{\text{día}}$$

$$960,032.3 \frac{\text{mgDQO}_{\text{rem}}}{\text{día}} \left(55 \frac{\text{mLCH}_4}{\text{gDQO}_{\text{rem}}} \right) \left(\frac{1\text{g}}{1000\text{mg}} \right) \left(\frac{1\text{L}}{1000\text{mL}} \right) = 52.8 \frac{\text{LCH}_4}{\text{día}} \rightarrow 0.052 \frac{\text{m}^3\text{CH}_4}{\text{día}}$$

Para la producción Teórica:

- Rincón de Guadalupe 1ª y 2ª sección:

$$218,683 \frac{\text{mgDQO}_{\text{rem}}}{\text{día}} \left(0.35 \frac{\text{LCH}_4}{\text{gDQO}_{\text{rem}}} \right) \left(\frac{1\text{g}}{1000\text{mg}} \right) = 76.53 \frac{\text{LCH}_4}{\text{día}} \rightarrow 0.076 \frac{\text{m}^3\text{CH}_4}{\text{día}}$$

- San Sebastián chico 1ª y 2ª sección:

$$118,170.3 \frac{mgDQO_{rem}}{día} \left(0.35 \frac{LCH_4}{gDQO_{rem}} \right) \left(\frac{1g}{1000mg} \right) = 41.35 \frac{LCH_4}{día} \rightarrow 0.041 \frac{m^3CH_4}{día}$$

- San Lucas 1ª, 2ª y 3ª sección:

$$749,772 \frac{mgDQO_{rem}}{día} \left(0.35 \frac{LCH_4}{gDQO_{rem}} \right) \left(\frac{1g}{1000mg} \right) = 262.42 \frac{LCH_4}{día} \rightarrow 0.262 \frac{m^3CH_4}{día}$$

- San Jerónimo 1ª y 2ª sección:

$$960,032.3 \frac{mgDQO_{rem}}{día} \left(0.35 \frac{LCH_4}{gDQO_{rem}} \right) \left(\frac{1g}{1000mg} \right) = 336.01 \frac{LCH_4}{día} \rightarrow 0.336 \frac{m^3CH_4}{día}$$

Tabla 5.7 Producción de biogás por granja piscícola en la zona de Amanalco

Comunidad	Piscifactorías	Producción de trucha Ton/año	Residuos de trucha kg/día	Producción real m ³ CH ₄ /día	Producción teórica m ³ CH ₄ /día
Rincón de Guadalupe 1ª y 2ª sección (La Loma)	3	97.941	16.1	0.012	0.076
San Sebastián chico 1ª y 2ª sección	3	52.925	8.7	0.006	0.041
San Lucas 1ª, 2ª y 3ª sección	6	335.8	55.2	0.041	0.262
San Jerónimo 1ª y 2ª sección	7	429.97	70.68	0.052	0.336
Conejeras III (caso de estudio, apartado 5.3)	1	60	9.86	0.007	0.046

Los resultados de la Tabla 5.7 se obtuvieron con el 40% de remoción de materia orgánica de acuerdo con las pruebas sin embargo, lo óptimo es arriba del 50%. Para que exista una mayor estabilización del inóculo al sustrato se requiere de un mayor tiempo de retención.

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 5.7, el total de metano real producido de todas las comunidades es de 0.111 m³/día es decir 111 litros de metano al día correspondiente a un poder calorífico del 62.149 kJ/m³. El total de metano teórico es de 0.715 m³/día es decir 715 litros de metano al día correspondiente a un poder calorífico del 400.44 kJ/m³.

5.9 Dimensiones de los digestores de polietileno

Para determinar las posibles dimensiones de los digestores a implantar en Amanalco se necesitan la producción de biogás en términos anuales y la proporción de agua respetando una relación de 3:1. Las dimensiones del digestor se determinan con la siguiente ecuación:

$$V_{\text{digestor}} = \left[\text{desecho} \left(\frac{m^3}{\text{año}} \right) + \text{co-sustrato} \left(\frac{m^3}{\text{año}} \right) \right] \times \frac{TRH(\text{días})}{365}$$

donde:

V_{digestor} = Volumen del digestor

Desecho = Residuo que va a ser degradado en el digestor

Co-sustrato = Sólo en caso de que exista otro residuo a degradar

TRH = Tiempo de residencia hidráulica

Para determinar el volumen de almacenamiento de biogás para el digestor se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_{\text{alm.}} = \text{Sustrato} \left(\frac{m^3}{\text{año}} \right) \times \frac{T_{\text{ar}}(\text{meses})}{12} - V_{\text{digestor}} (m^3)$$

donde:

V_{alm} = Volumen de almacenamiento de biogás

Sustrato = Residuo a degradar

T_{ar} = Tiempo de almacenamiento requerido

Como se ha planteado en el trabajo, el digestor a implementar en la zona de Amanalco es el tipo salchicha, siendo el adecuado para zonas rurales y de bajo costo, a continuación en la Tabla 5.8 se presentan los materiales de construcción y el precio promedio en el mercado.

