



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, ARRANQUE Y OPERACIÓN  
DE UN PROTOTIPO BIOENERGÉTICO DE INGENIERÍA  
VINCULADO A LA CULTURA Y EL ARTE**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO**

**PRESENTA:**

**NÁJERA PONCE DE LEÓN HÉCTOR MIGUEL**

**DIRECTORA DE TESIS:**

**DRA. ALEJANDRA CASTRO GONZÁLEZ**



**MÉXICO D.F., CIUDAD UNIVERSITARIA**

**2014**

**JURADO ASIGNADO:**

PRESIDENTE: Ing. Jacinto Viqueira Landa

VOCAL: Dra. Alejandra Castro González

SECRETARIO: Dr. Arturo Guillermo Reinking Cejudo

1er. SUPLENTE: M.I. Juan Carlos Cedeño Vázquez

2do. SUPLENTE: Ing. Eleuteria Silvina Alonso Salinas

DIRECTORA DE LA TESIS:

Dra. Alejandra Castro González

\_\_\_\_\_

SUSTENTANTE:

Héctor Miguel Nájera Ponce de León

\_\_\_\_\_

Este trabajo se realizó bajo el apoyo del instituto Goethe y de la Facultad de Ingeniería en el proyecto PAPIME PE100810 con el tema: “Prototipos de Sistemas de Energía y Biocombustibles”.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México

Por convertirse en mi segunda casa, permitirme adquirir múltiples conocimientos y por ser parte importante en mi formación como persona.

A la Dra. Alejandra Castro González

Por todas sus enseñanzas, por darme la oportunidad de participar en el proyecto residual, por permitirme realizar la tesis, por brindarme su apoyo y tiempo

A los sinodales

Por brindarme el tiempo y ayuda necesarios para presentar la tesis.

Y a mi madre y hermanos

Por todo su apoyo para concluir mis estudios, todos sus consejos, enseñanzas y paciencia.

# Índice

ÍNDICE DE CONTENIDOS	
ÍNDICE DE FIGURAS	I
ÍNDICE DE TABLAS	III
ABREVIATURAS	IV
RESUMEN	V
INTRODUCCIÓN	VI
OBJETIVOS	VII
	Página
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES	1
1.1 Protocolo de Kioto	1
1.2 Gases de efecto invernadero	2
1.2.1 Bióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	3
1.2.2 Metano (CH <sub>4</sub> )	3
1.2.3 Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O)	4
1.2.4 Halocarbonos y compuestos relacionados	4
1.2.5 Hexafluoruro de azufre (SF <sub>6</sub> )	5
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS	7
2.1 Biomasa	7
2.1.1 Producción de energía a partir de biomasa	8
2.1.2 Proceso de densificación	9
2.1.3 Proceso de hidrólisis	11
2.1.4 Proceso de metanización	12
2.1.5 Proceso de pirólisis	13
2.1.6 Proceso de gasificación	14
2.2 Residuos sólidos urbanos	15
2.2.1 Composición de los residuos sólidos	15
2.2.2 Manejo de los residuos sólidos	15
2.2.2.1 Generación	17
2.2.2.2 Almacenamiento	18
2.2.2.3 Recolección	19
2.2.2.4 Disposición final	20

2.2.2.5 Costos	20
2.2.3 Tratamiento de los residuos sólidos	21
2.2.3.1 Rellenos sanitarios	21
2.2.3.2 Compostaje	23
2.2.3.3 Incineración	24
2.2.3.4 Regla de las tres erres	26
2.3 Degradación aerobia	29
2.4 Degradación anaerobia	30
2.4.1 Proceso microbiológico y bioquímico de la degradación anaerobia	30
2.4.2 Fase no metanogénica	31
2.4.3 Fase metanogénica	35
2.4.4 Influencia de los parámetros ambientales y de control	35
2.5 Biogás	38
2.5.1 Plantas generadoras de biogás a partir de residuos orgánicos	39
2.5.2 Tratamientos de limpieza del biogás	39
2.5.2.1 Remoción del dióxido de carbono	40
2.5.2.2 Remoción del agua	40
2.5.2.3 Remoción del H <sub>2</sub> S	40
2.5.2.4 Remoción de trazas	41
2.5.3 Compresión y almacenamiento del biogás	43
2.5.4 Aprovechamiento del biogás	43
2.6 Tipos de digestores	43
2.6.1 Digestor por lote (régimen estacionario o batch)	44
2.6.2 Digestor de régimen continuo	45
2.6.3 Digestor de régimen semicontinuo tipo indio y tipo chino	45
2.6.4 Digestor horizontal de desplazamiento	48
2.6.5 Otros tipos de digestores	49
2.7 Diseño de un digestor	49
2.7.1 Factores a considerar para la selección de un digestor	49
2.7.2 Estudio de factibilidad	50
2.7.3 Dimensionamiento un digestor	51
2.7.3.1 Cálculo del volumen de un digestor	51

2.7.3.2 Almacenamiento de lodo digerido	51
2.7.3.3 Producción de biogás y dimensiones del almacenamiento	52
2.7.3.4 Relación de las dimensiones de un digestor	52
2.7.3.5 Sistema de bombeo para la alimentación o recirculación	52
CAPÍTULO 3 ESTUDIO DEL CASO	54
3.1 Estructura	55
3.2 Sitio de instalación	56
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	58
4.1 Cálculos de diseño	58
4.1.1 Digestor	59
4.1.2 Lodo digerido	62
4.1.3 Almacenamiento	62
4.1.4 Purificación del biogás	62
4.2 Componentes de la estructura	64
4.2.1 Digestor	64
4.2.2 Sistema de alimentación	65
4.2.3 Sistema para el tratamiento del biogás	66
4.2.4 Sistema para regular la presión y almacenar el biogás	67
4.2.5 Sistema de conexiones	68
4.2.6 Sistema de combustión del biogás	70
4.2.7 Sistema para el manejo del lodo digerido	70
4.3 Estructura final	70
4.4 Arranque y operación del sistema	72
4.4.1 Inóculo	73
4.4.2 Preparación de la alimentación	73
4.4.3 Generación de Biogás y encendido del quemador	74
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES	75
ANEXO DIFUSIÓN Y DONACIONES DEL PROYECTO	77
BIBLIOGRAFÍA	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1	Ciclo de la biomasa	7
FIGURA 2.2	Transformaciones energéticas de la biomasa	8
FIGURA 2.3	Procesos termoquímicos y productos obtenidos de la biomasa	9
FIGURA 2.4	Pellets de madera	10
FIGURA 2.5	Foto y Diagrama de la estufa con boiler trasero de pellets de madera	11
FIGURA 2.6	Proceso de metanización	13
FIGURA 2.7	Manejo de los residuos sólidos urbanos	17
TABLA 2.8	Sistema de celdas utilizado en los rellenos sanitarios	23
FIGURA 2.9	Clasificadores de residuos	28
FIGURA 2.10	Degradación anaerobia de la materia orgánica	32
FIGURA 2.11	Dependencia de la constante de crecimiento de la temperatura	36
FIGURA 2.12	Diseño OLADE-Guatemala	45
FIGURA 2.13	Digestor tipo Indio	46
FIGURA 2.14	Digestor tipo Chino	47
FIGURA 2.15	Digestor horizontal de desplazamiento	48
FIGURA 3.1	Boceto de la estructura	55
FIGURA 3.2	Boceto de la ubicación de la estructura	56
FIGURA 4.1	Digestor	64
FIGURA 4.2	Triturador	65
FIGURA 4.3	Sistema de alimentación	65
FIGURA 4.4	Filtro para quitar el ácido sulfhídrico	66
FIGURA 4.5	Filtro para quitar la humedad	66

Figura 4.6	Bolsas elásticas	67
Figura 4.7	Plancha de yeso	68
FIGURA 4.8	Manómetro y medidor de consumo de gas	68
FIGURA 4.9	Diagrama de conexiones del sistema de alimentación y recirculación	68
FIGURA 4.10	Sistema de alimentación y recirculación	69
FIGURA 4.11	Tubería de interconexión entre los sistemas	69
FIGURA 4.12	Sistema de combustión del biogás	70
FIGURA 4.13	Esquema de la estructura	71
FIGURA 4.14	Fotografía de la torre	71
FIGURA 4.15	Preparación de la alimentación del digestor	73
FIGURA 4.16	Torre en funcionamiento	74
FIGURA 4.17	Quemador encendido	74



## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1	Los gases de efecto invernadero y algunas de sus características	6
TABLA 2.1	Producción de energía primaria, 2001-2011	8
TABLA 2.2	Composición típica del gas producto de la gasificación	15
TABLA 2.3	Generación de residuos sólidos por tipo de residuo, 2000 y 2009	18
TABLA 2.4	Generación de residuos sólidos urbanos por tipo de localidad	18
TABLA 2.5	Recolección de residuos urbanos	19
TABLA 2.6	Instalaciones controladas y su capacidad de almacenamiento	20
TABLA 2.7	Instalaciones no controladas y su capacidad de almacenamiento	20
TABLA 2.8	Composición normal de un compost de residuos urbanos	24
TABLA 2.9	Procesos de incineración de los residuos urbanos	25
TABLA 2.10	Composición básica del biogás	39
TABLA 2.11	Opciones más comunes de almacenamiento del biogás	43
TABLA 4.1	Valores obtenidos en la caracterización de la biomasa.	58
TABLA 4.2	Características de una planta piloto de la Universidad de Venecia, Italia.	59

## **ABREVIATURAS**

ATP: Adenosina trifosfato

EPA: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos

CHP: Sistema que combina calor y potencia eléctrica

CFCs: Clorofluorocarbonos

CoA: Coenzima A

Conacyt: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

G-8: Reino Unido, Francia, Rusia, Alemania, Estados Unidos, Japón, Italia y Canadá

GEI: Gases de efecto invernadero

HBFCs: Hidrobromofluorocarbonos

HFCs: Hidrofluorocarbonos

HP: Caballos de fuerza

IE-EE: Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones

IPCC: Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático

MUAC: Museo Universitario de Arte Contemporáneo

MUCA: Museo Universitario de Ciencias y Arte

NADH: Dinucleótido de nicotinamida y adenina

NPT: (National pipe thread) rosca americana cónica para tubos

OLADE: Organización Latinoamericana de Energía

PEAD: Polietileno de teraftalato

PEBD: Polietileno de baja densidad

PET: Tereftalato de polietileno

PFCs: Perfluorocarbonos

PP: Polipropileno

PS: Poliestireno

PVC: Cloruro de polivinilo

REDOX: Reacción de reducción-oxidación

SENER: Secretaría de Energía de México

RSO: Residuos sólidos orgánicos

SOx: Óxidos de azufre

ST: Sólidos totales

STF: Sólidos totales fijos

STV: Sólidos totales volátiles

SEMARNAT: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales

TRH: Tiempo de retención hidráulica

UAQ: Universidad Autónoma de Querétaro

V: Volumen

VCO: Velocidad de carga orgánica

## RESUMEN

Esté proyecto permitió la construcción de un digestor de 4.5 m<sup>3</sup> aproximadamente, para el tratamiento de los desechos orgánicos urbanos producidos por un restaurante de la Ciudad Universitaria, con una producción de residuos sólidos orgánicos urbanos de 69.16 L/día, el digestor propuesto se mantuvo en un rango de temperaturas entre 20 y 35°C mayormente en el rango psicofílico, con una producción diaria aproximada de 6.09 m<sup>3</sup> de biogás y un porcentaje de 56% de CH<sub>4</sub>, es decir 3.41m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>, un TRH de 65 días. Para la purificación del metano producido, se emplearon dos filtros, uno de H<sub>2</sub>S con una capacidad de 1 kg de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y un filtro para quitar la humedad conformado por un tubo en forma de serpentín de acero. El biogás producido se almacenaba en dos bolsas de geomembrana de 1.0 mm de espesor color negro con capacidad de 3m<sup>3</sup>. El biogás se empleó para quemarlo en la parte superior de la torre, en un quemador QA-11 y un consumo de 9.500 BTU/hora a 1 psi.

El proyecto tuvo la difusión en 2 programas de radio, 4 canales de televisión, 40 páginas de Internet, 5 periódicos, 3 ruedas de prensa y 1 catálogo.

La estructura del sistema tuvo una altura de 7 m de altura, un tanque de 5,000 L, un quemador del biogás con un sistema giratorio de luz óptica y un control de presión estricto de biogás. La estructura fue expuesta por tres meses en la explanada del MUAC para ser vista por la comunidad universitaria y la sociedad.

Actualmente la planta de biogás se instaló en el restaurante “El Cibarium” para degradación de los desechos de comida y su conversión a biogás para ser utilizado como gas doméstico y con él se preparen los alimentos.

## INTRODUCCIÓN

En México, 6 de cada 10 personas de entre 18 y 65 años de edad no participan en ningún asunto ambiental y reconocen que no existe motivación para separar la basura que generan, esto, de acuerdo con la Primera Estadística Básica sobre Medio Ambiente que elaboró el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) a nivel nacional.

Los datos arrojan que en promedio, en el país se generan 800 gramos de basura por persona, pero en el Distrito Federal se alcanzan los dos kilos. En tanto, al día se recolectan unas 86 mil 343 toneladas de residuos que se generan principalmente en viviendas, parques, jardines y edificios públicos. Carlos Guerrero, director general de Geografía y Medio Ambiente del INEGI, destacó que solo 11 % de la basura que se genera es separada desde su lugar de origen, lo que no ocurre con el 89 %.

Durante 2010 ocurrieron 20 mil 495 muertes a causa de la contaminación atmosférica en México, de los cuales alrededor de 17 mil 500 fueron adultos mayores de 50 años, señaló el Instituto para Métricas de Salud y Evaluación (IHME, por sus siglas en inglés) de la Universidad de Washington. En tanto, datos del Instituto Nacional de Ecología indican que en México, entre 2001 y 2005, alrededor de 38 mil personas murieron por cáncer de pulmón, enfermedades cardiopulmonares e infecciones respiratorias relacionadas con la exposición a la contaminación atmosférica. Así lo señaló en el Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas 2000-2009, en el cual indica que estos efectos suponen costos considerables para la sociedad. Por ejemplo, refiere, cifras del Instituto Nacional de Estadística y Geografía indican que la contaminación atmosférica representó los mayores costos ambientales en 2009, al ubicarse en 520 mil 300 millones de pesos, lo que equivale a 4.4 % del producto interno bruto.

Refiere que en el valle de México las normas del bióxido de azufre y de monóxido de carbono se cumplen y se observa una clara tendencia decreciente en sus concentraciones, pero aún no se cumplen los límites de la norma del ozono y las PM10 partículas suspendidas son un problema.

La obra de Tue Greenfort comprende proyectos relacionados con la concientización del daño que se genera a nuestro entorno por nuestros desechos y ha realizado múltiples obras referenciadas a este problema. Este proyecto llamado “Energía Residual” surgió de la idea de la concientización de la basura en México. Durante un viaje de investigación a la ciudad de México, visitó distintos sitios para el tratamiento y confinamiento de la basura, que representan una importante fuente de contaminación ambiental por su alta generación de gases de efecto invernadero. Con el propósito de llamar la atención sobre la elevada concentración de gas metano emitida en estos sitios, la idea del artista fue diseñar un faro para la explanada del MUAC en Ciudad Universitaria, la cual se puede iluminar a partir de la combustión del biogás producido por la descomposición de residuos orgánicos.

La realización de este proyecto fue posible gracias a la colaboración entre la UNAM y el Goethe-Institut Mexiko, así como al apoyo de diversas iniciativas privadas y públicas. Nuestra colaboración en este proyecto consistió hacer posible la producción de biogás, en torno a esto se establecen los objetivos de este trabajo.

## OBJETIVO GENERAL

Realizar el diseño, construcción, arranque y operación de un prototipo bioenergético empleando residuos sólidos orgánicos urbanos.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Producir biogás empleando residuos sólidos orgánicos urbanos.

Concientizar a las personas acerca de la contaminación empleando una obra artística.

Procesar los residuos orgánicos contaminando menos.

Desarrollar el proyecto dejando elementos de referencia para posteriores investigaciones.

Aplicar los conocimientos obtenidos en diferentes asignaturas de la carrera iniciando el desarrollo de la ingeniería aplicada.

## **CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES**

### **1.1 PROTOCOLO DE KIOTO**

En diciembre de 1997 más de un centenar de países se reunieron en Kioto con el fin de alcanzar un acuerdo para reducir las emisiones de gases contaminantes que causan el efecto invernadero. En este acuerdo, 39 países desarrollados se comprometieron a que en el periodo 2008-2012 sus emisiones contaminantes fueran un 5.2% inferiores a las de 1990. Las cuotas fijadas para cada país fueron un 60% para Japón, un 7% para Estados Unidos y Canadá y un 8% para los miembros de la Unión Europea (Muños y Cuesta, 2010). En general establece un calendario de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, en función de las emitidas por cada país. Los gases en cuestión son los siguientes seis:

-Dióxido de carbono CO<sub>2</sub>

-Metano CH<sub>4</sub>

-Óxido nitroso N<sub>2</sub>O

-Carburos hidrofluorados HFC

-Carburos perfluorados PFC

-Hexafluoruro de azufre SF<sub>6</sub>.

El gas que más tiene impacto en las mediciones es el CO<sub>2</sub>, ya que supone aproximadamente el 80% de todas las emisiones de gases efecto invernadero.

Según la Agencia Europea de Medio Ambiente, el sector energético es responsable del 80% de las emisiones totales de gases efecto invernadero en la Unión europea, debido al protagonismo que tienen los combustibles fósiles.

Esas emisiones son creadoras del cambio climático, cuyas consecuencias ya incluyen inundaciones más frecuentes y más costosas, sequías y otros fenómenos climáticos extremos que están afectando a los recursos hídricos, los ecosistemas, la agricultura y la salud humana. Probablemente no hay que irse muy lejos ni en el espacio ni en el tiempo para poner imágenes a estas advertencias. Mayor eficiencia energética y un incremento del uso de las energías renovables son vistos por la Agencia Europea de Medio Ambiente como parte de la solución.

Para cumplir con lo establecido en el Protocolo de Kioto, la Unión Europea en su conjunto debe reducir esas emisiones en un 8% en 2010 respecto a las de 1990, que se toma como año base. Pero España, por su menor desarrollo relativo, no tiene que reducirlas sino que puede aumentarlas hasta un 15% en ese mismo período. Los últimos datos, no obstante, demuestran que el aumento de emisiones de gases efecto invernadero en España está

acelerado y se aleja de ese compromiso año tras año. Según el informe anual que elabora Comisiones Obreras y la revista World Watch, esas emisiones, en CO<sub>2</sub> equivalente (todos los gases se traducen a CO<sub>2</sub> para utilizar una sola medida), aumentaron un 3.55% en el año 2004 respecto a 2003. Lo que supone que el incremento desde 1990 alcanza ya el 45.6%. Es decir, el triple del 15% permitido. El último aumento anual ha sido grande debido al mayor consumo de energía primaria, un 4.1% más, y al mal año hidráulico. Así la producción hidroeléctrica en 2004 fue un 23.2% inferior a la del año 2003, por lo que las centrales térmicas tuvieron que funcionar más horas.