Tabla 5.8 Costo promedio de materiales de construcción en México de diferentes proveedores

Materiales	Costo unitario (\$)
1 metro de plástico tubular de polietileno calibre 8	90
Balde de plástico de 10 litros de capacidad	60
1 metro de manguera transparente de 1 ½" de diámetro	28
1 T de PVC de 1" de diámetro*	10.9
1 adaptador macho de PVC de 1"*	7
1 adaptador hembra de 1"*	9
1 codo de PVC de 1"	8.8
1 m de tubería de presión de PVC de 1"*	8.5
1 tapón liso de PVC de 1"*	8
1 arandela rígida de plástico o acrílico de 20 cm de diámetro, con un orificio central de 1"	15
1 fraso o envase de plástico con capacidad para 3 litros*	40
1 neumático usado, cortado en 2 empaques y en correas	200
1 saco de plástico de fertilizante*	15
1 metro de tubería metálica de ½" de diámetro	57
1 metro de manguera	16
1 litro de pegamento para PVC	104

* Indica que la cantidad de material es fija, por lo que de los otros materiales depende del tamaño del digestor.

El costo de materiales para implementar el digestor más pequeño es de 2,052.5 pesos y del más grande es de 2,915.4 pesos. En cuanto a la mano de obra la pueden poner los mismos habitantes de Amanalco a quienes beneficiaría la instalación de los digestores.

Para el caso de estudio el tiempo de almacenamiento requerido es de 2 a 7 días que representa el tiempo de residencia hidráulica de operación del sistema. En la Tabla 5.9 se presentan las posibles dimensiones de los digestores de polietileno con un tiempo de retención de 10 días con la consideración de la relación de 5:1 entre largo y diámetro de acuerdo con lo presentado en el apartado 3.4 y con las mangas de polietileno existentes en el mercado. También se consideró la relación de 3:1 de proporción de agua expuesta en este apartado. En la Tabla 5.9 las dimensiones presentadas son las requeridas para la instalación de un solo digestor por cada comunidad de Amanalco.

Tabla 5.9 Dimensiones de digestores

Comunidad	Volumen m ³	Ancho m	Diámetro m	Largo m
Rincón de Guadalupe 1 ^a y 2 ^a sección (La Loma)	0.7728	1	0.637	3.2
San Sebastián chico 1 ^a y 2 ^a sección	0.4176	1	0.637	3
San Lucas 1 ^a , 2 ^a y 3 ^a sección	2.6496	1.5	0.955	5
San Jerónimo 1 ^a y 2 ^a sección	3.3924	2	1.27	6.5

En la Figura 5.20 se muestra un esquema de la posible ubicación del digestor a implementar en las comunidades de Amanalco de acuerdo con las especificaciones del apartado 3 del presente trabajo. Para considerar la mejor ubicación es necesario tomar en cuenta donde

será el lugar donde se dispondrá del combustible, y de donde se recolectarán los residuos de las truchas. El esquema muestra la conexión a la cocina.



Figura 5.20 Esquema del digestor

5.10 Sistema de generación de electricidad

Con las pruebas realizadas y los cálculos efectuados en este apartado se puede proseguir a determinar la cantidad de energía eléctrica que se podría generar disponiendo de los residuos de trucha de las comunidades de Amanalco.

La producción real total de biogás de las comunidades con piscifactorías de acuerdo con los resultados es de $0.185 \text{ m}^3/\text{día}$, representando 0.049 kW . Y para la producción teórica total de biogás fue de $1.192 \text{ m}^3/\text{día}$, representando 0.316 kW . Sin duda la maquina ideal para generar electricidad utilizando algún hidrocarburo gaseoso, es una planta de generación eléctrica accionada por un motor de combustión interna, cuyas eficiencias de conversión total oscilan entre 30.5% y 35%.

Para los resultados presentados en la Tabla 5.10 se consideró un motogenerador Marca Guascor, Modelo FG180 a 60Hz con una eficiencia del 35% con el 5% de pérdidas de autogeneración. Dado lo anterior en la Tabla 5.10 se presenta la relación de energía eléctrica que se podría generar utilizando el total del biogás producido y sin ningún otro fin.

Tabla 5.10 Producción de energía eléctrica en las comunidades de Amanalco

Comunidad	Potencia real Wt	Energía eléctrica real We	Potencia teórica Wt	Energía eléctrica teórica We
Rincón de Guadalupe 1ª y 2ª secc (La Loma)	5.4	1.798	34	11.3
San Sebastián chico 1ª y 2ª secc.	2.71	0.902	18.54	6.164
San Lucas 1ª, 2ª y 3ª secc.	18.54	6.164	118.47	39.38
San Jerónimo 1ª y 2ª secc.	23.5	7.813	151.9	50.5
Conejeras III (caso de estudio, apartado 5.3)	3.165	1.05	20.801	6.916

Los resultados presentados en la Tabla 5.10 no reflejan un alto grado de generación de energía eléctrica sino por el contrario, sin embargo la generación de energía eléctrica a partir de biogás es proporcional a la cantidad de desecho a digerir en el digestor por lo tanto, si se desea que haya una mayor generación las piscifactorías deberán producir más truchas para poder incrementar los kilogramos de residuos por día de las mismas.

Dado los resultados anteriores no es factible disponer de los desechos para generar energía eléctrica sin embargo el gas producido se puede utilizar para la cocción de alimentos, agua caliente y al tener un combustible los habitantes de las comunidades ya no quemarían madera para estos fines. A continuación se presenta un análisis de los beneficios de los digestores de polietileno.

5.11 Beneficios económicos totales de un digestor de polietileno

Un digestor de polietileno es una alternativa para la producción de biogás a bajo costo; una tecnología que ofrece beneficios directos y funcionales. Como beneficios directos se han identificado el reemplazo de la combustión de combustibles fósiles gracias a la producción de CH₄ y disminución en el uso de fertilizantes sintéticos por el contenido de nutrientes del material digerido. La estimación de valores funcionales incluye el potencial del uso del biogás para reducir la emisión de gases causantes del efecto invernadero emitidos durante la combustión de combustibles fósiles.

La valoración de la producción de biogás y flujo de nutrientes es utilizada para estimar los beneficios directos. El valor monetario del biogás se estima por su capacidad para reemplazar otras fuentes de energía fósiles usadas comúnmente en zonas rurales. El valor del efluente se calcula por el valor comercial de los nutrientes recolectados al final del proceso de digestión.

El valor de los nutrientes representa al valor equivalente de nutrientes utilizado comercialmente. El análisis de los valores funcionales de la aplicación de este tipo de digestores se basa en el potencial de uso de biogás para reducir el uso de fuentes no renovables de energía y su capacidad teórica para reducir la emisión de CO₂.

5.11.1 Análisis de ecosistema para el uso de un digestor de polietileno

En estudios realizados en comunidades rurales, Botero y Preston (1986) diseñaron un digestor de tamaño promedio para una familia rural tiene un volumen total de 7.2 m³, con una fase líquida de 5.1 m³ (75% del total de la capacidad) y 1.8 m³ para el almacenamiento del biogás (25% del total de su capacidad). El digestor de polietileno recibiría una carga diaria de 21.6 kg de excrementos frescos mezclados con 86.4 kg de agua. Esto representa una carga anual de 7,885 kg de excrementos frescos de cerdo y 31,536 kg de agua (Botero y Preston, 1986).

En la Tabla 5.11 se muestra la producción de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), hidrógeno (H₂), nitrógeno (N₂), monóxido de carbono (CO) y sulfuro de hidrógeno (H₂S) por un año en 3 tiempos de retención: 20 y 50 días en la aplicación de Botero y Preston (1986). En esta Tabla se hace una comparación entre el estudio que se hizo para la comunidad de Amanalco de 10 días de TRH y los estudios de Xuan(1997), Botero y Preston (1986).

Si se reunieran todos los desechos de granjas piscícolas de Amanalco para ser digeridos en un digestor este operaría con una carga diaria de 150.68 kg y 452.04 kg de agua, lo que representa una carga anual de 54,998.2 kg de residuo de trucha y 164,994.6 kg de agua adicionada. Bajo términos totales de carga del total de las piscifactorias se presenta la comparación de la cantidad de gases obtenidos en el proceso de digestión de acuerdo con los datos reales y teóricos de la obtención de biogás aportados en el presente trabajo.

Tabla 5.11 Producción total de biogás por año caso Xuan, Botero y Preston comparado con Amanalco.

Gases	Volumen (%)	Litros producidos al año			
		20 días (Xuan, 1997)	50 días (Botero y Preston, 1986)	10 días (Amanalco) real	teórica
CH ₄	60	384,345	450,775	40,515	260,975
CO ₂	33.2	196,312	230,242	22,418	144,406
H ₂	1	5,913	6,935	675	4,350
N ₂	0.5	2,957	3,468	338	2,175
CO	0.1	591	694	68	435
O ₂	0.1	591	694	68	435
H ₂ S	0.1	591	694	68	435
Biogás	100	591,300	693,500	67,525	434,958

Un análisis teórico estima que un digestor de polietileno de 7.2 m³ propuesto por Botero y Preston (1986) puede producir desde 3,524 kW/año hasta 4,133 kW/año, considerando que un metro cúbico de biogás representa un equivalente de 5.96 kW. Con la combustión del biogás, en lugar de combustibles fósiles, como el caso del diesel hay una posible reducción de 0.34 kg de CO₂ por kW de energía producido en base a datos propuestos por Kummar y col. (2000).