Aunque algunos críticos con este tratado internacional siempre mantuvieron la esperanza de que el Protocolo acabaría olvidado en un cajón, además que entre otras cosas porque Estados Unidos, el mayor emisor de gases de efecto invernadero del planeta, siempre se ha negado a ratificarlo, Kioto entró en vigor el 16 de febrero de 2005. Era preciso que fuera ratificado por un mínimo de 55 países, que sumaran el 55% de las emisiones de los países industrializados, y se consiguió cuando Rusia dijo sí, en septiembre de 2004. Es cierto que desde su nacimiento, en 1997, el Protocolo de Kioto ha ido perdiendo parte de su esencia primigenia para lograr nuevas adhesiones. Pero no lo es menos que es el único acuerdo internacional de envergadura sobre este tema y que, más allá de sus limitaciones, puede marcar un cambio de tendencia en un problema que, hasta la fecha, no ha hecho más que agravarse.

Otros países, como India y China, sí han ratificado el Protocolo de Kioto pero, por el momento, no tienen que asumir compromisos vinculantes de limitación de sus emisiones, debido a su menor nivel de desarrollo. El propio Protocolo establece en uno de sus principios inspiradores que la mayor parte de responsabilidad del problema recae en los países desarrollados. Por tanto, son ellos los primeros que deben dar ejemplo.

A estas alturas no faltan científicos que siguen arremetiendo contra lo que consideran posturas excesivamente alarmistas en torno al cambio climático. Para tener una visión más objetiva, se han unido las academias de ciencias de medio mundo. En junio de 2005, aprovechando la proximidad de la reunión de los líderes del G-8, las academias de ciencias del Reino Unido, Francia, Rusia, Alemania, Estados Unidos, Japón, Italia y Canadá, junto a las de Brasil, China e India, tres países emergentes y grandes emisores de gases efecto invernadero, hicieron pública una declaración en la que alertan de la necesidad de tomar medidas efectivas para frenar el cambio climático (Saura, 2003; Mosquera y Merino, 2006).

## **1.2 GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI)**

En la naturaleza, billones de toneladas de carbono en forma de CO<sub>2</sub> son emitidas a la atmósfera anualmente por medio de los procesos naturales (fuentes) y son absorbidas por los océanos y la biomasa viviente (sumideros). Los flujos continuos más grandes ocurren entre la atmósfera y la biota terrestre y entre la atmósfera y el agua de la superficie de los océanos. En la atmósfera, el carbono existe predominantemente en forma oxidada: el dióxido de carbono. Este gas forma parte del ciclo global del carbono, por lo que su destino es una función compleja de diversos procesos geoquímicos y biológicos. El tiempo de vida del CO<sub>2</sub> en la atmósfera es de 5 a 200 años. Las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera se incrementaron de 280 partes por millón en volumen (ppmv), en los tiempos

previos a la industrialización de 1750, a 367 ppm en 1999, es decir hubo un aumento de 31% (IPCC, 2001).

### **1.2.1 DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>)**

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) ha establecido que no hay duda alguna en que este incremento se debe en gran medida a las actividades humanas, particularmente aquellas relacionadas con la combustión de los energéticos fósiles, la deforestación y otros procesos de quema de biomasa. Así como a los que consumen energía, como es la producción de cemento, los cuales también emiten cantidades notables de dióxido de carbono. En su valoración científica, el IPCC estableció que la cantidad en que se incrementó la presencia del dióxido de carbono en la atmósfera se debe predominantemente a la oxidación de carbono orgánico por la quema de combustibles de origen fósil y la deforestación. El aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> a partir de la industrialización es espectacular comparado con las concentraciones relativamente estables de CO<sub>2</sub> (280 ± 10 ppm) de los milenios precedentes. El ritmo medio de aumento desde 1980 es de 0.4% anual. La mayoría de las emisiones durante los últimos 20 años se deben a la quema de combustibles de origen fósil; el resto (de 10 a 30%) proviene predominantemente de los cambios en el uso de la tierra, especialmente por la deforestación. El CO<sub>2</sub> es el gas de efecto invernadero dominante, debido a las actividades humanas, con un forzamiento radiativo actual de 1.46 W/m<sup>2</sup>, que representa 60% del total de los cambios en las concentraciones de todos los gases de efecto invernadero, muy resistentes, mezclados de manera homogénea en todo el planeta (Albritton y Meira, 2001).

Para el año 2100, los modelos del ciclo del carbono proyectan concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera entre 540 y 970 ppm. Para los escenarios ilustrativos del Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (IE-EE), estas concentraciones son mayores en 90 y 250%, respectivamente, que la registrada en 1750 (IPCC, 2001).

El efecto neto de las interacciones climáticas terrestres y oceánicas, según indican los modelos, es un aumento aún mayor en las concentraciones proyectadas de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, producto de una menor absorción de CO<sub>2</sub> por los océanos y los continentes.

### **1.2.2 METANO (CH<sub>4</sub>)**

Este gas se produce fundamentalmente por la descomposición anaerobia de la materia orgánica en los sistemas biológicos. Los procesos agrícolas como el cultivo del arroz inundado en agua, la fermentación entérica en los animales y la descomposición de los desechos de éstos, emiten metano, al igual que lo hace la descomposición de los desechos municipales. El metano (CH<sub>4</sub>) también se emite durante la producción y distribución del gas natural y del petróleo, y es liberado como subproducto en la extracción del carbón y en la combustión incompleta de los energéticos fósiles.

La concentración media global de metano en la atmósfera en 1994 fue de 1,720 partes por mil millones en volumen (ppmm), mostrando un incremento de 145% en relación con la concentración existente en el periodo previo a la industrialización 700 ppmm (IPCC, 1996).



En 1998, la concentración atmosférica era de 1,745 ppmm, con una tasa de cambio en la concentración de 7.0 partes por billón anual. El CH<sub>4</sub> tiene un tiempo de vida de 12 años y es eliminado de la atmósfera por reacciones químicas. El forzamiento radiativo directo actual del metano es de 0.48 W/m<sup>2</sup>, y representa 20% del total de los GEI (Albritton y Meira, 2001).

Se estima que de 60 a 80% de las emisiones actuales de metano provienen de las actividades antropogénicas. Los modelos proyectan cambios en la concentración de metano en la atmósfera entre los años 1998 y 2100, que oscilan entre -90 y +1970 partes por billón en volumen. Es decir, una variación de entre -11% y +112% de la concentración registrada en el periodo previo a la industrialización (IPCC, 2001).

### **1.2.3 ÓXIDO NITROSO (N<sub>2</sub>O)**

Los suelos agrícolas, especialmente aquellos que utilizan fertilizantes sintéticos y abonos; la combustión de energéticos fósiles, especialmente en vehículos; la producción de ácidos adípico y nítrico, el tratamiento de aguas residuales, la combustión de desechos y el quemado de biomasa, son las fuentes antropogénicas emisoras del óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). La concentración en la atmósfera de N<sub>2</sub>O en el periodo previo a la industrialización era de 270 ppmm. Para 1994, la cifra fue de 312 partes; es decir, un incremento de 13% atribuido a las actividades antropogénicas (IPCC, 1996), y en 1998 la concentración atmosférica era de 314 ppmm. El tiempo de vida del N<sub>2</sub>O en la atmósfera es de 114 años y una tasa de cambio en la concentración de 0.8 partes por billón en volumen. Su remoción de la atmósfera se realiza fundamentalmente por medio de la acción fotolítica de la luz solar en la estratosfera. El forzamiento radiativo se estima en 0.15 W/m<sup>2</sup>, equivalente a 6% del total de todos los gases de efecto invernadero (Albritton y Meira, 2001).

El N<sub>2</sub>O es un buen ejemplo de la interacción que existe entre las medidas de control que se instrumentan para reducir la contaminación local y su impacto en el cambio climático. La introducción de convertidores catalíticos en los vehículos motorizados, por una parte ayuda a reducir las emisiones de los precursores de ozono. Por otra parte, sin embargo, causa un aumento en las emisiones de óxido nitroso. Los modelos proyectan cambios en la concentración de N<sub>2</sub>O en la atmósfera entre los años de 1998 y 2100, que oscilan entre +38 y +144 ppmm. Es decir, una variación de entre +12% y +46% de la concentración registrada en el periodo previo a la industrialización (IPCC, 2001).

### **1.2.4 HALOCARBONOS Y COMPUESTOS RELACIONADOS**

Los halocarbonos son compuestos de carbono que contienen flúor, cloro, bromo o yodo. En su mayor parte son sustancias químicas producidas por el hombre y que tienen efectos directos e indirectos en el forzamiento radiativo. Los halocarbonos que contienen cloro (por ejemplo los clorofluorocarbonos o CFCs, metilcloroformo, y tetracloruro de carbono) y bromo (como los halones, bromuro de metilo y hidrobromofluorocarbonos o HBFCs) son sustancias que agotan el ozono de la estratosfera, y están controlados por el Protocolo de Montreal bajo el concepto de “sustancias que agotan la capa de ozono”.

Los halocarbonos controlados por el Protocolo de Kioto son los hidrofluorocarbonos (HFCs) y los perfluorocarbonos (PFCs). Los HFCs son gases utilizados para reemplazar las sustancias agotadoras de la capa de ozono y los PFCs se utilizan como productos intermedios en la fundición de aluminio que constituye la principal fuente, seguida de la fabricación de semiconductores.

La concentración del hidrofluorocarbono (HFC-23) ha aumentado más de tres veces entre 1978 y 1995; el tiempo de vida de este compuesto es de 260 años. Su concentración en 1998 fue de 14 partes por billón en volumen, y tiene una tasa de cambio de concentración de 0.55 partes por billón por año. Debido a que las concentraciones actuales son relativamente bajas, la contribución de los HFCs al forzamiento radiativo es relativamente modesta, al igual que la de los hidroclorofluorocarbonos (HCFCs) (IPCC, 2001).

Los perfluorocarbonos (PFCs) como el perfluorometano ( $\text{CF}_4$ ) y el perfluoroetileno ( $\text{C}_2\text{F}_6$ ), tienen tiempos de residencia atmosférica extremadamente largos y absorben gran cantidad de radiación infrarroja. Por lo tanto, estos compuestos, aún en cantidades relativamente reducidas, tienen la posibilidad de influir sobre el clima hasta un futuro muy lejano.

El  $\text{CF}_4$ , permanece en la atmósfera 50,000 años como mínimo. Su concentración en el periodo previo a la industrialización fue de 40 partes por billón en volumen (ppb), en 1998 ascendió a 80 ppb, y tiene una tasa de cambio en concentración de 1 ppb por año. Las emisiones antropogénicas actuales superan a las naturales por un factor de mil o más, y son responsables del aumento observado. Se proyecta que el  $\text{CF}_4$  aumentará su concentración en la atmósfera entre los años 1998 y 2100 hasta 200 y 400 ppb (IPCC, 2001).

### **1.2.5 HEXAFLORURO DE AZUFRE ( $\text{SF}_6$ )**

El hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ) es un gas de efecto invernadero 22,200 veces más eficaz que el  $\text{CO}_2$  por unidad de masa (kg). Este gas se utiliza como aislante en interruptores y equipos eléctricos. Es generado también por fugas en procesos de fabricación de algunos semiconductores y manufacturación de magnesio. Las concentraciones actuales en la atmósfera son muy bajas (del orden de 4.2 ppb). Sin embargo, tienen una tasa de cambio de concentración importante de 0.24 ppb por año. Se proyecta que el  $\text{SF}_6$  alcanzará concentraciones atmosféricas en el periodo de 1998 a 2100 de entre 35 y 65 ppb (IPCC, 2001).

En el año 2000, la suma de las emisiones de HFCs, PFCs, y  $\text{SF}_6$ , en Estados Unidos, fue de 121.3 Tg de  $\text{CO}_2$  equivalente. Es decir, un incremento de 29.6% respecto a la cifra de 1990 de 93.6 Tg de  $\text{CO}_2$  equivalente (EPA, 2002).

En la Tabla 1.1 se muestran algunas características de los gases efecto invernadero.

Tabla 1.1 Los gases de efecto invernadero y algunas de sus características (IPCC, 2001)

VARIABLE	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	HFC-23	CF <sub>4</sub>	SF <sub>6</sub>
Concentración en el periodo previo a la industrialización (1750)	280 ppm	700 ppmm	270	0 ppb	40	0
Concentración en 1998	365 ppm	1745 ppmm	314 ppmm	14 Ppb	80 ppb	4.2 ppb
Tasa de cambio en concentración	1.5 ppm/año	7.0 ppmm/año	0.8 ppmm/año	0.55 Ppb/año	1 Ppb/año	0.24 Ppb/año
Tiempo de vida en la atmósfera (años)	5 - 200	12	114	260	>50,000	3,600
Forzamiento radiativo (W/m <sup>2</sup> )	1.46	0.48	0.15	0.002	0.003	0.002
Potencial de calentamiento global	1	23	296	12,000	5,700	22,200

Nota: La abundancia de gases traza en la atmósfera se indica aquí como la fracción molar (proporción de mezcla molar) del gas en relación con el aire seco (ppm, partes por millón= 10<sup>-6</sup>; ppmm, partes por mil millones= 10<sup>-9</sup>; ppb, partes por billón= 10<sup>-12</sup>).

## CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS

### 2.1 BIOMASA

Es la cantidad de materia perteneciente a organismos vivos que hay en un ecosistema. Se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales (estiércol) que pueden ser convertidos en energía; o las provenientes de la agricultura (residuos de maíz, café, arroz, papas), del aserradero (podas, ramas, aserrín, cortezas) y de los residuos urbanos (aguas residuales, basura orgánica y otros).

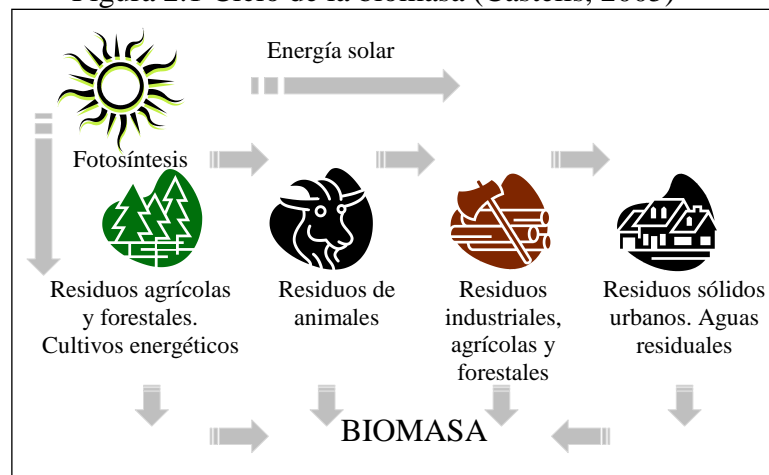
Puede medirse como peso fresco de organismos vivos; pero seco, cantidad de carbono, cantidad de proteínas, etc. Pero se requiere que sea un parámetro de medición relativamente fácil y que admita posibilidades de comparación entre los diferentes ecosistemas.

Al quemarse, la biomasa restituye parte de la energía solar absorbida por las plantas y otros organismos (ver Figura 2.1). La biomasa tiene una tasa de rendimiento muy baja, hasta el presente es una fuente de energía.

Los principales grupos en que se puede clasificar la biomasa pueden ser:

- Biomasa natural o la producida en los ecosistemas naturales, como los bosques.
- Biomasa residual o los subproductos derivados de las actividades agrícolas, ganaderas o forestales. También se incluyen en este grupo los materiales biodegradables como los efluentes ganaderos o los fangos de las depuradoras.
- Cultivos energéticos constituidos por aquellos vegetales que están destinados, exclusivamente, a su aprovechamiento energético.
- Biomasa primaria está constituida por los residuos y desechos agrícolas y forestales. Aunque también deberían incluirse los residuos ganaderos. Las exportaciones forestales dejan sobre el bosque gran cantidad de residuos (Deffis, 1991).

Figura 2.1 Ciclo de la biomasa (Castells, 2005)



## 2.1.1 PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE BIOMASA

Desde el punto de vista energético la biomasa se puede aprovechar de dos maneras ya sea quemándola para producir calor o transformándola en combustibles. En la Tabla 2.1 se muestra el consumo de energía proveniente de la biomasa en México.

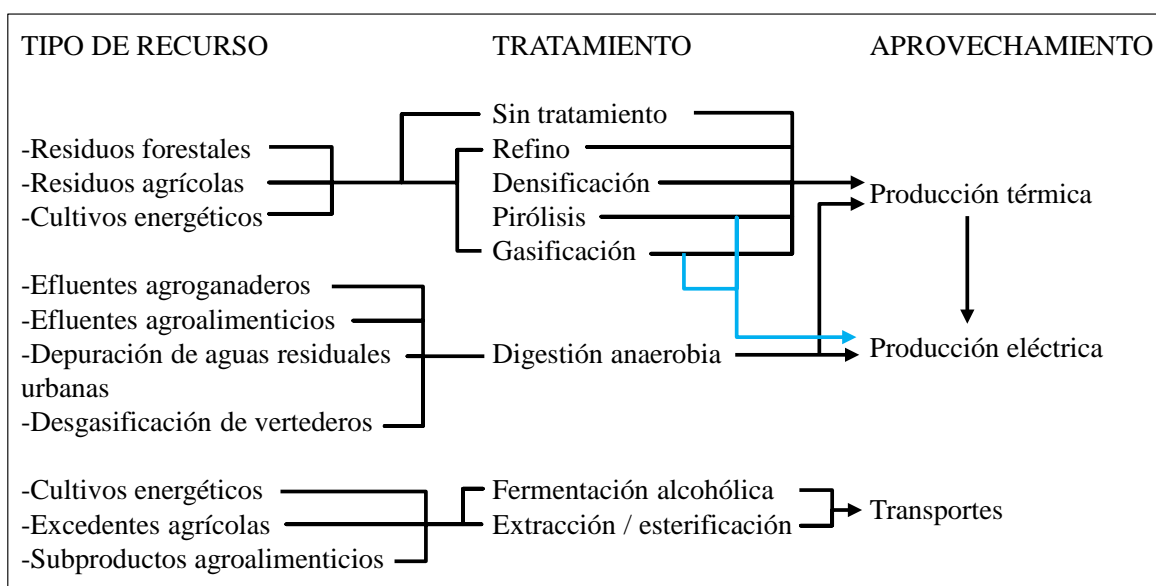
Tabla 2.1 Producción de energía primaria, 2001-2011 (Petajoules) (SENER, 2012)

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
<b>Total</b>	9,502.66	9,401.29	9,873.24	10,021.78	10,570.46	10,487.99	10,160.29	9,887.23	9,474.73	9,250.71	9,190.76
Carbon	174.23	141.97	147.91	138.95	200.62	222.27	246.97	211.84	222.18	241.28	290.96
Hidrocarburos	8,640.17	8,580.60	9,044.06	9,179.61	9,613.21	9,520.16	9,166.48	8,902.64	8,530.08	8,304.34	8,151.63
Petróleo crudo	6,811.69	6,798.98	7,228.47	7,432.56	7,573.78	7,304.40	6,923.36	6,520.85	6,058.73	6,008.64	5,933.53
Condensados	144.91	128.41	131.48	153.09	183.67	141.13	107.20	91.45	86.08	92.51	100.38
Gas natural	1,683.57	1,653.21	1,684.11	1,593.96	1,855.76	2,074.63	2,135.92	2,290.34	2,385.27	2,203.19	2,117.72
Nucleoenergía	96.70	106.97	114.87	100.63	117.88	119.42	114.49	106.64	112.75	63.94	106.39
Renovables	591.56	571.75	566.40	602.59	638.75	626.14	632.35	666.11	609.72	641.15	641.78
Hidroenergía	102.37	89.50	71.11	90.27	99.40	109.10	97.35	140.01	95.20	132.26	130.56
Geoenergía	125.84	123.89	134.58	149.01	165.36	151.45	167.74	159.86	152.69	149.94	149.29
Energía solar	2.18	2.43	2.79	3.10	2.15	2.33	2.81	3.30	4.06	4.91	5.86
Energía eólica	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.19	0.93	0.95	7.24	4.46	5.93
Biogás	0.00	0.00	0.43	0.43	0.43	0.44	0.72	0.81	1.12	1.30	1.47
Biomasa	361.11	355.87	357.44	359.73	371.36	362.63	362.80	361.18	349.41	348.28	348.67
Bagazo de caña	94.02	89.63	90.41	93.08	104.93	98.03	99.56	99.13	88.73	88.97	90.58
Leña	267.09	266.24	267.03	266.65	266.43	264.60	263.24	262.05	260.68	259.31	258.09

La biomasa sólida puede destinarse a aplicaciones térmicas más o menos convencionales simplemente para producir calor quemándola. La biomasa líquida se puede destinar utilizándola en vehículos y los derivados gaseosos de la biomasa a la producción de electricidad en sistemas de cogeneración (Castells, 2005).