Lo anterior es en los cálculos teóricos que no siempre son los mismos resultados en la práctica.

5.12 Contribuciones ambientales

Dentro de los beneficios directos del uso de la digestión se estiman en base al uso de biogás, como fuente alternativa de energía no renovable, y la aplicación del efluente como sustitución del uso de fertilizantes sintéticos. El valor comercial del biogás se estima en su equivalencia en valor energético de un combustible fósil que puede ser reemplazado por el uso de biogás. Un combustible comúnmente utilizado en zonas rurales donde los digestores de polietileno son instalados es el diesel. El valor neto en calorías de un metro cúbico de biogás equivale a la energía emitida por la combustión de 0.55 litros de diesel (Sasse, 1988). Por lo que 67,525 litros/año de biogás generados en el estudio de caso equivalen a 37.178 litros de diesel.

Los valores funcionales incluyen beneficios intangibles del uso de digestores como:

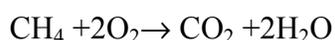
- Reducción de la emisión de gases de efecto invernadero gracias a la reducción de la demanda de combustibles fósiles y por la captura controlada del CH₄
- Ahorro en el consumo de leña, previniendo deforestación y aportando energía
- Control de contaminación, disminución de malos olores (reducción en la emisión de SO₂) y disminución de enfermedades respiratorias asociadas a la quema de leña

La forma de evaluar los valores funcionales de la aplicación de digestores de polietileno únicamente incluye la capacidad del uso de la digestión para reducir la emisión de gases de efecto invernadero comparado con la combustión de combustibles fósiles. Otros valores funcionales como el potencial de reducir enfermedades humanas, reducción de patógenos.

El Departamento del Ambiente del Reino Unido (DOE, 1993) ha estimado que el valor de la emisión de una tonelada de CO₂ a la atmósfera como un contaminante global fluctúa entre 5 y 45 dólares por año.

Además, Kumar y col. (2000) indican que 30 millones de toneladas de CH₄ son generadas anualmente por diferentes sistemas de producción animal y desechos. Estas emisiones pueden reducirse a aproximadamente 13.24 millones de toneladas de CH₄ al año por la aplicación de sistemas de digestión. A nivel mundial, el uso de la digestión puede evitar emisiones de alrededor de 420 millones de toneladas de CO₂ y puede prevenir la emisión de 49 mil toneladas de óxidos de nitrógeno. Si estos números son convertidos a valores monetarios, la aplicación mundial de la digestión podría resultar en un ahorro anual de entre 2,167.8 y 16,391.1 millones de dólares.

Al combustionar una molécula de metano se produce:



El peso molecular de CH₄ es 16 y del CO₂ es 44, cuando se combustiona 16 g de CH₄ también se producen 44 g de CO₂, su equivalencia con el CH₄ es 21 veces su peso molecular por lo que se reduce a: $21 \times 16 = 44 = 292$ g de CO₂ equivalente. La tonelada de carbono equivalente se cotizaba en el 2002 entre 3 y 5 dólares y en el 2004 entre 5 y 10 dólares.

En el caso de estudio del municipio de Amanalco, los beneficios ambientales de la captación de metano de los residuos de trucha son la reducción de metano emitido a la

atmósfera así como la reducción de la tala de árboles para utilizar la leña como combustible para la cocción de los alimentos.

De acuerdo con Interactive Units Convert del EPA tenemos que: 1 m³ de CH₄ es equivalente a 0.01428 Ton de CO₂ equivalente. En la Tabla 5.12 se muestran aproximaciones de las toneladas de CO₂ equivalentes que se podrían obtener si se toma el total de CH₄ producido de las granjas piscícolas.

Tabla 5.12 Reducción de gases efecto invernadero en CO₂ equivalente

	Litros de CH ₄ al año	Toneladas de CH ₄	Toneladas de CO ₂ equivalente
Real	40,515	0.02755	0.57855
Teórica	260,975	0.17751	3.72771

Datos calculados con Interactive Units Convert, EPA

5.13 Contribuciones Sociales

Dentro de las contribuciones sociales podemos citar el mejoramiento del medio ambiente, disminución de coliformes en el agua y ríos ubicados en Amanalco, así como enfermedades provocadas por la ingesta de agua contaminada. Aunado a esto los habitantes se verían beneficiados al utilizar el biogás como un combustible equivalente al diesel y al gas LP, en lugar de talar sus árboles para obtener leña. Todo lo anterior conlleva a un mejoramiento en la calidad de vida de los habitantes del municipio de Amanalco.