La Figura 2.2 muestra algunas de las principales transformaciones de la biomasa para su aprovechamiento.

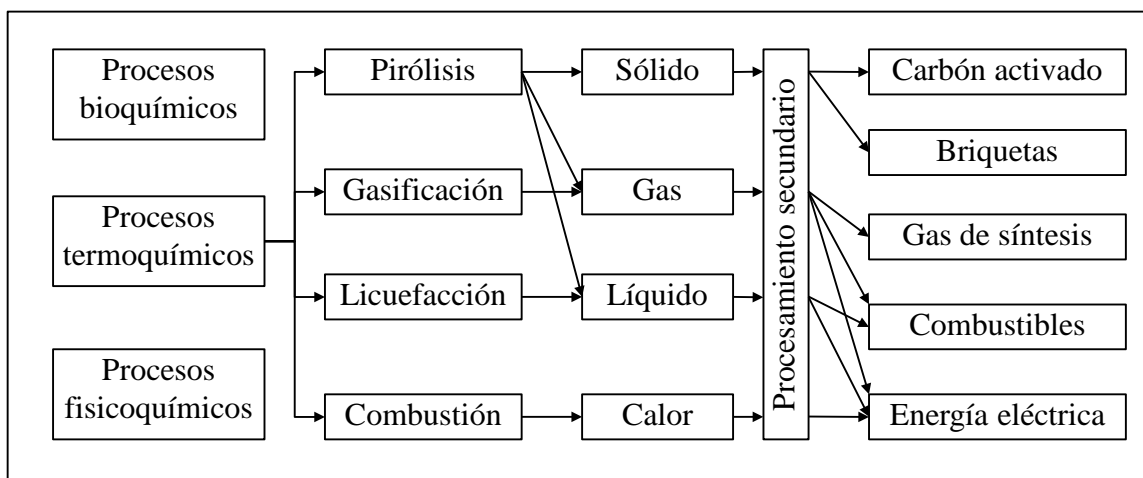
Figura 2.2 Transformaciones energéticas de la biomasa (Castells, 2005)



Para transformar la biomasa se pueden llevar a cabo varios procesos y estos procesos son de cuatro tipos:

- **Físicos.** Éstos son los procesos en los que se actúa físicamente sobre la biomasa e incluye al triturado, astillado, compactado e incluso secado.
- **Químicos.** Éstos son los procesos relacionados con la degradación química, generalmente mediante hidrólisis.
- **Biológicos.** Este proceso ocurre por la acción directa de microorganismos o de sus enzimas, generalmente llamado fermentación. Son procesos relacionados con la producción de ácidos orgánicos, alcoholes, cetonas y polímeros.
- **Termoquímicos.** En este caso la transformación química de la biomasa ocurre al someterla a altas temperaturas (300 °C – 1500 °C) por ejemplo pirólisis, gasificación, licuefacción y combustión (ver Figura 2.3).

Figura 2.3 Procesos termoquímicos y productos obtenidos de la biomasa (Gómez y col., 2008)



### 2.1.2 PROCESO DE DENSIFICACIÓN

Es un proceso físico, el cual consiste en prensar o compactar los residuos forestales y agroforestales para disminuir los espacios vacíos entre las partículas y dentro de las partículas. Cuando los productos son compactados en forma de gránulos con menos de 30 mm de diámetro son llamados pellets (Figura 2.4). Si cuentan con diámetros mayores, son llamados briquetas y los productos compactados no aglutinados son conocidos por bultos o pacas. Los pellets y las briquetas son empleados como combustible para quemadores, calentadores, estufas (Figura 2.5), etc. y tienen mayores ventajas que la madera o algún combustible fósil ya que son más baratos y producen menos contaminantes (SOx y dioxinas).

En la fabricación de briquetas la primera operación común a todos los procesos es el corte y/o la trituración de los desechos combustibles. En la tecnología rural simple, donde los materiales que hay que preparar son ramas y paja, el mejor instrumento para cortarlos es el hacha de mano o el hacha de carpintero. Para la producción en gran escala se requieren

diferentes instrumentos, como la máquina para cortar paja utilizada comúnmente por los agricultores.

La segunda operación consiste en el secado de los principales ingredientes combustibles. Cuando se aplica una tecnología simple, el secado debe realizarse sin utilizar combustible. Por lo tanto, la única opción real consiste en el secado natural en lugares bien ventilados protegidos de la lluvia. Este tipo de secado requiere mucho tiempo y en consecuencia los ingredientes básicos para la fabricación de briquetas deben prepararse con mucha anticipación.

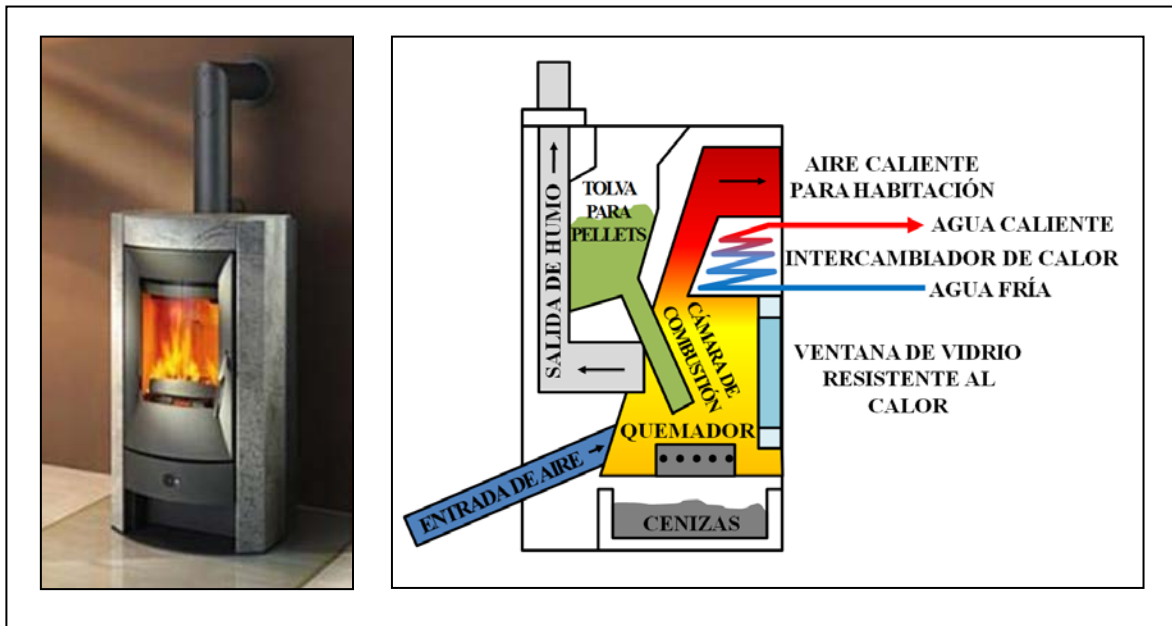
En tercer lugar, se mezclan los varios tipos de desechos y materiales aglutinantes para obtener una consistencia y un valor calorífico óptimos. Si se dispone de lubricante para motores usado se puede añadir a los desechos, pero, aunque aumenta el valor calorífico de las briquetas, las hace desmenuzabas. Por lo tanto, se debe añadir con mucha precaución. En algunos casos, para dar plasticidad al material, es necesario añadir un aglutinante húmedo o, tratándose del papel, mojarlo antes de someterlo a presión para obtener briquetas.

La cuarta operación consiste en comprimir las briquetas, y la quinta en secarlas al aire libre, bajo techado. Con apego a las condiciones del material aglutinante y del secado, se requerirán varios días y varios meses para obtener briquetas secas. El secado aumenta considerablemente el valor calorífico de las briquetas y, por lo tanto, ahorra combustible. Por consiguiente, las briquetas deberán producirse con bastante antelación al momento previsto para su uso (Janczak, 1981; Ritchie y Fern, 2004; Jenkins, 2010).

Figura 2.4 Pellets de madera (Jenkins, 2010)



Figura 2.5 Foto y diagrama de la estufa con boiler trasero de pellets de madera (Jenkins, 2010)



### 2.1.3 PROCESO DE HIDRÓLISIS

Es una reacción química que mediante la ruptura de ciertos enlaces y adición de agua a una sustancia compleja produce entidades químicas más sencillas. La hidrólisis puede realizarse por vía enzimática, en medio ácido o en condiciones alcalinas. Por regla general esta reacción es lenta y se precisa de activación de otros parámetros como el pH o la temperatura.

La reacción ácida de los ácidos o de las sales en solución, es debida a la presencia de iones hidrógeno; y la reacción básica de las bases o de las sales básicas en solución, es debida a la presencia de los iones oxidrilos. Una sal estequiométricamente neutra en solución, no dando origen ni a iones hidrógeno ni a iones oxidrilos, no debería dar ni reacción ácida, ni reacción básica. Pero no sucede así, pues algunas sales estequiométricamente neutras, dan solución, o reacción ácida, o reacción básica.

Las sales que se comportan de esta manera son principalmente aquellas que derivan de la combinación de ácidos fuertes con bases débiles, o de bases fuertes con ácidos débiles. Este fenómeno se llama hidrólisis. Así, por ejemplo, el sulfato de cobre y el acetato de sodio en la solución acuosa dan el primero reacción netamente ácida, y el segundo reacción netamente básica, aún siendo compuestos exactamente correspondientes a las fórmulas  $\text{CuSO}_4$  y  $\text{CH}_3\text{COONa}$  respectivamente, es decir, estequiométricamente neutros.

La hidrólisis es debida a la acción de los iones en que está disociada el agua. Por eso sucede que cuando se tiene una solución en agua de una sal neutra cualquiera, en la solución.



Además de los iones a los que la sal da origen, existen también, aunque en muy pequeña porción, los iones  $H^+$  y  $OH^-$ , debido a la disociación del agua. Si en la solución resulta que los iones  $H^+$  y  $OH^-$  están presentes en igual número, entonces la solución tiene reacción neutra. Pero si por el contrario prevalecen los iones  $H^+$ , la solución manifiesta reacción ácida; mientras que si prevalecen los iones  $OH^-$ , la solución manifiesta reacción alcalina.

En las soluciones de sales que sufren la hidrólisis sucede justamente que, en cierta proporción, o los iones  $OH^-$  o los iones  $H^+$ , desaparecen como tales dejando una prevalencia numérica de unos sobre los otros.

Los procesos hidrolíticos se realizan con menores concentraciones de ácido-base y en condiciones menos drásticas de presión y temperatura que las digestiones. Sin embargo, el tiempo de la hidrólisis puede ser prolongado a causa de sus condiciones de ejecución. Una buena forma de efectuar la hidrólisis ácida de proteínas es con HCl 6 M a 110 °C en un recipiente cerrado durante 24 horas. La degradación de proteínas por el método Kjeldahl generalmente se logra en 2 horas, con la acción del ácido sulfúrico concentrado y catalizadores a temperaturas superiores a los 338°C.

Cierto número de álcalis e iones de metales pesados catalizan la hidrólisis de una variedad de esteres orgánicos. Esta propiedad se ha utilizado para la aplicación de esta tecnología a la depuración de ciertas aguas residuales. Una medida fácil para seguir la potencial utilidad de una reacción de hidrólisis para la detoxificación de aguas residuales, es la fuerza de enlace del objeto de la hidrólisis. Cuanto más fuerte es el enlace, la hidrólisis es menos efectiva como tecnología de tratamiento. Básicamente la hidrólisis es una transformación química a un sustrato molecular el cual cambia de identidad, propiedades físicas y toxicidad del material de partida (Angiolani, 1960; Castells, 2000; Villegas y col., 2006).

#### **2.1.4 PROCESO DE METANIZACIÓN**

Consiste en transformar una parte de la fracción fermentable o putrescible de los residuos en gas metano para su posterior valorización. El principio de funcionamiento consiste en:

-Separación de la fracción fermentable. En principio el proceso se adapta a los denominados residuos húmedos como restos de comida, residuos de jardín, etc.

-Alimentación del residuo preparado al digester.

-El biogás generado (mezcla de metano y gas carbónico), se lava, se comprime y se almacena en un contenedor.

-El biogás puede servir de combustible para una unidad de cogeneración, o quemarse en una antorcha.

-La fracción residual (no gasificada), fango, se extrae por la parte inferior y es posible hacer compostaje (Castells, 2000).

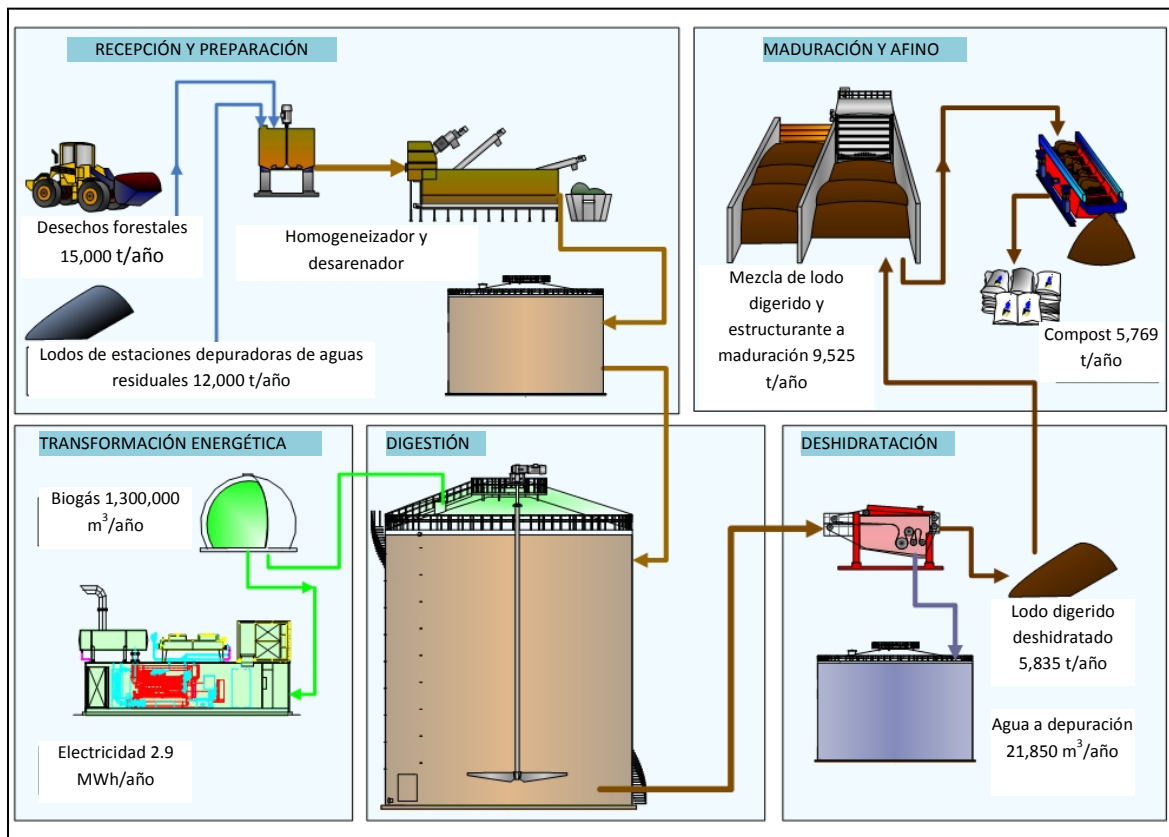
En la Figura 2.6 se muestra un ejemplo de una planta de metanización construida en Italia con las siguientes características:

Capacidad de 27,000 toneladas por año de residuos orgánicos

- Homogeneizador de 12.5 m<sup>3</sup>.
- Digestor de 1,900 m<sup>3</sup>.
- Régimen mesofílico a 37°C.
- Sistema de deshidratación con dos filtros de banda de 10 m<sup>3</sup>/h.
- Producción de biogás de 190 m<sup>3</sup>/h.

El biogás que se produce se emplea en la generación de energía eléctrica mediante un cogenerador de 225 kW. El tratamiento de lodos digeridos se realiza con compostaje aeróbico en silos volteados mecánicamente.

Figura 2.6 Proceso de metanización (ROSROCA, 2007)



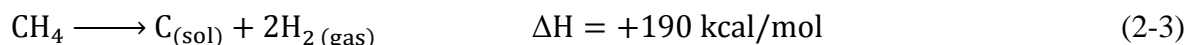
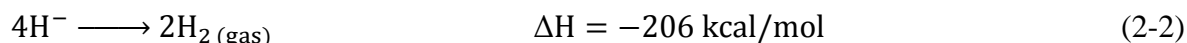
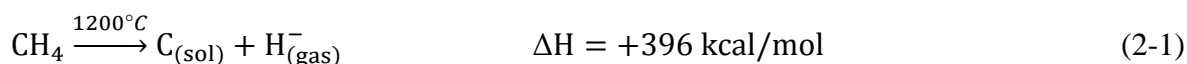
### 2.1.5 PROCESO DE PIRÓLISIS

La pirólisis es la degradación térmica o volatilización de la masa en ausencia de oxígeno y aire. A través de la variación de los parámetros del proceso de pirólisis como el tipo de biomasa, la temperatura máxima, las condiciones de la atmósfera de reacción, la tasa de

calentamiento y el tiempo de permanencia de los productos en el digestor, es posible influir en la distribución y características de sus principales productos.

El material sólido o carbonizado obtenido se puede utilizar como combustible en procesos industriales, en la cocción de alimentos no como materia prima para la producción de carbón activado. El gas producido se utiliza para la generación de energía mecánica y térmica o puede ser sintetizado para la producción de otros productos químicos. El producto líquido, también identificado como condensado o bioaceite, puede ser convertido en un combustible rico en hidrocarburos como condensado o bioaceite, puede ser convertido en un combustible rico en hidrocarburos para su combustión en motores y en la generación de energía mecánica y térmica (Gómez y col., 2008).

La pirólisis se produce con la formación y reajuste de radicales libres. Por ejemplo en el caso de la pirólisis del metano da carbono e hidrogeno (Yúfera, 1996)



La reacción es endotérmica; la rotura del enlace C-H exige temperaturas elevadas y consume 99 kcal/mol.

### 2.1.6 PROCESO DE GASIFICACIÓN

Es un proceso en el que se convierte, mediante oxidación parcial a temperatura elevada, una materia prima (generalmente sólida) en un gas con moderado poder calorífico. Normalmente se trabaja con un 25-30% de oxígeno necesario para la oxidación completa. Esta característica distingue a la gasificación de otros procesos termoquímicos como la combustión (oxidación completa, generalmente con exceso de oxígeno) y la pirólisis (descomposición térmica en ausencia de oxígeno).

En la gasificación, la energía química contenida en el sólido se convierte en energía química contenida en un gas. Este gas se puede utilizar en forma mucho más flexible como materia prima de procesos químicos como combustión en calderas, motores, turbinas o pilas de combustible (Castells, 2005).

Es un proceso termoquímico, de combustión incompleta en el cual se obtiene un gas combustible como producto principal. El agente gasificante influye en la composición del gas generado, en el caso del aire se genera un gas pobre por su bajo poder calorífico (4 - 7 MJ/m<sup>3</sup>) debido al alto contenido en nitrógeno, cuando se emplea oxígeno o vapor de agua se genera un gas llamado de síntesis que tiene un mayor poder calorífico (10 - 18 MJ/m<sup>3</sup>). La composición típica del gas producto de la gasificación se en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Composición típica del gas producto de la gasificación (Bernard y Gouze, 2004)

Componente	Contenido (% de volumen)
Monóxido de carbono, CO	20% – 25%
Hidrógeno, H	15% – 20%
Metano, CH <sub>4</sub>	1% – 2%
Dióxido de carbono, CO <sub>2</sub>	10 %– 12%
Nitrógeno, N	48% – 50%

## 2.2 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Dependiendo de sus características, los residuos se clasifican en:

-Sólidos urbanos, principalmente originados en las viviendas, oficinas, jardines y comercios

-Peligrosos, por representar alto riesgo para la salud y el medio ambiente,

-De manejo especial, generados en procesos productivos que no reúnen las características de peligrosos o de residuos sólidos urbanos. Tales como los residuos generados por las actividades pesqueras, agrícolas, ganaderas, los provenientes de aguas residuales, desechos de tiendas departamentales, residuos de la construcción, residuos de la industria informática, de productos electrónicos y de vehículos automotores.

Por definición los residuos son resultantes de la descomposición o destrucción de un objeto, parte o porción que queda de un objeto. La palabra sólidos se refiere a las partes sólidas y a los sólidos que se encuentran en suspensión en líquidos y gases. Por ejemplo el polvo; la palabra urbanos se refiere a lo proveniente de la ciudad.

Los residuos sólidos urbanos se dividen en dos grandes grupos, los orgánicos y los inorgánicos. Los orgánicos son todos aquellos de origen biológico, que en algún momento tuvieron vida; es decir, todo aquello que nace, vive, se reproduce y muere. Los inorgánicos están constituidos por materiales no biodegradables: vidrio, papel, plástico, metales, etc.

### 2.2.1 COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

La composición cambia según varios elementos, pero depende esencialmente las siguientes situaciones:

#### 1) Nivel de vida

El crecimiento del nivel de vida produce aumento de la basura, en relación a los empaques, botes, plásticos, papeles, cartones, por el contrario, este factor disminuye los residuos de alimentos, verduras y cenizas. Una prueba de ello es que el índice de producción de residuos inorgánicos en Estados Unidos, es tres veces mayor que el de México. Al mismo

tiempo, en Estados Unidos el porcentaje de residuos orgánicos alcanza solamente el 30% de la producción total por habitante y por día y en México llega al 50%.

#### 2) Estación del año

Como es lógico, en verano se producen más residuos de verduras y fruta y en invierno más botellas de vidrio, latas y envolturas.

#### 3) Modo de vida de la población

En la actualidad, el modo de vivir de la población, en los grandes edificios de departamentos o casas habitación, es muy diferente del antiguo, donde habían pequeñas casas y todos los productos se preparaban personalmente y se consumían muchas verduras naturales.

#### 4) Zonas

Depende de la zona en que se produzcan los residuos. En las zonas turísticas, el turista no produce el mismo tipo de residuos que cuando se encuentra en su vida habitual.

#### 5) Según día de la semana

Los residuos producidos los días laborales no tienen la misma composición que en los fines de semana (Deffis, 1991).

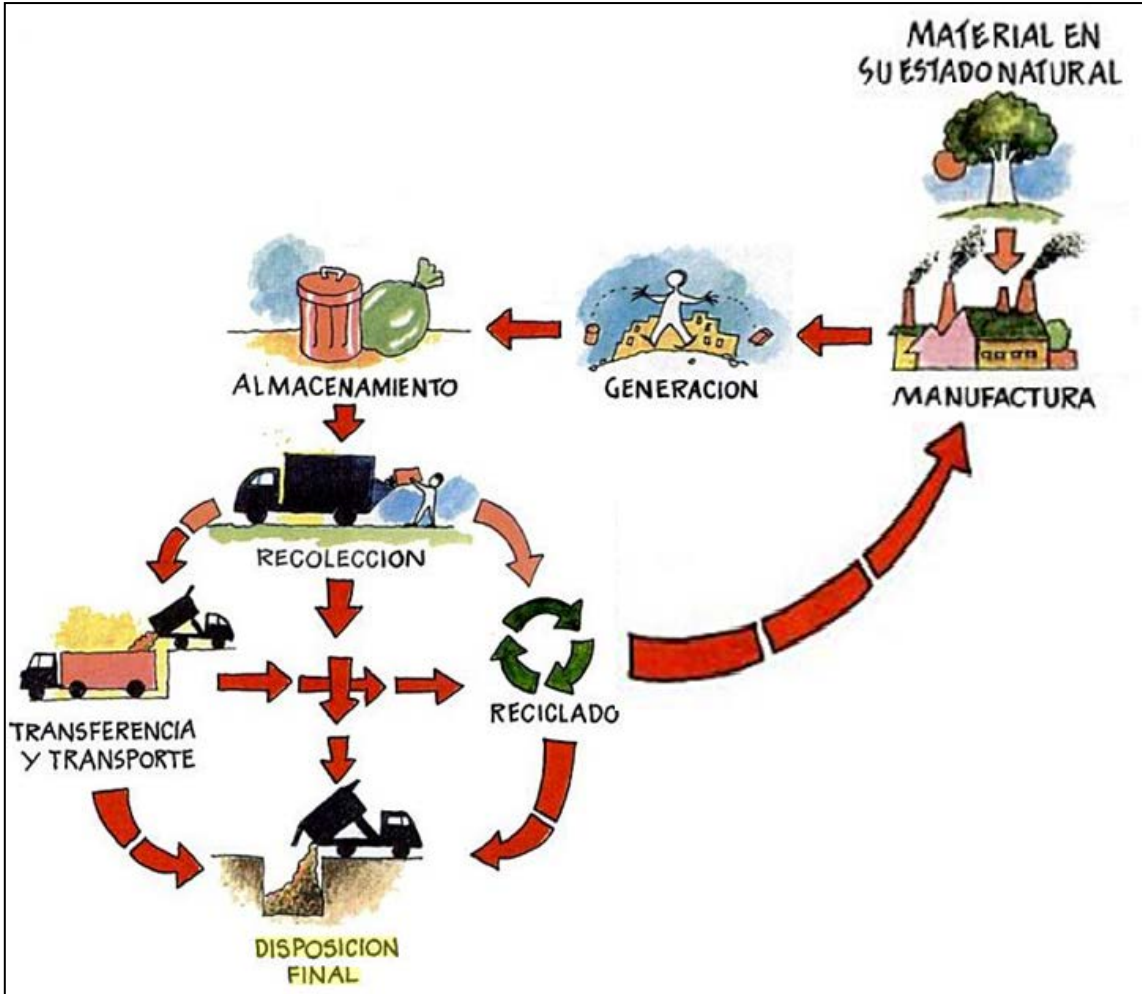
### **2.2.2 MANEJO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS**

En el mundo se producen actualmente unos cuatro millones de toneladas de basura doméstica, urbana e industrial, que con una media densidad de 200 (kg/m<sup>3</sup>), equivale a 20 millones de metros cúbicos. Un 30% de estos residuos se entierra y el resto ya constituye un serio problema desde el punto de vista ecológico, higiénico, sanitario, político, social, económico. Ya que el costo de la recolección, transporte y eliminación es cada vez más caro, en virtud de que se desaprovecha el potencial energético de estos residuos.

Los desechos sólidos se caracterizan por ser materiales que han perdido valor o utilidad para sus propietarios y se convierten en un estorbo. Son clasificados de acuerdo a su origen de generación: Domiciliarios, comerciales, industriales y de servicios.

El proceso de los desechos sólidos tiene su punto de partida en la generación de estos materiales orgánicos e inorgánicos, que una vez utilizados por el hombre pierden su utilidad o su valor y son tirados al bote de basura. Es decir son almacenados en espera de ser recolectados por el servicio de limpia que los concentra en los vehículos recolectores y los transporta a las estaciones de transferencia, donde los residuos se vacían en camiones con cajas de gran capacidad para llevarlos a sitios de disposición final, que es el lugar donde se depositan para compactarlos y construir así el relleno sanitario, este ciclo se puede ver en la Figura 2.7.

Figura 2.7 Manejo de los residuos sólidos urbanos (Modificado de Campos, 2003)



### 2.2.2.1 GENERACIÓN

México ocupa uno de los primeros lugares en la generación de residuos sólidos de América Latina. La producción per cápita varía de acuerdo con la zona geográfica y con el grado de desarrollo. La generación de residuos sólidos urbanos continúa aumentando. Mientras que en 2000 se producían 30.7 millones de toneladas, en 2009 aumentó a 38.3, lo que implica un incremento de casi un millón de toneladas por año.

En 2009, residuos orgánicos como los restos de comida, de jardines y otros materiales similares representan poco más del 52.4% del total de desechos urbanos. Mientras que otro tipo de residuos, entre los que se encuentran los residuos finos y los pañales desechables, redujeron su participación de 18% en 2000 a 12.1% en 2009. El papel y el cartón integran el 13.8% de los residuos; el vidrio representa el 5.8% y los metales el 3.4 %, la generación de residuos por tipo de residuo se muestra en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Generación de residuos sólidos por tipo de residuo, 2000 y 2009 (SEMARNAT, 2010)

Año	2000	2009
	(miles de toneladas)	
Total	30,732	38,323
Papel, cartón, productos de papel	4,324	5,300
Textiles	458	548
Plásticos	1,346	4,173
Vidrios	1,813	2,253
Metales	891	1,318
Desechos de comida, de jardines y materiales orgánicos similares	16,104	20,090
Otro tipo de desechos (residuos finos, pañales desechables, etc.)	5,796	4,641

La generación de residuos inorgánicos, como los plásticos, ha aumentado considerablemente en los últimos ocho años: mientras en el año 2000 sólo representaban el 4.4% de los residuos sólidos urbanos, en 2009 han incrementado su participación al 10.8%. La cantidad de los residuos en la Ciudad de México ha aumentado en las últimas décadas: mientras en 1950 se generaban diariamente 0.37 kilogramos por persona, en la actualidad se estima que cada uno habitante genera un promedio de 1.4 kilogramos de residuos al día.

En el Distrito Federal se generan diariamente más de 12,000 toneladas de residuos, lo que aproximadamente equivale a llenar el Estadio Azteca en tres meses. Si se considera la zona conurbada del Estado de México, actualmente la Zona Metropolitana del Valle de México genera 21,000 toneladas diarias de residuos. La mayor generación de residuos sólidos sale de nuestras casas. Se estima que de los hogares proviene el 47% del total de los desperdicios, de los comercios el 29%, de los servicios el 15%, de los controlados el 3% y de otras actividades el 6%. La generación de residuos sólidos por localidad se muestra en la Tabla 2.4 (SEMARNAT, 2010).

Tabla 2.4 Generación de residuos sólidos urbanos por tipo de localidad (SEMARNAT, 2010)

Año	1997	2009
	(miles de toneladas)	
Zonas Metropolitanas	111,168	18,030
Ciudades medias	11,826	13,231
Ciudades pequeñas	1,898	2,503
Localidades rurales o semiurbanas	4,380	4,561
TOTAL	129,272	38,325

### 2.2.2.2 ALMACENAMIENTO

El almacenamiento domiciliario de la basura se da en condiciones por lo regular inadecuadas, ya que los recipientes varían demasiado: Bolsas de papel, plástico, cajas de

cartón, botes de lámina, madera o plástico y recipientes hechos para tal fin. Ésto propicia la presencia de insectos, malos olores y filtraciones de líquidos escurridos de la basura.

Igualmente, el lugar donde se coloca la basura es, por lo regular impropio, generalmente la cocina, puesto que no se dispone de espacio suficiente. La frecuencia con que se tira la basura también es importante, ya que después de cierto tiempo los desechos orgánicos entran en descomposición y pueden dañar la salud de los habitantes de la casa. Además, la mezcla de los desechos orgánicos e inorgánicos hace que se dificulte posteriormente el rescate de materiales reutilizables (Deffis, 1991).

### 2.2.2.3 RECOLECCIÓN

La recolección de los desechos sólidos, su transporte y disposición final es un servicio que reduce riesgos de salud pública, mejora la imagen urbana y aminora el impacto ambiental. Del total de los residuos sólidos que se generan en el Distrito Federal alrededor del 94% es recogida y trasladada al relleno sanitario. El resto se arroja en barrancas y lotes baldíos de manera clandestina. La recolección de basura está a cargo de las Delegaciones. Una amplia red de carritos atiende el barrido de calles y 2,097 camiones hacen un promedio de dos viajes diarios para concentrar los desperdicios en 13 estaciones de transferencia. En estas estaciones los residuos se vacían en cajas remolcadas por tractocamiones y finalmente son llevados al relleno sanitario Bordo Poniente. (Herrera, 2004). En la Tabla 2.5 se muestran las toneladas diarias que se recolectan en México por cada estado.

Tabla 2.5 Recolección de residuos urbanos (SEMARNAT, 2010)

Entidad Federativa	1998	2009	Entidad Federativa	1998	2009
	(Toneladas diarias)			(Toneladas diarias)	
Aguascalientes	673	1,011	Nayarit	447	688
Baja California	2,013	3,562	Nuevo León	3,625	5,262
Baja California Sur	294	542	Oaxaca	1,387	1,970
Campeche	509	590	Puebla	3,300	4,440
Coahuila	1,390	2,236	Querétaro	888	1,489
Colima	301	478	Quintana Roo	559	1,099
Chiapas	1,794	2,758	San Luis Potosí	1,352	1,772
Chihuahua	2,319	3,230	Sinaloa	1,818	2,313
Distrito Federal	10,986	12,707	Sonora	1,498	2,046
Durango	903	1,219	Tabasco	1,062	1,512
Guanajuato	2,988	4,291	Tamaulipas	1,885	2,661
Guerrero	1,660	2,121	Tlaxcala	535	800
Hidalgo	1,176	1,573	Veracruz	4,160	4,842
Jalisco	4,900	7,046	Yucatán	992	1,441
México	11,709	14,551	Zacatecas	624	926
Michoacán	2,114	2,605	Nacional	70,835	95,121
Morelos	971	1,340			

### 2.2.2.4 DISPOSICIÓN FINAL



Del total de los residuos generados terminan en rellenos sanitarios, sitios controlados y sitios no controlados, es decir en tiraderos a cielo abierto, lo que representa un peligro para la salud pública y el patrimonio ecológico pues contamina los mantos freáticos mediante la filtración de los lixiviados a través de los suelos, ensucia los ríos y lagos, valles y montañas y los campos de cultivo e impide el desarrollo de la vida en muchos ecosistemas. Sin embargo, es notorio en la ciudad de México y en otras del interior de la república que la capacidad instalada y el equipo mecánico y humano son insuficientes para mantener limpia la ciudad. Por esta razón, surgen los tiraderos clandestinos en vías y lugares públicos y en terrenos baldíos donde cotidianamente se depositan los residuos.

En el Distrito Federal se concentra casi la octava parte de los residuos sólidos que se generan en todo el país. Esta enorme cantidad de basura es causa de graves desequilibrios ambientales que para la mayoría de los habitantes de la ciudad son desconocidos. Actualmente los residuos generados en el Distrito Federal son depositados en el Relleno Sanitario de Bordo Poniente. Recientemente fue clausurado el Relleno Sanitario de Santa Catarina por llegar a su límite de espacio. La identificación de nuevos espacios para la disposición adecuada de los residuos constituye un serio problema, es muy importante cuidar que esta instalación no se realice en zonas de recarga del acuífero (SEMARNAT, 2010).

En la Tabla 2.6 se muestran las cantidades de instalaciones controladas y su capacidad de almacenamiento y en la Tabla 2.7 se muestran las instalaciones no controladas y su capacidad de almacenamiento.

Tabla 2.6 Instalaciones controladas y su capacidad de almacenamiento (SEMARNAT, 2010)

Año	Rellenos sanitarios		Rellenos de tierra controlados		Sitios controlados	
	Número	Capacidad (miles de ton.)	Número	Capacidad (miles de ton.)	Número	Capacidad (miles de ton.)
1997	46	10,270	51	1,657	97	11,927
2010	186	24,910	20	3,330	206	28,240

Tabla 2.7 Instalaciones no controladas y su capacidad de almacenamiento (SEMARNAT, 2010)

Año	Sitios no controlados		Sitios no controlados más reciclaje	
	Número	Capacidad (miles de ton.)	Número	Capacidad (miles de ton.)
1997	-	16,655	-	17,345
2010	-	10,123	-	10,123

### 2.2.2.5 COSTOS

El manejo de los residuos sólidos ocupa una parte importante de los impuestos. Su recolección y disposición final representa elevados costos. El Gobierno del Distrito Federal y las delegaciones gastan aproximadamente 1,500 millones de pesos al año en la prestación de estos servicios. La UNAM paga 128,000 pesos al bordo de huipulco (Castro, 2009).