Esta página se dejó en blanco intencionalmente



Capítulo 6

Conclusiones

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

6.1 Conclusión

De esta forma se ha abordado el tema del uso de la biomasa como fuente de energía, con particular atención en la tecnología de degradación anaerobia. Se considera que tienen posibilidades reales de ser aplicadas en las comunidades rurales del país y reducirían en gran medida el consumo de leña para la cocción de los alimentos, tendrán a su alcance un combustible competente al gas LP.

En la visita realizada a la comunidad de San Jerónimo en el municipio de Amanalco Estado de México existen evidencias de que los habitantes desgastan el tronco de los árboles en un 50% para éste se seque y así poder consumir la madera lo antes posible.

Muy pocas comunidades tienen drenaje, en el caso de estudio se observó una letrina con fosa séptica hecha por el propietario de la piscifactoría “Conejeras III” esto indica que al menos esta piscifactoría no contamina con eses fecales humanas el agua, sin embargo no todas las familias cuentan con este sistema. Los digestores planteados en el trabajo ayudarían a la reducción de los desechos, a la tala de árboles y al mejoramiento social y ambiental de las comunidades.

Con este trabajo se pudo determinar que 1 kg de desecho de trucha generan 1.245 L de biogás/día con una concentración de metano del 59.5% que representa 0.747 L de CH₄/día a un régimen de operación de 10 TRH.

Dentro de las contribuciones ambientales se tiene que con la disposición de todos los residuos de Amanalco se lograría una captura de 0.027 Ton de CH₄ al año, lo que se traduce en una reducción de CH₄ al ambiente.

Si bien, la cantidad de metano no es la suficiente para poder generar energía eléctrica en la comunidad, estos datos se podrían escalar dado que la producción de metano es proporcional a la alimentación de residuos en el digestor. Si se conjuntaran más residuos de trucha de zonas aledañas entonces se convertiría rentable el proyecto.

Las contribuciones sociales a la comunidad son el hecho de que los habitantes generen su propio combustible a través de sus residuos y lo utilicen para la cocción de

alimentos. De esta manera no se exponen a los gases nocivos de la quema de leña, se dejaría de consumir madera y no gastarían por consumo de gas LP.

Con el fin de continuar con este tipo de investigaciones, se recomienda desarrollar metodologías para realizar catastros en el municipio, de los residuos que pudieran ser utilizados en la generación de biogás, obtener a través del trabajo en laboratorio las tasas de eficiencia para la obtención de biogás de cada tipo de residuo y mezclas de ellos, y finalmente definir costos, inversiones y modelos de negocio que permitan a las comunidades rurales alcanzar los beneficios de la explotación de recursos energéticos localmente disponibles.

Dado que las condiciones de la investigación no arrojaron los resultados esperados se recomienda que para obtener la cantidad máxima de biogás generado de residuos de trucha se tenga un mayor tiempo de retención, y un mayor tiempo de adaptación del inóculo a los desechos, lo que requiere un mejoramiento de los experimentos en el futuro.

Dado que la tecnología de la degradación anaerobia es una forma de obtener energía limpia y de bajo impacto ecológico convendría hacer un análisis posterior para evaluar la posibilidad de registrar estos proyectos bajo términos del Mecanismo de Desarrollo Limpio.

Referencias bibliográficas

- Almanza, R. y Muñoz, F. 1981. Digestor de 15 m³, etapas 1 y 2. Instituto de Ingeniería, UNAM. México, D.F., México.
- Antonioli, D. 2004. Financiamiento de Proyectos con Bonos de Carbono. Publicado en Memorias del Segundo Coloquio Internacional Energía de los Residuos Sólidos Capacitación y Difusión; Sede ITESM Campus Monterrey, 16 al 18 de febrero. Monterrey, Nuevo León, México.
- Arvizu, F. 2003. Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad. Boletín del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). México.
- Arvizu, J. 2004. Evaluación del potencial Energético de Rellenos Sanitarios. Publicado en Memorias del Segundo Coloquio Internacional Energía de los Residuos Sólidos Capacitación y Difusión. Sede ITESM Campus Monterrey, 16 al 18 de febrero. Monterrey, Nuevo León, México.
- Ayala, E. 2008. Producción de metano de desechos de granjas de truchas, ovejas y cerdos de la comunidad rural de Amanalco de Becerra en el Estado de México para su posible uso como bioenergía. Tesis de licenciatura en Ingeniería Química en proceso. Facultad de Química, UNAM. Ciudad Universitaria, D.F., México.
- BMFT, 1992. Ministerio Federal de Investigación y Tecnología. Alemania.
- Botero, B. y Thomas, R. 1987. Biodigestor de bajo costo para la producción de combustibles y fertilizantes a partir de excretas. Manual para su instalación, operación y utilización. Publicación del Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia
- Bullock, J., Kristiansen, B., 1987. Biotecnología básica. Editorial Acribia, S.A., España.
- BUN-CA, 2002. Manual sobre energías renovables. Biomasa. Instituto para la Diversión y Ahorro de la Energía. Fortalecimiento para la Capacidad en Energía Renovable para America Central (FOCER). Costa Rica.
- Castro-González, A. 1997. Tratamiento anaerobio de lodos de purga de una planta de lodos activados. Serie: Química Ambiental de agua Volumen 4. Ed. PIQAYQA. Facultad de Química, UNAM. Ciudad Universitaria, D.F., México.