### 2.2.3 TRATAMIENTOS DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

El tratamiento de desechos sólidos se define como el conjunto de operaciones físicas, químicas, biológicas o térmicas, que tienen la finalidad de reutilizar los desechos, disminuir o eliminar su potencial peligro, o adaptar sus propiedades físicas, químicas o biológicas a los requerimientos de su disposición final. Por otra parte, la disposición final de los desechos sólidos es la operación controlada y ambientalmente adecuada del manejo de los desechos. Existen diferentes vías o alternativas para disponer los residuos sólidos, unos de los más comunes son los rellenos sanitarios, también conocidos como vertederos controlados, el compostaje y la incineración.

### **2.2.3.1 RELLENOS SANITARIOS**

El buen funcionamiento de un relleno sanitario depende, en gran medida, de la metodología de operación que se escoja. Existen varios métodos desarrollados con base en la experiencia de campo, a saber: Método de trinchera, métodos de área y método de depresión.

#### **-Método de trinchera**

El método de trinchera se utiliza cuando se tiene un adecuado depósito de material de cubierta y el nivel freático está a suficiente profundidad. La operación del relleno comienza en la excavación de una porción de trinchera, el material excavado se amontona en un terraplén, puesto que luego es utilizado como material de cubierta. Los desechos se colocan en la trinchera, distribuidos en capas finas y compactados, hasta que se alcance el nivel previamente fijado. Los desechos deben quedar cubiertos al final del día, sin importar el nivel que se haya alcanzado.

#### **-Método de área**

El método denominado de área, se utiliza cuando el terreno no es apto para la excavación de trincheras. La operación del relleno comienza con la construcción de un dique de tierra, contra el cual los desechos son colocados en capas finas, las cuales se compactan a medida que se van depositando, hasta que se alcance un espesor de bloque de desecho de unos dos o tres metros. Posteriormente, se coloca una capa de 15 a 30 cm de material de cobertura; la cual debe colocarse al terminar la jornada diaria, aunque no se alcance el espesor de bloque antes mencionado. Cada bloque de desechos compactado constituye una celda, las cuales se colocan una sobre la otra, hasta que se alcance la altura de diseño.

#### **-Métodos de depresión**

El método de depresión, como su nombre lo indica, se utiliza en sitios en donde se encuentran depresiones naturales o artificiales que pueden ser utilizadas para relleno sanitario. La técnica de depósito de los desechos en estos sitios depende de las características geométricas, del tipo de material de cubierta, las condiciones hidrológicas, así como geológicas, y las condiciones de acceso.

Una vez que se diseñe el método de operación del relleno, se debe definir un plan general de operación, cuyos principales componentes son: La distribución del sitio y un horario

eficaz. Se deben considerar aspectos tales como caminos de acceso, los cuales han de ser transitables todo el año, sitios de disposición para los desechos especiales, las aéreas de relleno, y sitios para almacenar el material de cubierta. Deberían existir, además, áreas de servicio básico para los empleados y lugares de descanso, así como instalaciones adecuadas para el mantenimiento de los equipos (Campos, 2003).

### **-Producción de gases y lixiviados en un relleno sanitario**

Una vez que los desechos son colocados en el relleno, se producen diferentes procesos:

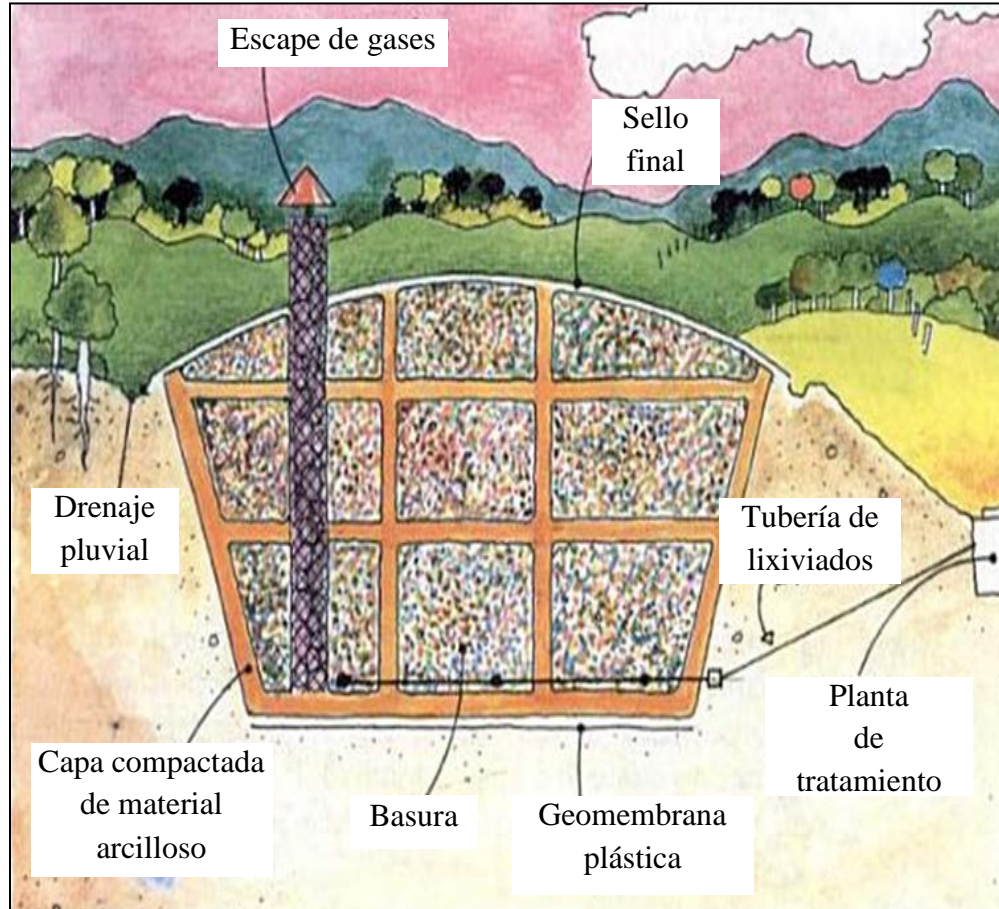
- La generación de gases y líquidos producto de la descomposición bacteriana de materia orgánica.
- Oxidación química de los desechos, la disolución y el lixiviado de la materia orgánica producto de la acción del agua (escurrimiento superficial).
- Circulación de lixiviados y líquidos producto de las diferencias de nivel en el terreno, de la diferencia en concentraciones y por ósmosis.
- Asentamientos de diferenciales causados por la consolidación del material de las celdas.

Los procesos anteriores forman gases y lixiviados dentro de los rellenos sanitarios, los cuales deben ser controlados y tratados. Se producen diferentes tipos de gases, siendo los más importantes el dióxido de carbono y el metano; también se encuentran amoníaco, monóxido de carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno. La mayoría de los gases escapan a la atmósfera; sin embargo, se pueden encontrar concentraciones de algunos de ellos, superiores al 40%, a distancias que alcanzan hasta 120 m de los límites del relleno. El metano puede ser lanzado a la atmósfera en forma controlada, puesto que, de lo contrario, éste se puede acumular en sitios cerrados o construcciones cercanos al relleno, puesto que el metano posee una densidad menor que la del aire. Contrariamente, el dióxido de carbono, con una densidad aproximadamente 1.5 veces mayor que la del aire, permanece con mayor frecuencia en los alrededores del relleno o en el mismo sitio, circulando cerca del fondo, manteniéndose concentraciones altas de dióxido de carbono en las capas más bajas del relleno por varios años. La circulación de gases dentro del relleno se controla por medio de la construcción de conductos o barreras. Los conductos controlan el movimiento lateral de gases; éstos se construyen con materiales permeables, principalmente grava, cuyo espaciado depende del ancho de la celda. Los movimientos verticales del gas se controlan por medio de tubos perforados en una capa de grava en el fondo del relleno.

El gas se puede recuperar para la producción de energía, en cuyo caso se construyen pozos de colección. Los lixiviados son líquidos que se forman dentro del relleno sanitario, producto de la filtración del agua de lluvia, de la descomposición de la materia orgánica y el agua que poseen los desechos. Los líquidos circulan dentro del relleno, por lo que arrastran materiales suspendidos y disueltos, lo que hace que los lixiviados sean aguas residuales de alto valor contaminante, y es importante drenarlas para tratarlas posteriormente en algún sistema de tratamiento. Los lixiviados circulan en forma descendente hacia el fondo, aunque podrían, según las condiciones de los materiales, circular lateralmente. Es importante, por ello, proteger el terreno con algún tipo de material impermeabilizante cuando

las condiciones del terreno sean permeables, puesto que el riesgo de infiltración y posterior contaminación de las aguas subterráneas con lixiviados es alta en tal situación. Los aspectos anteriormente mencionados se muestran en la Figura 2.8 (Campos, 2003).

Figura 2.8 Sistema de celdas utilizado en los rellenos sanitarios (Campos, 2003)



### 2.2.3.2 COMPOSTAJE

Los desechos sólidos tienen una porción importante de materia orgánica. El compostaje consiste en la degradación bioquímica de dicha porción; con un producto final de un material similar al humus, el cual es utilizado como acondicionador del terreno o fertilizante.

El proceso del compostaje lo realizan en su mayoría microorganismos, los cuales necesitan de un buen medio ambiente para desarrollarse. Por lo que el éxito del proceso del compostaje radica en proporcionarle a los microorganismos todas las condiciones necesarias para su supervivencia. En el inicio del proceso del compostaje, los microorganismos predominantes y responsables de la gran mayoría de la actividad de descomposición es la flora mesofílica, cuyo rango de tolerancia de temperatura es entre los 25 °C y 45 °C. A medida que se incrementa la actividad microbiana, la temperatura de la mezcla se eleva, surgiendo los microorganismos termofílicos, cuyo rango de tolerancia de temperatura es superior a 45 °C. De lo anterior, se concluye que la temperatura es siempre

un indicador de la actividad bioquímica que está sucediendo dentro de la masa de basura. Además de la temperatura, otros indicadores de la eficiencia del proceso son la cantidad de nutrientes disponibles para que los microorganismos sobrevivan y se reproduzcan, la humedad y el pH de la mezcla de compost.

El proceso de compostaje tiene limitaciones en su ejecución, los cuales son:

- a) La composición de los desechos. Como se mencionó anteriormente, el proceso del "compost" se logra gracias a la acción de los microorganismos, que degradan la materia orgánica. La eficacia del proceso depende de la cantidad de nutrientes que tengan los desechos; asimismo, se debe tener cuidado de tóxicos que perjudiquen a los microorganismos. En la Tabla 2.8 se muestra la composición normal de un compost de residuos urbanos.
- b) La disponibilidad del terreno, puesto que para tener una planta de compostaje de cierto tamaño, se necesita espacio para su operación.
- c) Necesidad de otro método de disposición final, para los desechos no orgánicos, especiales o peligrosos (Campos, 2003).

Tabla 2.8 Composición normal de un compost de residuos urbanos (Seoáñez, 2000)

Materia orgánica total	35.00% - 40.00%
Materia orgánica oxidable	8.00% - 10.00%
P total	0.30% - 0.50%
N total	0.50% - 0.60%
K total	0.20% - 0.30%
CaO	6.50% - 7.50%
Mn total	0.01% - 0.02%
Oligoelementos	0.01% - 0.20%

### 2.2.3.3 INCINERACIÓN

La incineración es un proceso de combustión destinado a consumir los residuos sólidos urbanos, fracciones o rechazos procedentes de separación de fases y tratamientos previos, provocando la reducción de los desechos a dióxido de carbono y otros gases, cenizas y a una porción de desechos no combustibles. Los cuales se depositan junto con las cenizas en un relleno sanitario, mientras que los gases son liberados a la atmósfera. Se recuperan, además, los materiales reutilizables.

El proceso de incineración debe ser diseñado de manera que se produzca la menor cantidad de residuos no combustibles y de controlar la emisión de gases contaminantes. En algunos casos se puede realizar un proceso simple o se puede recuperar energía, como se indica en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9 Procesos de incineración de los residuos urbanos (Seoáñez, 2000)

Materia prima	%	Residuo final
Residuo urbano crudo	100%	Ninguno Energía calorífica a energía eléctrica Escorias Gases
Rechazos combustibles procedentes de la separación y recuperación de fracciones	35% - 60%	Ninguno Energía calorífica a energía eléctrica Escorias Gases
Rechazos combustibles de procesos de afino	10% - 20%	Ninguno Energía calorífica a energía eléctrica Escorias Gases

La incineración es aconsejable como sistema en cualquiera de los siguientes casos:

- Climatología adversa gran parte del año
- Se dispone de poco territorio
- Si el suelo es caro
- Si existen problemas graves de paisaje
- Si la energía es cara en la zona
- Si existe mucha demanda de energía
- Si es una parte de un tratamiento integral de residuos urbanos.
- Si no existe un fuerte rechazo social al procedimiento
- Si resulta rentable la instalación, por otros motivos.

La incineración se está utilizando intensamente en los países de la Unión Europea por algunas de las causas antes mencionadas, siendo el caso de España diferente debido a estas mismas causas, y sobre todo a las últimas, al haberse politizado el tema y al haberse erigido en bandera de determinados grupos político-sociales. El sistema debe considerarse, bajo los puntos de vista técnico, ecológico, económico y social, y después de los correspondientes análisis, es cuando se debe decidir su viabilidad en cada caso.

La incineración del residuo urbano recibe una materia prima compuesta por las siguientes fracciones:

- **Fracciones no combustibles:** metales, vidrio, otros inertes
- **Fracciones combustibles:** papel, cartón, gomas, textiles, madera, plásticos

En principio, los rechazos de una combustión de este tipo, que consisten en escorias, cenizas, humus, e inertes, pueden suponer del 15 al 40% del total de la materia prima inicial. Las instalaciones variarán si se va a producir sólo vapor para calefacción (baja presión), o si se va a necesitar vapor a alta presión para generar energía eléctrica. La incineración de los residuos urbanos, en lo que se refiere a emisiones, plantea una serio de problemas que han sido resueltos en gran parte como consecuencia de la presión social al respecto (Seoánez, 2000)

### **2.2.3.4 REGLA DE LAS TRES ERRES**

Una herramienta que evalúa el impacto ambiental total involucrado en la fabricación de un producto o envase, desde su origen hasta su fin realiza un balance entre los flujos de entrada y salida de material y energía durante la totalidad de su ciclo de vida, es el "Análisis del Ciclo de Vida". En el que se consideran aspectos como la extracción de materia prima, uso de recursos renovables y no renovables, procesos productivos del envase, emisiones contaminantes, contribución al efecto invernadero, destrucción de la capa de ozono, transporte, almacenamiento, uso de agua y energía y, finalmente, la eliminación o aprovechamiento de los residuos. Por lo tanto, es importante que haya menos residuos que enterrar o incinerar. Es aquí donde toma importancia la regla de las tres erres:

- Reducir la cantidad de residuos (envoltorios)
- Reciclar los residuos que se generan (papeles y latas)
- Reutilizar los artículos que lo permitan (vidrios, ropa).

### **REDUCIR**

Los envases, embalajes y envoltorios constituyen casi el 80% de la fracción inerte de la basura o, lo que es lo mismo, cerca del 40% de los desechos de la bolsa de residuos. Además, cuando se compran muchos productos envueltos con elegancia, se paga entre un 10 y un 20% más de lo que el producto costaría sin ese embalaje. Por lo tanto, reducir el envoltorio es buen negocio ecológico y económico. Esta reducción en la cantidad de residuos se conoce como "prerreciclaje".

### **RECICLAR**

Se entiende por reciclaje a la recogida y separación de materiales de los residuos y su posterior procesamiento para producir bienes comercializables. Hasta el momento, el reciclaje no ha conseguido llegar a ser económicamente rentable, salvo con la excepción de las latas de aluminio. Lamentablemente, todavía el reciclaje es caro, aunque, por la combinación de una tecnología que baje los precios y de un aumento de los costos de las materias primas, es probable que en un futuro cercano sea un buen negocio. Ésto llevó a un punto crítico en Estados Unidos, en 1991, cuando la mayoría de las empresas dejaron de pagar por el vidrio verde. En el costo del reciclaje, influyen tres factores:

1. La energía
2. La factoría
3. La mano de obra empleada en la recogida, clasificación y proceso del material. La energía y la planta dañan generalmente al medio ambiente, mientras que la mano de obra no.

Separar los residuos domésticos en el mismo lugar donde se generan, es decir, en el propio hogar, permite tratar posteriormente a cada uno de ellos por separado en forma más exitosa. Existen en el mundo muchos modelos distintos de separación doméstica de residuos,

propios de cada sociedad y cultura. Los elementos a considerar como aptos para separar son: Vidrio, plásticos, papel y cartón, y los metales.

#### **a) Vidrio**

El reciclado del vidrio ahorra dinero, materia prima, energía y espacio en los vertederos. Por cada 1,000 Kg. de vidrio que se recicla, se ahorran 30 Kg. de petróleo y 1.200 Kg. de materias primas. El procedimiento es sencillo y sólo requiere una previa separación del tipo de botellas por color: Verde, ámbar y blanco. Además, una botella retornable de gaseosa se puede rellenar más de 50 veces antes de que se rompa y se funda para hacer nuevas botellas.

#### **b) Plástico**

Los tipos de plástico se clasifican en siete grupos, con códigos específicos. Éstos son:

1. Polietileno Terftalato (PET);
2. Polietileno de alta densidad (PEAD);
3. Cloruro de Polivinilo (PVC);
4. Polietileno de baja densidad (PEBD);
5. Polipropileno (PP);
6. Poliestireno (PS);
7. Otros plásticos.

En Alemania, se requiere separar los envases de plástico en cinco clases: Botellas, film, envases termo-formados, embalajes de espuma, y laminados plásticos. El plástico es reciclable, aunque generalmente se trata de que, una vez reciclado, no se utilice en la industria alimenticia, ya que no siempre es de la mejor calidad. De todas maneras, es muy útil para la construcción de cualquier elemento de la vida cotidiana (sillas, cubre lámparas, teléfonos, etc.). Uno de los principales problemas del plástico es su tiempo de vida, ya que no son biodegradables en lapsos humanos, por lo que fundirlos para reciclarlos es importante ecológicamente. La empresa que tiene la mayor participación del mercado de incineración y plantas de desecho y energía del Japón anunció que un proceso para convertir los desechos plásticos en querosene por 50 yens el litro. A fines de 1997 habría estado finalizada la construcción de una planta piloto en Yokohama, para manejar una tonelada de plásticos por día.

#### **c) Papel y Cartón**

Las ventajas de reciclar papel son:

1. Ecológicas

Para fabricar una tonelada de papel se requieren cerca de 17 a 20 árboles, los cuales tardaron en crecer más de diez años cada uno. Además casi 1,800 kg de madera, se emplean entre 85,000 y 90,000 litros de agua y se consumen 8,140 Kw hora de energía eléctrica. Por otra parte, en el proceso de fabricación se producen una serie de contaminantes atmosféricos, como ácido sulfhídrico y dióxido de azufre (algunos de los que generan la lluvia acida), contaminantes del agua y aproximadamente también 80 kg de residuos sólidos (en parte como polvos). Ésto implica no sólo una importante polución atmosférica, sino también un consumo de agua equivalente al



de una familia durante 3 ó 4 meses, y de electricidad, equivalente al consumo de una familia durante 16 a 27 meses. Asimismo, reciclando se ahorra, en la producción de cada tonelada de papel, un 82% del agua empleada, un 50% de la energía eléctrica y se evita la tala de 9 árboles.

2. Económicas

Los ahorros, al disminuir sensiblemente el consumo de agua y energía, son considerables en términos de dinero. Por cada tonelada producida de papel reciclado, disminuye el costo en 700 dólares.

3. Sanitarias

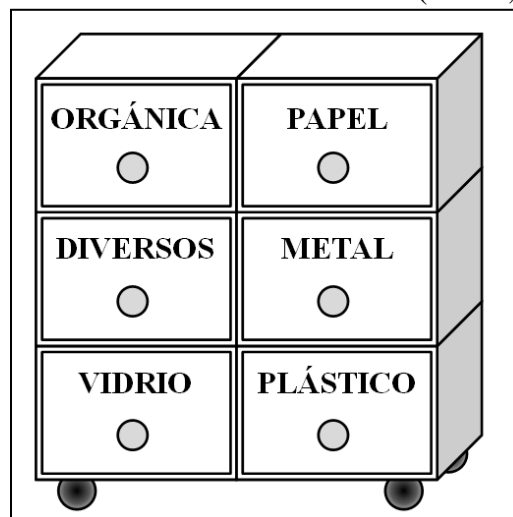
El predio de disposición final será utilizado en forma más eficiente, dejando lugar para los residuos más fáciles de reciclar por la naturaleza.

Sin embargo, no por ser reciclado es absolutamente limpio o ecológico, ya que, aunque el proceso de blanqueo del papel se realiza con dióxido de carbono, cloro puro u otros productos (generalmente oxígeno y agua oxigenada) utilizados para el blanqueo de la pasta (destintado), generan subproductos tóxicos.

**d) Metales**

Dentro de los metales se encuentran básicamente dos tipos: Las chatarras férricas y las no férricas, como las latas de aluminio. Las férricas tienen distintas calidades. Las de primera calidad son las provenientes de desguaces de autos o barcos, que se utilizan para la producción de acero. Las de segunda son las resultantes de residuos recogidos en forma doméstica, como las latas de conservas, aunque, desde el punto de vista de la recuperación, son las más importantes. Las latas de aluminio, ya sea de gaseosas o de cerveza, en una proporción cercana al 45%, son las más codiciadas, debido a que su recuperación es muy rentable. Una forma para reciclar los residuos es separándolos y ponerlos en un contenedor con compartimentos o separaciones como el mostrado en la Figura 2.9 de forma que sea más fácil llevar a cabo el reciclaje.

Figura 2.9 Clasificadores de residuos (Deffis, 1991)



## **REUTILIZAR**

Generalmente no se estimula tanto la reutilización como el reciclaje. Un buen ejemplo para determinar si es más ventajoso utilizar botellas que pueden reciclarse o botellas reutilizables es el siguiente. Se ha realizado un estudio, en Gran Bretaña, mostrando qué pasa cuando un consumidor en Plymouth tira un envase de cerveza o gaseosa en el contenedor de vidrio. El vidrio, convertido en calcín, o chatarra de vidrio fragmentado, puede llevarse a uno de los cuatro centros de reciclaje del país en un viaje de por lo menos 300 Km. Allí, el calcín es fundido y mezclado con materias primas para producir nuevas botellas. El uso de una proporción de calcín en el proceso de producción permite ahorrar sustanciales cantidades de materias primas, energía y agua. La nueva botella reciclada recorrerá una distancia de 100 Km. desde la fábrica a Sussex, donde se rellenará de cerveza. Desde allí, puede viajar otros 300 Km. a Shropshire, para ser vendida a otro consumidor, quien la llevará a su casa, la beberá y finalmente la depositará en otro contenedor para vidrio, donde comenzará nuevamente el proceso. Éste es un sistema de sentido único, donde el productor no se responsabiliza por el destino del embalaje.

Compárese esta odisea para reciclar la botella de cerveza, refresco, etc., con el caso de la leche entregada en botellas a su domicilio. La botella pertenece a una lechería que en la mayoría de las regiones recibe la leche de las áreas vecinas. En Gran Bretaña la entregan en la puerta del consumidor, a una distancia que raramente supera los 8 Km. de la lechería. Una vez vacía, el consumidor la enjuaga y la deja en la puerta de su casa, de donde es recogida y recorre nuevamente esos 8 Km. hasta la lechería; allí se lava, utilizando un 5% de la energía que hace falta para hacer una nueva botella, se rellena con leche y el ciclo vuelve a empezar. Éste es un sistema de "doble sentido", donde el productor tiene interés en prolongar la vida de la botella. Como media nacional, una botella de leche dura 17 viajes durante su vida, aunque en ámbitos rurales esta cifra puede llegar a los 70.

Los embalajes reutilizables son más convenientes para un sistema local de distribución, mientras que los envases reciclables sirven para un sistema con una base de operaciones más amplia. La cultura del "consumismo" nos lleva a utilizar vajilla y vasos desechables y reciclables, que se venden como "ecológicos", cuando existe la alternativa de los lavables y reutilizables (Otero, 2001).

### **2.3 DEGRADACIÓN AEROBIA**

Se produce en ella fermentaciones aerobias con consumo de oxígeno y de materia orgánica, siendo los residuos CO<sub>2</sub>, agua y lodos estabilizados.

Durante el proceso de nitrificación es muy intensa, y los organismos actuantes, al ser iguales que los de la depuración biológica, son bastante resistentes a contaminantes tóxicos. Este método es más económico que la degradación anaerobia respecto al costo de las instalaciones que se requieren para su tratamiento, pero los organismos patógenos se eliminan en menor cantidad.

## **2.4 DEGRADACIÓN ANAEROBIA**

El tratamiento de la fracción orgánica de los residuos urbanos mediante bacterias anaerobias se ha empleado para transformarla en una mezcla de gases combustibles, en la que predomina el metano. La fase sólida residual de este proceso tiene aplicación en agricultura como corrector de suelos. La aplicación de este método se ha realizado sobre la fracción orgánica de los residuos sólidos, obteniéndose una degradación del orden del 63% (Garrido, 1980).

La degradación anaerobia es un proceso biológico degradativo en el cual, parte de la materia orgánica contenida en un sustrato es convertida en una mezcla de gases, principalmente metano y dióxido de carbono, mediante la acción de un conjunto de microorganismos en ausencia de aceptores de electrones de carácter inorgánico ( $O_2$ ,  $NO_3$ ,  $SO_4$ ). Frente a los procesos aerobios, los tratamientos anaerobios presentan las ventajas de no necesitar aireación y de generar un biogás que puede ser recuperado y utilizado en la misma planta con finalidades energéticas, permitiendo en muchos casos la autonomía o autosuficiencia de las plantas de tratamiento. Otro aspecto muy ventajoso es que la generación de lodos es menor, por lo que también se reducen costos en el tratamiento y vertido de los lodos.

La degradación anaerobia es un proceso complejo, que requiere cierto control para asegurar su correcto funcionamiento. Un ejemplo de esto, es la sensibilidad a las sobrecargas orgánicas que pueden llevar a la desestabilización del proceso. El biogás generado suele estar contaminado con diferentes componentes, que pueden complicar el manejo y aprovechamiento del mismo y los costes de implantación son altos por lo que las instalaciones de pequeño tamaño no suelen resultar rentables (Martí, 2002).

### **2.4.1 PROCESO MICROBIOLÓGICO Y BIOQUÍMICO DE LA DEGRADACIÓN ANAEROBIA**

La degradación anaerobia es un proceso muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones ocurren de forma simultánea. El proceso anaerobio ha sido estudiado con bastante amplitud desde los puntos de vista bioquímico y microbiológico y se sabe que en él concurren una amplia variedad de bacterias de tipo tanto facultativas como anaerobias estrictas.

Los estudios bioquímicos y microbiológicos dividen el proceso de descomposición anaerobia de la materia orgánica en cuatro procesos:

- Hidrólisis
- Etapa fermentativa o acidogénica
- Etapa acetogénica
- Etapa metanogénica

En el desarrollo del proceso se han establecido dos etapas sucesivas, conocidas como fases no metanogénica y metanogénica. En la fase no metanogénica se inicia la transformación

de las moléculas que conforman la materia orgánica, obteniéndose así compuestos más simples. En esta fase del proceso suelen considerarse dos etapas, una de hidrólisis seguida por la acidogénesis. Los productos de estas primeras actividades bacterianas sirven de sustrato para los microorganismos que se desarrollan en la siguiente fase, la que se caracteriza por ser en la que se produce el metano, de donde le viene su nombre. Las dos fases fundamentales de la degradación anaerobia se consideran constituidas por diversos procesos, de acuerdo con el tipo de microorganismos que en ellos participan, clasificándose según la actividad metabólica de estas bacterias.

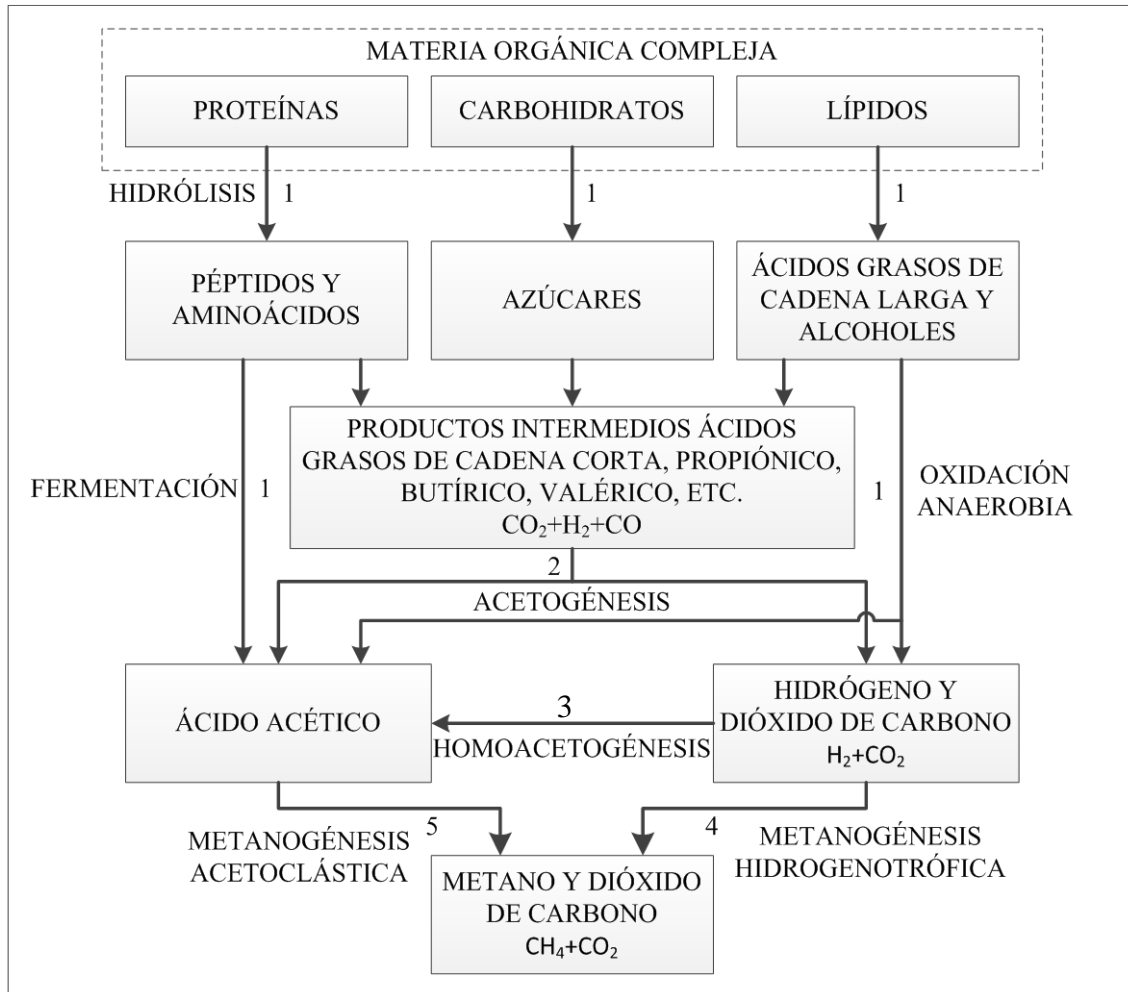
#### 2.4.2 FASE NO METANOGÉNICA

En la fase no metanogénica se desarrolla la actividad de bacterias facultativas y en esta etapa ocurre el proceso de hidrólisis de partículas y moléculas complejas (proteínas, hidratos de carbono y lípidos) que son hidrolizadas por enzimas extracelulares producidas por los microorganismos *acidogénicos* o *fermentativos*. Como resultado se producen compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga) que son fermentados por las bacterias *acidogénicas* dando lugar, principalmente, a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios. Los ácidos grasos de cadena corta son transformados en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, mediante la acción de los microorganismos *aceiogénicos*. Por último, los microorganismos *metanogénicos* producen metano a partir de acético, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>.

En la fase no metanogénica, se ha establecido la presencia de tres tipos de bacterias, que han sido clasificadas según sus requerimientos tróficos: Bacterias hidrolíticas, acidogénicas y acetogénicas. Las bacterias hidrolíticas solubilizan extracelularmente las moléculas de los polímeros orgánicos de carbohidratos, proteínas y lípidos, formando: Azúcares, ácidos grasos de cadena larga y aminoácidos. Las bacterias acidogénicas utilizan los productos metabólicos de la fase anterior, los cuales son fermentados intracelularmente produciendo los ácidos grasos de cadena corta conocidos como ácidos volátiles, siendo los más importantes de éstos: el acético, propiónico y butírico y en segundo término el valérico y caproico. Aunque también se forma en cantidades muy pequeñas ácido fórmico. En este paso de fermentación también hay producción de hidrógeno y dióxido de carbono, y la misma actividad bacteriana produce sulfuros y algunos compuestos aromáticos que provienen de los aminoácidos que conforman las moléculas de las proteínas.

El tercer grupo de bacterias lo constituyen las bacterias acetogénicas, que transforman a los ácidos grasos, producidos en la fase anterior, en ácido acético; este ácido servirá de sustrato para las bacterias metanogénicas. En esta etapa de la degradación anaerobia se produce también dióxido de carbono e hidrógeno, productos que son igualmente sustratos para algunas bacterias metanogénicas. En la Figura 2.10 se muestra esquemáticamente las distintas fases del proceso de degradación anaerobia, los microorganismos que intervienen en cada una de ellas y los productos intermedios generados, los números indican la población bacteriana responsable de cada proceso: 1 bacterias fermentativas, 2 bacterias acetogénicas que producen hidrógeno, 3 bacterias homoacetogénicas, 4 bacterias metanogénicas hidrogenotróficas, 5 bacterias metanogénicas acetoclásticas.

Figura 2.10 Degradación anaerobia de la materia orgánica (Modificado de Martí, 2002 y Mejía, 1996)



## HIDRÓLISIS

La hidrólisis de la materia orgánica polimérica a compuestos solubles o monómeros es el paso inicial para la degradación anaerobia de sustratos orgánicos complejos, ya que los microorganismos únicamente pueden utilizar materia orgánica soluble que pueda atravesar su pared celular. Por tanto, es el proceso de hidrólisis el que proporciona sustratos orgánicos para la degradación anaerobia. Como ya se ha comentado, la hidrólisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por los microorganismos hidrolíticos.

La etapa hidrolítica puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido en sólidos (Pavlosthatís y Giraldo-Gómez, 1991). Además, la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos,

proteínas y grasas), del tamaño de partículas, del pH, de la concentración de  $\text{NH}_4^+$  y de la concentración de los productos de la hidrólisis (Speece, 1983).

Cualquier sustrato se compone de tres tipos básicos de macromoléculas: Hidratos de carbono, proteínas y lípidos. Las proteínas constituyen un sustrato muy importante en el proceso de degradación anaerobia ya que además de ser fuente de carbono y energía, los aminoácidos derivados de su hidrólisis tienen un elevado valor nutricional. Las proteínas son hidrolizadas en péptidos y aminoácidos por la acción de enzimas proteolíticas llamadas proteasas. Parte de estos aminoácidos son utilizados directamente en la síntesis de nuevo material celular y el resto son degradados a ácidos grasos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro en posteriores etapas del proceso.

La degradación de los lípidos en ambientes anaerobios comienza con la ruptura de las grasas por la acción de enzimas hidrolíticas denominadas lipasas produciendo ácidos grasos de cadena larga y glicerol. La velocidad de degradación de los materiales lignocelulósicos, compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, es tan lenta que suele ser la etapa limitante del proceso de hidrólisis y por tanto, de la degradación anaerobia de determinados sustratos. Ésto es debido a que la lignina es muy resistente a la degradación por parte de los microorganismos anaerobios, afectando también a la biodegradabilidad de la celulosa, de la hemicelulosa y de otros hidratos de carbono. Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa son celobiosa y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, hexosas y ácidos urónicos (Martí, 2002).

## **ETAPA FERMENTATIVA O ACIDOGÉNICA**

Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico,  $\text{H}_2$ ) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso.

## **FERMENTACIÓN DE CARBOHIDRATOS SOLUBLES**

La principal ruta metabólica de degradación de glucosa para formar ácidos orgánicos es la de Embden-Meyerhof que tiene como principal intermediario el piruvato. La fermentación de azúcares se realiza por diversos tipos de microorganismos. En función de cada organismo, la ruta metabólica y los productos finales son diferentes. Los principales microorganismos asociados a la degradación de la glucosa son del género *Clostridium* y convierten la glucosa en butírico, acético,  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2$ . La glucosa se convierte en piruvato mediante la ruta Embden-Meyerhof, y el piruvato se desdobla a Acetil-CoA y  $\text{CO}_2$ . El Acetil-CoA se reduce en los productos de fermentación empleando como transportador de electrones el NADH derivado de las reacciones glicolíticas de la ruta Embden-Meyerhof (Martí, 2002).

## FERMENTACIÓN DE AMINOÁCIDOS

Los principales productos de la fermentación de aminoácidos y de otras moléculas hidrogenadas son ácidos grasos de cadena corta, succínico, aminovalérico y H<sub>2</sub>. La fermentación de aminoácidos se considera un proceso rápido y que, en general, no limita la velocidad de degradación de compuestos proteicos.

Las bacterias proteolíticas que mayoritariamente se han identificado, pertenecen al género *Clostridium*, aunque otras especies tales como *Peplococcus* y *Bacteroides* también están presentes. Los productos finales de la oxidación son NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub> y un ácido carboxílico con un átomo de carbono menos que el aminoácido oxidado (n-butírico y ácido isobutírico, isovalérico, caproico, sulfuro de hidrógeno, metilcaptano, cadaverina, putrescina, etc., según el aminoácido del que proceda)

## OXIDACIÓN ANAEROBIA DE ÁCIDOS GRASOS DE CADENA LARGA

Los ácidos grasos de cadena larga son oxidados a ácidos grasos de cadena corta por el mecanismo de β-oxidación. Los ácidos grasos libres son introducidos en la célula a través de la pared celular y una vez en su interior, son transformados en el correspondiente tio-éster-CoA. La β-oxidación es un ciclo en espiral que va liberando un acetil-CoA en cada bucle, produciendo, principalmente ácido acético.