- Cervantes, F. y col. 2007. Estrategias para el aprovechamiento de desechos porcinos en la agricultura. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales, San Luis Potosí, México.
- Chynoweth, D. y Fannin, K. 2002. Biological Gasification of Marine Algae, Department of Agricultural and Biological Engineering, University of Florida, EEUUA.
- Chynoweth, P. 2002. Anaerobic Digestion of Biomass, Editorial Elsevier Applied Science, New York. EEUUA.
- Cofre, C. 2001. Guía Para la Construcción y Operación de una Planta de Biogás, alimentada con lodos Residuales de la Industria Carnea. Tesis para optar al título de Constructor Civil. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.
- Concheiro, A. 1985. Alternativas energéticas. Editorial Fondo de Cultura Económica. Segunda edición. México, D.F., México.
- Craig, B. 1993. Sour-Gas Desing Considerations. Publicado por Society of Petroleum Engineers Inc. Barcelona, España.
- CRE, 2005. Energía de la Biomasa. Publicación de Comisión Reguladora de Energía. México, D.F., México.
- Dalton, Z. 1989. An analisis of domestic biogas storage installations in China. **Biomass**. 20(1-2): 61-67.
- DOE, 1993. Externalities from landfill and incineration. Department of Environment. Centre for social and economics research. Warren spring laboratory, for the environment cosultancy, HMSO. Gran Bretaña.
- Durán de Bazúa, C. 1993. Demonstration of cleaner production techniques for the cane sugar agroindustry. Final Project Report. United Nations Industrial Development Organization. México-Viena. 120 pages. México D.F. México.
- EPA, Environmental Protection Agency. Interactive Units Convert. <http://www.epa.gov/cmop/resources/converter.html>.
- Flores, R. 2004. Participación Empresarial en el Proyecto de Salinas Victoria. Memorias del Segundo Coloquio Internacional Energía de los Residuos Sólidos, Capacitación y Difusión; Sede ITESM Campus Monterrey, 16 al 18 de febrero de 2004. Monterrey, Nuevo León, México.

- Flotats, X., Bonmati, A., Campos, E., Teira, R. 2002. El proceso de secado de purines en el marco de gestión integral de Residuos Ganadero. Tratamiento de residuos ganaderos. Enero. Madrid, España.
- Foo, J. 2001. Proceedings of the IBSnet Electronic Seminar: How to install a polyethylene biogas digester, International Organization of Biotechnology and Bioengineering.
- Frankhauser, S. 1995. Valuing climate change: The economics of the greenhouse. Editorial Earthscan. Londres, Gran Bretaña.
- Fry, L. 1975. Methane power plants. Publicado por D.A. Knox Andover Hampshire, Gran Bretaña, Inglaterra.
- Gollakota, K. y Sarada, R. 1988. Anaerobic degradation of tea wastes and some aromatic compounds by a methanogenic consortium. En memorias de: 5th International Symposium on Anaerobic Digestion. Editores Hall, E.R., y Hobson, P.N de la International Association on Water Pollution Research and Control. Lisboa, Portugal.
- Gunnerson, C. 1986. Anaerobic Digestion, The World Bank, Washington, D.C., EEUUA.
- Gutiérrez-Vera, J. 2004. Puesta en Marcha y Operación de la Planta de Salinas Victoria. En Memorias del Segundo Coloquio Internacional Energía de los Residuos Sólidos Capacitación y Difusión. Sede ITESM Campus Monterrey, 16 al 18 de febrero. Monterrey, Nuevo León, México.
- Hines, A. y Maddox, R. 1987. Transferencia de masa, fundamentos y aplicaciones. Segunda edición, Editorial Prentice-Hall, Hispanoamericana. México.
- IC, 2007. Energías renovables. Energías renovables para el desarrollo sustentable. Revista Ingeniería Civil Num. 458/año LVII/Junio. Órgano oficial del Colegio de Ingenieros civiles de México A.C. D.F. México.
- IIE, 1979. Estudios, adaptación y pruebas de equipos comerciales para la utilización del biogás. Informe IIE/FE-A2/14 del Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca, Morelos, México.
- IIE, 1997. Determinación del porcentaje óptimo de sólidos para digestores de desechos orgánicos. En el Informe IIE/FE-A2/4 del Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca, Morelos, México.