En condiciones anaerobias, este mecanismo es termodinámicamente desfavorable y muy dependiente de la presión parcial del hidrógeno. Por lo que es de gran importancia la acción simbiótica de los microorganismos consumidores de hidrógeno para que se pueda producir.

## ETAPA ACETOGÉNICA

Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H<sub>2</sub> y acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles como valeriato, butirato, propionato, etc. y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, acetato y H<sub>2</sub>, a través de las bacterias acetogénicas. Representantes de los microorganismos acetogénicos son *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolini*. Desde el punto de vista termodinámico, estas reacciones no son posibles porque en condiciones estándar (pH=7, T=25°C, P=1 atm), presentan energías libres de reacción positivas (Martí, 2002).

Sin embargo, a presiones parciales de H<sub>2</sub> bajas (del orden de 10<sup>-4</sup> – 10<sup>-5</sup> atm), estas reacciones pasan a ser termodinámicamente favorables y la variación de energía libre es suficiente para permitir la síntesis de ATP y el crecimiento bacteriano. Por tanto, el principal inhibidor de la acetogénesis, cuya acumulación provoca la rápida acumulación de sustratos, es la acumulación de hidrógeno molecular. Un tipo especial de microorganismos acetogénicos, son los llamados *homoacetogénicos*. Este tipo de bacterias son capaces de crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos monocarbonados (como la mezcla H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>) produciendo como único producto acetato. Al contrario que las bacterias acetogénicas, éstas no producen hidrógeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato. Según se ha estudiado, el resultado neto del

metabolismo homoacetogénico permite mantener bajas presiones parciales del hidrógeno y, por tanto, permite la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas. Las bacterias metanogénicas hidrogenotróficas también consumen  $H_2$  ayudando así al mantenimiento de presiones parciales bajas del  $H_2$ . Los principales microorganismos homoacetogénicos que han sido aislados son *Acetobacterium woodii* o *Clostridium acetificum*.

### 2.4.3 FASE METANOGENICA

Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de degradación anaerobia mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: Acetato,  $H_2/CO_2$ , formato, metanol y algunas metilaminas. Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio *Archaea* y tienen características comunes que los diferencian del resto de procariontes. Un ejemplo es que todos ellos poseen varias coenzimas especiales, siendo la coenzima M, la que participa en el paso final de la formación del metano.

Se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal que metabolizan: *Hidrogenotróficos*, que consumen  $H_2/CO_3$  y fórmico y *acetoclásticos*, que consumen acetato, metanol y algunas aminas. Se ha demostrado que un 70% del metano producido en los digestores se forma a partir del acetato a pesar de que, mientras todos los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el  $H_2$  como aceptor de electrones, sólo dos géneros pueden utilizar acetato. Los dos géneros que tienen especies acetotróficas son *Methanosarcina* y *Methanothrix*. (Martí, 2002).

### 2.4.4 INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS AMBIENTALES Y DE CONTROL

#### TEMPERATURA

La velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que a su vez, dependen de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de degradación dando lugar a mayores producciones de biogás.

La temperatura de operación del digestor, está considerada uno de los principales parámetros de diseño, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de degradación anaerobia. Las variaciones bruscas de temperatura en el digestor pueden provocar la desestabilización del proceso. Por ello, para garantizar una temperatura homogénea en el digestor, es imprescindible un sistema adecuado de agitación y un controlador de temperatura.

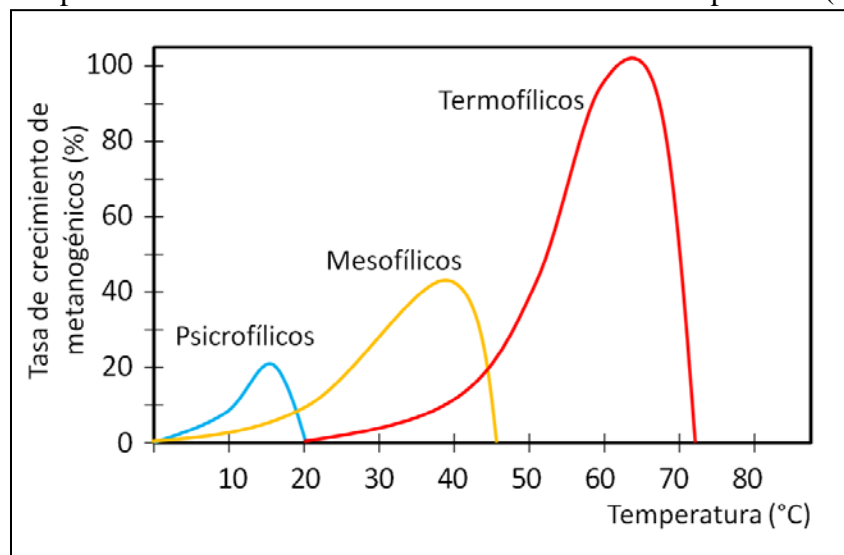
Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaerobios psicrófilo (por debajo de  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ), mesófilo (entre  $25$  y  $45\text{ }^\circ\text{C}$ ) y termófilo (entre  $45$  y  $65\text{ }^\circ\text{C}$ ) (ver Figura 2.11), siendo la velocidad máxima específica de crecimiento ( $\mu_{max}$ ) mayor conforme aumenta el rango de temperaturas. Dentro de cada rango de temperatura, existe un intervalo para el cual dicho parámetro se hace máximo, determinando así la temperatura de trabajo óptima en cada uno de los rangos posibles de



operación. Hasta el momento, el rango psicrófilico ha sido poco estudiado y, en general, se plantea como poco viable debido al gran tamaño del digestor necesario. Sin embargo, presenta menores problemas de estabilidad que en los otros rangos de operación.

El régimen mesofílico de operación es el más utilizado a pesar de que en la actualidad se está utilizando cada vez más el rango termofílico para conseguir una mayor velocidad del proceso (lo que significa un aumento en la eliminación de materia orgánica y en la producción de biogás) y una mejor eliminación de organismos patógenos. Sin embargo, el régimen termofílico suele ser más inestable a cualquier cambio de las condiciones de operación y presenta además mayores problemas de inhibición del proceso por la mayor toxicidad de determinados compuestos a elevadas temperaturas, como el nitrógeno amoniacal o los ácidos grasos de cadena larga.

Figura 2.11 Dependencia de la constante de crecimiento de la temperatura (Martí, 2002)



Una técnica interesante es la combinación de dos fases de degradación, una primera termofílica de elevada carga orgánica y una segunda mesofílica con menor carga. Con este sistema se aprovechan las ventajas del sistema termofílico pero se reducen los problemas de inestabilidad.

La temperatura del proceso actúa también sobre aspectos físico-químicos del mismo. La solubilidad de los gases generados desciende al aumentar la temperatura, favoreciéndose la transferencia líquido-gas. Esto supone un efecto positivo para el caso de gases tales como  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ , dada su toxicidad sobre el crecimiento de los microorganismos anaerobios. Una posible desventaja de este fenómeno es que el descenso de la solubilidad del  $\text{CO}_2$  provocaría un aumento del pH, lo que generaría, en fangos de elevada concentración de amonio, posibles situaciones de inhibición por  $\text{NH}_3$ . Por otra parte, la solubilidad de la mayoría de las sales aumenta con la temperatura de manera que la materia orgánica es más accesible para los microorganismos aumentando así la velocidad del proceso. Por último, la viscosidad de sólidos y semisólidos disminuye al aumentar la temperatura lo que implica menores necesidades de agitación.

## **MEDIDA DEL pH Y ALCALINIDAD**

Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso de degradación anaerobia presentan unos niveles de actividad óptimos en torno a la neutralidad entre los siguientes valores:

- Fermentativos: entre 7.2 y 7.4
- Acetogénicos: entre 7.0 y 7.2
- Metanogénicos: entre 6.5 y 7.5

Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6 ni subir de 8. El valor del pH en el digestor no sólo determina la producción de biogás sino también su composición. Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas.

El pH es una de las variables utilizadas en el diagnóstico de los sistemas anaerobios (aunque no se considera una buena variable de control por ser demasiado lenta) ya que muchos fenómenos tienen influencia sobre el mismo. Un ejemplo de ello, son las situaciones de acidificación de un digestor provocadas por desequilibrios en la producción y consumo de ácidos grasos volátiles. La acumulación de éstos provoca un descenso en el pH que será más o menos acusada en función de la alcalinidad del medio.

Por otra parte, el pH afecta a los diferentes equilibrios químicos existentes en el medio, pudiendo desplazarlos hacia la formación de un determinado componente que tenga influencia en el proceso. Éste es el caso de los equilibrios ácido-base del amoníaco y del ácido acético. Al aumentar el pH se favorece la formación de amoníaco que, en elevadas concentraciones, es inhibidor del crecimiento microbiano y a pH bajos se genera mayoritariamente la forma no ionizada del ácido acético, que inhibe el mecanismo de degradación del propionato.

La alcalinidad es una medida de la capacidad del medio. En el rango de pH del proceso de degradación anaerobia, el principal equilibrio que controla la alcalinidad es el del dióxido de carbono/bicarbonato. Estudios previos han demostrado que valores de la alcalinidad del bicarbonato por encima de 2,500 mg/l, aseguran un buen control del pH y una adecuada estabilidad del sistema.

## **NUTRIENTES**

Una ventaja de los procesos de degradación anaerobia, es su baja necesidad de nutrientes derivada de los bajos índices de producción de biomasa que presentan los microorganismos anaerobios. Los principales nutrientes necesarios para el crecimiento de los microorganismos son el carbono, el nitrógeno y el fósforo, y una serie de elementos minerales como S, K, Na, Ca, Mg y Fe que deben de estar presentes a nivel de trazas. Diversos autores han estudiado la relación necesaria entre los nutrientes mayoritarios considerando una relación C:N entre 15-30:1 y C:P de 75-113:1 (Speece, 1987).

Para el caso de fangos de estaciones depuradoras de aguas residuales, todos estos nutrientes suelen estar presentes en las cantidades requeridas.

## **POTENCIAL REDOX**

Conviene mantener el valor del potencial redox por debajo de -300 mV o -330 mV para asegurar el ambiente fuertemente reductor que las bacterias metanogénicas necesitan para su óptima actividad.

## **TÓXICOS E INHIBIDORES**

El proceso de degradación anaerobia es inhibido por la presencia de tóxicos en el sistema. Estas sustancias pueden ser subproductos de la actividad metabólica de los microorganismos anaerobios o pueden formar parte del influente. Experimentalmente se ha comprobado que la magnitud del efecto tóxico de una sustancia puede ser reducido significativamente por aclimatación de la población de microorganismos al tóxico. Por otra parte, muchas de estas sustancias a bajas concentraciones pueden ser estimuladoras del proceso.

## **ÁCIDOS GRASOS VOLÁTILES**

La concentración de ácidos grasos volátiles, productos intermedios mayoritarios del proceso anaerobio, es uno de los parámetros que más eficazmente pueden indicar la evolución del proceso. De hecho, este parámetro es uno de los más utilizados en los sistemas de control debido a su rápida respuesta ante variaciones del sistema. Un ejemplo de ello, es la acumulación de ácidos grasos volátiles que tiene lugar en el sistema cuando la velocidad de degradación de éstos, por parte de las bacterias responsables, disminuye por alguna causa adversa. Por tanto, un aumento en la concentración de ácidos volátiles en el sistema, siempre significa una desestabilización del proceso y, en consecuencia, una disminución de la producción de biogás (Martí, 2002).

## **2.5 BIOGÁS**

El biogás es una mezcla de gases cuyos principales componentes son el metano y el dióxido de carbono, el cual se produce como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire, por la acción de un grupo de microorganismos. Cuando esta mezcla se produce en forma natural, se llama “gas de los pantanos”; fue descubierto y reportado por Shirley en 1667 y es el responsable de los llamados “fuegos fatuos”. El metano es un gas combustible, incoloro, inodoro, cuya combustión produce una llama azul, es el principal constituyente del gas natural, ya que más del 90% de este combustible es metano (Mandujano y col., 1981).

El biogás está compuesto por los gases que se muestran en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10 Composición básica del biogás (Seoánes, 2000)

Componente	% en volumen
CH <sub>4</sub>	50% - 65%
CO <sub>2</sub>	30% - 45%
H <sub>2</sub>	0.1% - 2%
O <sub>2</sub>	0.1% - 5%
H <sub>2</sub> S	0.001% - 2%
H <sub>2</sub> O	0.1% - 9%
N <sub>2</sub>	Trazas
Hidrocarburos	Trazas
Mercaptanos	Trazas
Diversos productos organoclorados	Trazas
CO	Trazas
NH <sub>3</sub>	Trazas

### 2.5.1 PLANTAS GENERADORAS DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS ORGÁNICOS

El biogás se produce mediante el proceso de fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire, o sea en condiciones anaeróbicas, quedando como residuo del proceso un lodo estabilizado que es un excelente mejorador de suelos con un alto valor fertilizante. Debido a esto último, es factible procesar los desechos animales y residuos agrícolas que se encuentran presentes en el medio rural para producir gas combustible, sin afectar el uso actual que se le da a estos materiales, los que generalmente se reincorporan a los terrenos de cultivo.

En la práctica, los desechos mezclados con agua se introducen a un recipiente cerrado, llamado digestor, que es donde se realiza el proceso de generación de biogás. Cuando el digestor es de carga diaria, todos los días se carga con una cantidad de desechos mezclados con agua, y del digestor sale un volumen de lodos fertilizantes igual de la mezcla alimentada; el biogás se genera en forma continua durante todo el día. Cuando se trata de un digestor que trabaja a régimen de lote, la cantidad de biogás producida es mayor en las primeras semanas y va bajando a medida que transcurre el tiempo, se instalan varios digestores en batería, los que se cargan en forma alternada.

### 2.5.2 TRATAMIENTOS DE LIMPIEZA DEL BIOGÁS

La eliminación del CO<sub>2</sub> aumenta el valor calorífico del biogás y lleva a una calidad consistente del biogás, similar al gas natural. Al usar técnicas de remoción del CO<sub>2</sub>, es importante mantener bajas pérdidas del metano por razones económicas y ambientales puesto que el CH<sub>4</sub> es un gas de efecto invernadero 21 veces más que el CO<sub>2</sub> (Van de Velden y col., 2002).

### 2.5.2.1 REMOCIÓN DEL DIÓXIDO DE CARBONO

Hay diversos métodos de remoción, los más comunes que se realizan son la absorción. La separación criogénica también es posible, pero costosa y la separación de membrana ha estado ganando terreno en las últimas investigaciones y aplicaciones (Degreve y col., 2001).

En los procesos de absorción, el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>S son simultáneamente removidos debido a la alta polaridad del CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>S y la no polaridad del CH<sub>4</sub>. El agua es el solvente más común para la purificación del biogás comprimido (4 a 7 bar). El diseño de un sistema de purificación con agua depende de la solubilidad del CO<sub>2</sub>, pues la solubilidad está regida por la presión, cuando la presión aumenta, la solubilidad del CO<sub>2</sub> en agua aumenta; pero disminuye cuando se incrementa la temperatura. Después de la purificación a presión, el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>S se envían inmediatamente a un tanque, donde se reduce la presión y la temperatura se aumenta. El H<sub>2</sub>S, que se envía al aire puede crear un problema de contaminación. Algunos de los sulfuros acumulados en el agua pueden causar problemas de corrosión en la tubería, por lo tanto, es recomendable separar el H<sub>2</sub>S. El aire o vacío se utiliza pocas veces para eliminar el H<sub>2</sub>S por la introducción de O<sub>2</sub> en el sistema. Los resultados muestran que de 5 a 10 % de CO<sub>2</sub> permanece en el biogás.

### 2.5.2.2 REMOCIÓN DEL AGUA

El biogás se encuentra saturado con vapor de agua cuando se extrae del digestor. El secado es generalmente necesario o recomendado. La refrigeración o el diseño sensible de la tubería de trabajo es un método común para condensar el agua. Para alcanzar puntos de condensación más altos, el biogás puede ser comprimido antes de enfriarlo. La absorción con el gel de silicona o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es aplicado cuando se necesitan alcanzar puntos de condensación muy bajos. Un método alternativo de secar el biogás puede ser la absorción en glicol o en sales higroscópicas, que pueden ser recuperadas a temperaturas elevadas.

### 2.5.2.3 REMOCIÓN DEL H<sub>2</sub>S

Se debe recordar que el acondicionamiento apropiado del lodo puede limitar el contenido de H<sub>2</sub>S presente en el biogás (Dewil y col., 2008). La adición de sales de Fe<sup>3+</sup> al lodo puede producir sulfuros insolubles y reducir el H<sub>2</sub>S libre en el biogás a valores menores de 150 ppm (dependiendo de la cantidad de Fe<sup>3+</sup> agregado). Un exceso de sales de Fe<sup>3+</sup> agregadas puede sin embargo inhibir la formación de biogás.

El H<sub>2</sub>S puede también ser absorbido con carbón activado. El carbón activado actúa como un catalizador para convertir el H<sub>2</sub>S en azufre elemental. La impregnación con yoduro de potasio (KI) es necesario para la remoción. Los microorganismos, pertenecientes a la familia de *Thiobacillus*, pueden ser utilizados para reducir el nivel de sulfuros en el biogás, oxidándolos principalmente a azufre elemental y a algunos sulfatos. Estas bacterias están comúnmente presentes en el material de la degradación y así no tienen que ser inoculados. Además, la mayor parte de ellas son autotróficas, que significa que utilizan el dióxido de carbono del biogás como fuente de carbono. El oxígeno necesita ser adicionado al biogás para la desulfurización biológica y el nivel necesario depende de la concentración de

sulfuro de hidrógeno, generalmente alrededor de 2 a 6% de volumen de aire en el biogás (Hagen y Polman, 2001).

El método más simple para la desulfurización es agregar oxígeno o el aire directamente en la cámara de degradación. Con este método, el nivel de  $H_2S$  se puede reducir por arriba del 95 % a niveles menores de 50 ppm, sin embargo depende de la temperatura, lugar y cantidad de aire agregado y del tiempo de reacción. Al agregar el aire en el biogás, son necesarias implementar medidas de seguridad para evitar una dosis excesiva de aire en caso de una falla de bombeo. El metano es explosivo en el rango de 5 a 15% en aire.

La desulfurización biológica puede también ocurrir en un biofiltro separado, llenado con cuerpos plásticos en los cuales los microorganismos de desulfuración se adhieren. Antes de que el biogás se incorpore a la unidad, se agrega del 5 al 10% de volumen de aire. El nivel de  $H_2S$  se puede reducir de 3,000 a 5,000 ppm hasta 50 a 100 ppm. El amoníaco es separado al mismo tiempo (Kapdi y col., 2005).