- IIT, 1983. Plantas de biogás. Diseño, construcción y operación. Publicación del Instituto de Investigaciones Tecnológicas. Editorial Guadalupe. Bogota, Colombia.
- Infantes, P. 2006. Diseño de Biodigestores. Presentación en el Foro Ergonomix. Lima, Perú.
- Jeason, D. y Carrera, J. 2002. Avances en biotecnología ambiental, tratamiento de residuos líquidos y sólidos. Editorial Acribia. Madrid, España.
- Jensen, H. 1985. Biogas purification. Bioenergy 84, Vol III. H. Editores Eugnéus y A. Ellgard, Editorial Elsevier Applied Science Publishers. Países Bajos.
- Klein, A. 2002. Gasification and Alternative Process for Energy Recovery and Disposal of Municipal Solid Wastes. Columbia University Publisher. EEUA.
- Kumar, M.; Humar, S.; Poonia, M. 2000. Methane, carbon dioxide and nitrous oxide reduction through the application of biogas technology. *Indian Journal of Environmental Health* 42 (3): 117-120.
- Lemme, J. 1985. Instalaciones aplicadas en los edificios (combustibles, gas, biogás). Editorial Ateneo. Buenos Aires, Argentina.
- Loehr, R. 1974. Agricultural Waste Management. Editorial Academic Press Incompany. Londres. Inglaterra.
- López, R. 1996. Factibilidad técnico-económica del uso de biogás obtenido de la digestión anaeróbica de estiércol porcino para la generación de electricidad. Tesis de licenciatura en Ingeniería Mecánico-Electricista. Facultad de Ingeniería, UNAM. Ciudad Universitaria, D.F., México.
- Lund, H. y Münster, E. 2001. AAU's analyser (Aalborg University Analyses)," in Bilagsrapport fra arbejdsgruppen om kraftvarme- og VE-elektricitet (Attachment report from the expertgroup on CHP - and RES-electricity), Publicación de la Agencia de Energía Danesa. Copenhagen, Dinamarca.
- Luostarinen, S. 2005. Anaerobic on site wastewater treatment at low temperature. Universidad de Jyväskylä. Finlandia.
- Mandujano, M. 1981. Biogás: Energía y fertilizantes a partir de desechos orgánicos. Manual para el promotor de la tecnología. Organización Latinoamericana de Energía. Cuernavaca, Morelos, México.
- McCaskey, A. 1990. Microbiology and chemical pollution potencial of swine waste. En: Memorias del Primer Ciclo Internacional de Conferencias sobre

- Manejo y Aprovechamiento de Estiércol de cerdos. Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV). México. D.F., México.
- Melvin, A. 1988. Natural Gas. Basic Science and Technology. Publicación de British Gas Plc. Inglaterra.
 - Meynell, P. 1982. Methane: Planning a Digester. Editorial Prism Press. Dorchester, Gran Bretaña.
 - Morrison, K. 2004. Emissions Trading is on fire. Financial Times. Ontario, Canada.
 - Muñoz, F. 1981. Revisión bibliográfica del proceso de digestión anaeróbica de desechos orgánicos. Tesis de maestría en Ingeniería Sanitaria, DEPMI Facultad de Ingeniería, UNAM. Ciudad Universitaria. México, D.F., México.
 - NAS, 1977. Methane generation from human, animal and agricultural wastes. Publicación de National Academy of Sciences. Washington, D.C., EEUA.
 - Noyola, A. 1990. La digestión anaeróbica aplicada al tratamiento de aguas residuales a nivel individual y semicolectivo. Presentado en el V Congreso Nacional de la Sociedad de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, A. C. Puebla, Pue., México.
 - Ochoa, R. y Ortega, C. 2007. Aprovechamiento de biogás para la generación de energía eléctrica en el sector agropecuario. Revista Claridades Agropecuarias. Publicación de SAGARPA No. 168 ISSN0188-9974. México, D.F., México.
 - Pauss, A. 1987. Biomasa. Editores Hall, D.O. y Overend, Editorial John Wiley and Sons. EEUA
 - Parkinson, G. 1984. Membranes wide roles un gas separations. Chemical Engineer Handbook, Sexta edición. Editorial McGraw-Hill.
 - Penido, J., Mansur, W. 1994. Energy Recovery from industrialized waste in Comlurb's Recycling Plant.
 - Poggio, D. 2007. Diseño y construcción de dos digestores anaeróbicos en el altiplano andino peruano. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona. Barcelona, España.

- Preston, T. 2005. Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir del estiércol. Manuscrito inédito. Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV). Cali, Colombia.
- Prince, E. 1981. Biogas, Produccion and Utilization”, Ann Arbor Science, Michigan. EEUUA.
- Ram, B. 1975. Bio-gas plant. Publicación de: Gas Research Station. Ajitmal, Etawah India.
- Rang, D. 2004. El recupero de gas para actividades sugeridas a partir de la extracción de petróleo; Proyectos de conversión de combustibles fósiles (carbón a gas natural) en Chile; proyectos de eficiencia energética durante la fabricación de hierro (India), o en la producción de Clinker (Costa Rica). Oficina Argentina para el Mecanismo de Desarrollo Limpio- JICA. Argentina.
- Reed, T. 2001. Gasifier projects and manufacturers around the world. Capítulo en el libro de: Biomass gasification. Segunda edición. Editado por The National Renewable Energy Laboratory and The Biomass Energy Foundation. Golden Colorado. EEUUA.
- Richter, E. y col. 1985. Pressure swing adsorption processes for the production of natural gas of methane from biogases. Bioenergy 84, Vol III. H. Editores Eugnéus y Ellgard. Editorial Elsevier Applied Science Publishers. Países Bajos.
- Salazar, G. 1993. Los digestores: Una alternativa energética en la porcicultura y un medio para evitar la contaminación. Campo Experimental de SARH-INIFAP-CIPAC del Centro de Jalisco. Guadalajara, Jalisco, México.
- Sanchez, E., Weiland, P., Martin, A. 2001. Effect of substrate concentration and temperatura on the anaerobic digestion of piggery waste in a tropical climate. Process Biochemistry. Alemania.
- Sánchez, S. 2003. Energías renovables. Conceptos y Aplicaciones. WWF - Fundación Natura. Quito, Ecuador.
- Santander, V. 1978. Obtención de biogás a partir de desechos orgánicos dentro del proyecto sistemas energéticos integrados en comunidades rurales. Tesis Profesional de Ingeniería química. ESQUIE, Instituto Politécnico Nacional. México, D.F., México.
- Sarabo, F., Elortegui, N. 2000. Energías renovables. Segunda edición. Editorial ERA Solar, D.F., México.

- Sasse, L. 1998. Biogas plants. Publicación de la: Gesellschaft Fur Technishe Zusammenarbeit (GTZ).. pág. 34. Alemania.
- SE, 2004. Energías Renovables: Energía de la biomasa. Publicación de la Dirección Nacional de Promoción de la Subsecretaría de Energía Eléctrica, Secretaría de Energía. República Argentina.
- Seisa, 2005. Aprovechamiento de los Desechos Sólidos Municipales para la Generación de Energía Eléctrica. Publicación de: Sistemas de Energía Internacional S.A. de C.V. Tijuana, Baja California, México.
- SEC, 2003. Publicación de la Superintendencia de Electricidad y Combustible de Chile, Chile.
- SEMARNAT, 2007. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F. México.
- SENER, 2005. Una visión al 2030 de la utilización de las energías renovables en México. Proyecto encargado por la Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico de la SENER y el Banco de México. Secretaría de Energía. Proyecto ejecutado por la Universidad Autónoma Metropolitana. México, D.F. México.
- SFA, 2002. Process screening analysis of alternative gas Treating and sulfur removal for gasification. Pacific Inc. for the U.S. Department of Energy. EEUUA.
- Soubes, M. 1994. Biotecnología de la digestión anaerobia. En Memorias del III Taller y Seminario Latinoamericano: Tratamiento de aguas residuales. Pp. 136-148. Montevideo, Uruguay.
- Stookey, D. y col. 1984. Recovery of methane from biogas with Monsanto's prism separators. Bioenergy 84. Editores Egnéus y Ellgard. Países Bajos.
- Themelis, N. 2002. Energy recovery from New York City solid wastes. Publicación de: Waste Management and Research. EEUUA.
- Vesilind, P. 1981. Unit Operations in Resourse Recovery Engineering. Editorial Prentice- Hall, Inc. México.
- Walley, P. 1987. Condensation, and gas-liquid flow. Editorial Clarendon Press Oxford. New York, EEUUA.
- Xuan An, B., Rodríguez L., Sarwatt, S., Preston, R., Dolberg, F. 1997. Installation and performance of low-cost polyethylene tube biodigesters on small-scale farms World Animal Review. Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV). Cali, Colombia.

- Youngfu, Y. 1989. The biogas technology in China. Agricultural Publishing House. Beijing, China.
- Zhuang, G., Pan, J., Yiao, Y., Zheng, S. 1994. Bacterial desulfurization of the H₂S containing biogas. *Biotechnology Letters*, 16 (10): 1087-1090. China.