El  $H_2S$  se puede también reducir por la reacción con el NaOH para formar  $Na_2S$  y NaHS, ambas sales insolubles.

#### **2.5.2.4 REMOCIÓN DE TRAZAS**

Fue mencionado en párrafos anteriores que los siloxanos pueden estar presentes en el biogás. La presencia de siloxanos en el biogás da lugar a algunos problemas con respecto a su valorización térmica. Estos compuestos que contienen silicio son ampliamente utilizados en varios procesos industriales. Durante la degradación del lodo, los siloxanos se remueven del lodo y se volatilizan debido a la degradación del material orgánico y a la temperatura elevada en el digestor. Las concentraciones del siloxano encontradas típicamente en el biogás están entre 30 y 50  $mg/m^3$  con picos de hasta 400  $mg/m^3$  en algunas plantas de tratamiento de aguas residuales (Dewil y col., 2006).

Solamente los siloxanos volátiles son detectados en el biogás. Debido a la pequeña cantidad que representan algunos siloxanos, solo son representativos dos tipos de siloxanos cíclicos, es decir octametilciclotetrasiloxano (D4) y decametilciclopentasiloxano (D5), son detectados en cantidades significativas en el biogás (Schweigkofler y Niessner, 2001)

Durante la combustión del biogás, estos siloxanos son convertidos en una dura y abrasiva sustancia microcristalina de silicio que cubren gradualmente el equipo que se utiliza para el aprovechamiento del biogás. La capa ocasiona serios daños al motor por la abrasión de las superficies del motor de biogás, que se manifiesta en un recalentamiento de las piezas sensibles del motor como aisladores térmicos y por baja de la función de las bujías. La capa cristalina por otra parte se acumula en el aceite lubricante y en las superficies de las cubiertas de la turbina. Para el biogás de Trecatti (Reino Unido), la presencia por arriba de hasta 400  $mg/m^3$  de siloxanos volátiles llevó a un fallo mecánico importante dentro de las 200 h de operación del motogenerador (Griffin, 2004).

El problema por otra parte se evita por el uso de motores eficientes de encendido por chispa que son de rápido funcionamiento, operan a altas temperaturas y usan biogás solamente.

Previamente los motores duales de combustible (baja temperatura, con el aceite combustible para ayudar a la ignición) fueron menos propensos a los depósitos de silicio. Aunque sea difícil medir la concentración de siloxanos en el lodo y en el biogás, una prueba reciente de métodos analíticos revelaron que la extracción por cromatografía de gases fue un método adecuado (Dewil y col., 2007).

El método más frecuentemente usado para quitar los siloxanos es la absorción por carbón activado. Puesto que el biogás contiene un rango amplio de compuestos ( $H_2S$ , siloxanos, materia orgánica) con concentraciones que cubren algunos órdenes de magnitud, una absorción competitiva de los siloxanos y una variedad de rastros de compuestos que deben ser considerados para llevar a una capacidad de absorción larga necesaria, para remover los compuestos de silicio cuando se usan materiales adsorbentes en el pre tratamiento del biogás.

Los sitios activos del adsorbente capturarán el vapor de agua y otros agentes contaminantes, que disminuyen la vida del adsorbente. Por otra parte las camas del adsorbente tienen que ser substituidas regularmente porque los siloxanos son difíciles de reabsorber del material. En Trecatti (Reino Unido) por ejemplo, un cambio semanal del carbón activado es necesario, con un tiempo muerto de un día en el adsorbente y un costo de casi €2,000 por cambio.

Otros adsorbentes posibles son tamices moleculares y de polímero. Un estudio comparativo de los materiales de la absorción usando los granos de polímero, el gel de silicio y el carbón activado, que todos exhibieron capacidades grandes de absorción para el siloxano D5. Especialmente el gel de silicio parecía ser prometedor y un candidato altamente rentable, puesto que éste puede ser utilizado simultáneamente para la deshidratación del biogás. La absorción en solventes orgánicos no volátiles también han sido puestos en aerosol y columnas llenas por ejemplo con anillos Raschig. Una desventaja importante de este método de tratamiento del biogás es el hecho de que la eliminación completa del siloxano es difícil de obtener, puesto que los siloxanos altamente volátiles son fácilmente desmantelados del solvente en elevadas tasas de flujo de biogás. Este problema no se presenta si los siloxanos se absorben químicamente, es decir, se convierten a compuestos de volatilidad baja (Schweigkofler y Niessner, 2001).

La condensación criogénica de los siloxanos del biogás es factible, pero es una alternativa costosa. Cuando la temperatura del biogás disminuye, se forma un condensado que contiene parte de los siloxanos que están presentes. Otros estudios se basan en la eficiencia de la remoción cuando el biogás es enfriado a  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , alcanzando hasta el 88% de las concentraciones de siloxano iniciales que estaban todavía presentes en el lodo y en el biogás del digestor (Schweigkofler y Niessner, 2001).

En otro estudio se notó una eficiencia de la purificación para una gama de siloxanos volátiles de 25.9 % cuando se enfrió a  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y de 99.3% al congelar a  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Hagmann y col., 1999). Un método divulgado para quitar los siloxanos del biogás es el abatimiento químico. Sin embargo, se requiere de valores altos o bajos de pH y/o temperaturas altas (Huppmann y col., 1996). Las eficiencias de la remoción de estos métodos son, sin

embargo, algo bajas. Recientemente se mostró el potencial de remoción de los siloxanos a partir de la fase del lodo usando un tratamiento peroxidativo (Appels y col., 2008)

### 2.5.3 COMPRESIÓN Y ALMACENAMIENTO DEL BIOGÁS

La compresión del biogás reduce los requerimientos de almacenaje, concentra el contenido de energía y aumenta la presión a niveles que superan las caídas de presión en técnicas subsecuentes o tuberías.

Las plantas que se construyeron en la República Checa, Francia, en Los Países Bajos, en nueva Zelanda o Suecia, tienen tecnologías avanzadas para el tratamiento del biogás pero aún son de pequeña escala (Wellinger y Lindeberg, 1999). Generalmente las opciones del almacenamiento del biogás, se resumen en la Tabla 2.11

Tabla 2.11 Opciones más comunes de almacenamiento del biogás (Walls y col., 1989)

Presión	Recurso de Almacenamiento	Material
Baja (0.14-0.41 bar)	Mantener el biogás confinado	Acero
Baja	Recolección de biogás	Caucho, vinil, plástico
Media (1.05-1.97 bar)	Tanque para gas propano y butano	Acero
Alta (200 bar)	Cilindros de gas comercial	Aleación

### 2.5.4 APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS

El biogás, con su alto contenido de metano, es una fuente de energía que se puede usar para cocinar, iluminar, generar calor, operar maquinaria agrícola, bombear agua o generar energía eléctrica (Mandujano, 1981). Cuando se digieren desechos orgánicos en condiciones anaerobias húmedas y cálidas, uno de los principales productos es el gas metano. Este gas se puede usar como combustible para iluminación, para cocinar y para motores de combustión interna especialmente adaptados.

El gas puede producirse a partir de un amplio rango de materias primas, incluyendo desechos de cultivos, del hombre, del ganado, de las aves y de la fabricación de alimentos. Las tierras cloacales pueden ser transportadas directamente por medio de tuberías al digester. Ésto elimina todos los problemas de higiene y de tabús sociales de la recogida y manejo de las tierras cloacales. En algunas áreas puede haber una reacción social inicial en contra de usar gas de los desechos humanos, puede ser necesario algún grado de tratamiento de los desechos y control del contenido de humedad antes de introducir los desechos al digester. Esto es normalmente más fácil en estiércol de ganado, por tanto éstos tienden a ser la principal materia prima (Dalzell y Biddlestone, 1991).

### 2.6 TIPOS DE DIGESTORES

Para que un digester de desechos orgánicos opere en forma correcta, deberá reunir las siguientes características:



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

Resulta conveniente clasificar a los digestores, según su modo de operación, en los siguientes tipos:

- De lote (régimen estacionario o "batch")
- De régimen semicontinuo
- Horizontales de desplazamiento
- De régimen continuo
- Otros

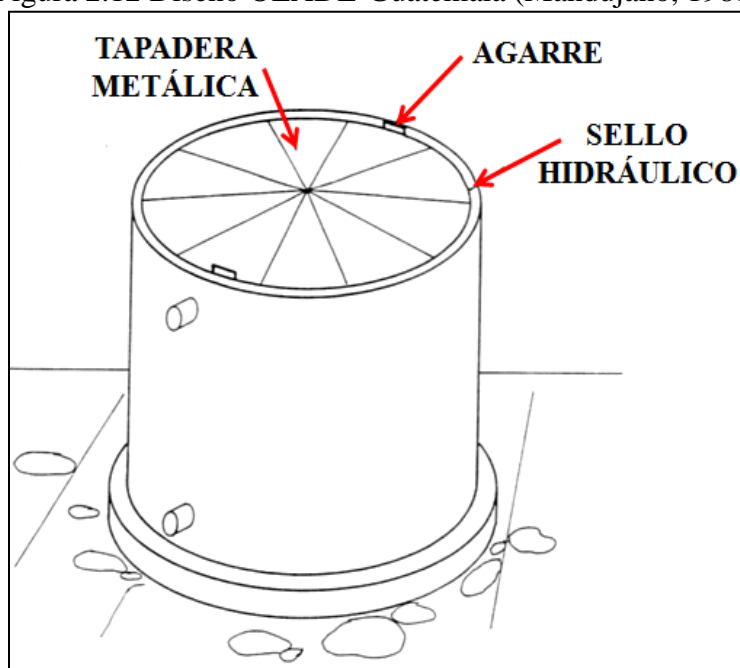
### **2.6.1 DIGESTOR POR LOTE (RÉGIMEN ESTACIONARIO O BATCH)**

Los digestores de lote (régimen estacionario o batch), se cargan una sola vez en forma total y la descarga se efectúa una vez que han dejado de producir gas combustible. Normalmente consisten en tanques herméticos con una salida de gas conectada a un gasómetro flotante, donde se almacena el biogás.

Este sistema es aplicable en situaciones particulares, como sería la de materia orgánica que presentará problemas de manejo en un sistema continuo o cuando la materia a procesar está disponible en forma intermitente. En esos casos generalmente se usan varios digestores cargados a diferentes tiempos para tener siempre biogás disponible. Otro ejemplo sería cuando el interés primordial es la obtención del fertilizante orgánico, el cual se requiere en épocas específicas del año. En este caso, la carga se hace al tener disponibles los desechos y la descarga una o dos veces por año, en la época de la siembra. Así también el digestor a régimen estacionario o de lote, es ideal cuando a nivel laboratorio se desean evaluar los parámetros del proceso o el comportamiento de un desecho o mezcla de desechos.

Un digestor de este tipo se presenta la Figura 2.12.

Figura 2.12 Diseño OLADE-Guatemala (Mandujano, 1981)



### **2.6.2 DIGESTOR DE RÉGIMEN CONTINUO**

Los digestores de régimen continuo se desarrollaron principalmente para tratamiento de aguas negras, y en la actualidad su uso se ha extendido al manejo de otros sustratos. En general son plantas muy grandes, en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionarles calefacción y agitación, así como para su control. Por lo tanto, este tipo de plantas son más bien instalaciones tipo industrial, donde se genera una gran cantidad de biogás el que a su vez se aprovecha en aplicaciones industriales.

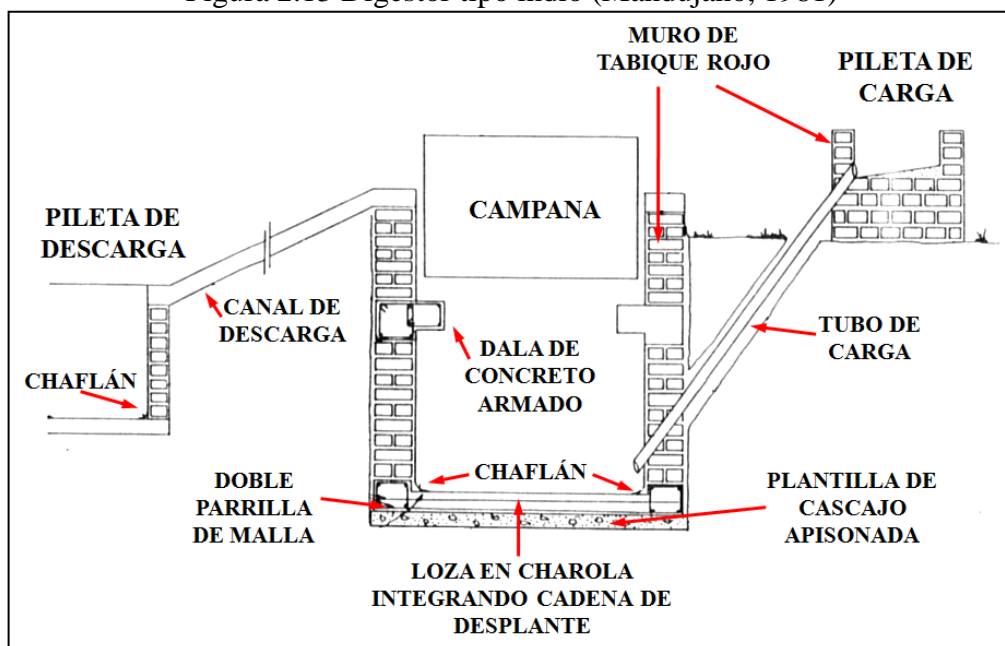
### **2.6.3 DIGESTOR DE RÉGIMEN SEMICONTINUO TIPO INDIO Y TIPO CHINO**

Los digestores de régimen semicontinuo son los más usados en el medio rural, cuando se trata de sistemas pequeños para uso doméstico. Los diseños más populares son el indio y el chino.

#### **DIGESTOR TIPO INDIO**

Los digestores tipo indio presentan varios diseños, pero en general son verticales y enterrados, semejando un pozo, como se ve en el esquema de la Figura 2.13. Se cargan por gravedad una vez al día, con un volumen de mezcla que depende del tiempo de fermentación o retención y producen una cantidad diaria más o menos constante de biogás si se mantienen las condiciones de operación.

Figura 2.13 Digestor tipo indio (Mandujano, 1981)



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 esta forma la presión del gas sobre la superficie de la mezcla es muy baja, de menos de 20 cm de columna de agua, 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 a los que se alimenta. En caso de requerirse una presión mayor, simplemente se quitan los contrapesos o se colocan sobre la campana. Por lo general el volumen del gasómetro es del orden del 1/3 del biogás generado al día. La entrada de la carga diaria por gravedad hasta el fondo del pozo, además de producir agitación, provoca la salida de un volumen equivalente de lodos digeridos, desde la superficie o desde el fondo, según el diseño del sistema, los que se hacen fluir hasta una pileta para su aplicación a los cultivos. El digestor normalmente se construye de ladrillos, con un aplanado interior de cemento pulido para evitar filtraciones, pero también pueden utilizarse otros materiales de construcción comunes en la región. La campana puede construirse de lámina de fierro, de fibra de vidrio o de otro material, con la condición de que no permita la fuga del gas. El material de construcción de la campana se deberá seleccionar con cuidado, ya que esta parte del sistema puede resultar costosa.

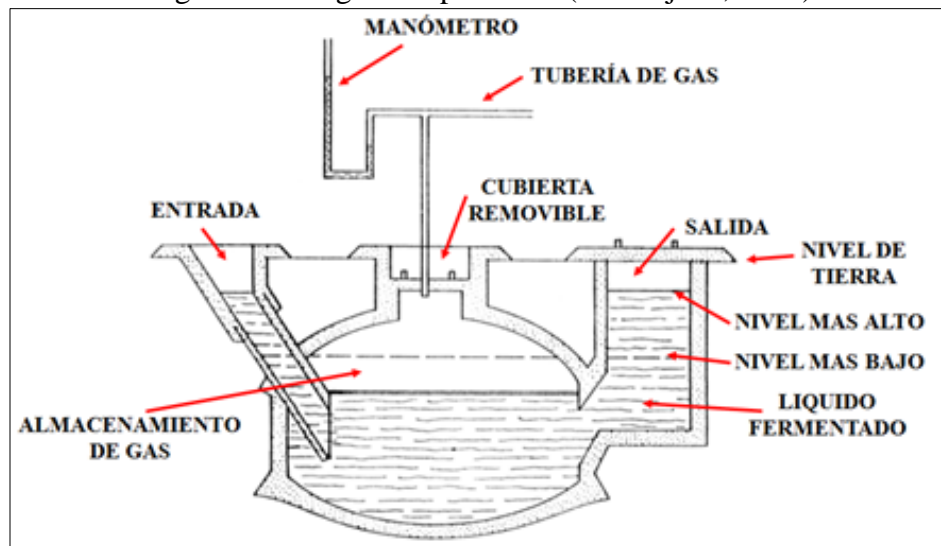
Este tipo de digestor presenta una buena eficiencia de producción de biogás, generando entre 0.5 y 1 volumen de gas por volumen de digestor, y aún más. Como la campana está al nivel del suelo, es fácil sacarla una vez al año para pintarla y al mismo tiempo extraer las natas que se han formado en la superficie de la mezcla. Se tiene control sobre el material que se alimenta, lo que permite una operación uniforme. Para la correcta operación de un digestor que genere suficiente biogás para una familia, se requiere contar con los desechos de unas tres vacas o su equivalente en otros residuos, lo que en algunos casos podría ser un problema si no se cuenta con ganado confinado dentro de un establo. Su costo en general es mayor que el de los digestores tipo chino que se describirán a continuación; sin embargo, al

calcular el costo, deberá tenerse en cuenta que para producir la misma cantidad de biogás, el volumen de digester tipo indio requerido es aproximadamente un tercio del volumen requerido si se emplea un digester chino.

## DIGESTOR TIPO CHINO

Los digestores de régimen semicontinuo tipo chino, como el que aparece en la Figura 2.14, son tanques cilíndricos con el techo y el piso en forma de domo, y se construyen totalmente enterrados.

Figura 2.14 Digester tipo Chino (Mandujano, 1981)



Al iniciar el proceso, el digester se llena con residuos agrícolas mezclados con lodos activos de otro digester, a través de la cubierta superior, que es removible. Una vez cargado así, se va alimentando diariamente con los desechos que se encuentren disponibles, provenientes de la letrina y de los animales domésticos, a través del tubo de carga el cual llega a la parte media del digester.

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. Como consecuencia de la variación de presión, la que sube al generarse el gas y baja al empezar a utilizarlo, se reduce la eficiencia de los equipos en que se usa. Si la presión sube a valores muy altos, aumenta el riesgo de fugas de gas a través de micro poros en el domo y también la probabilidad de que se formen fisuras por movimientos ligeros de las paredes. La fluctuación del nivel de la mezcla en fermentación aumenta el contacto de la fase líquida con el oxígeno del aire, reduciéndose la actividad de las bacterias generadoras de metano, y la alta presión impide que el gas salga libremente del seno de la mezcla, todo lo cual conduce a una menor eficiencia de generación de biogás en los digestores tipo chino, en comparación con los de tipo hindú, generándose en el primero entre 0.15 y 0.2 volúmenes de gas por volumen de digester.

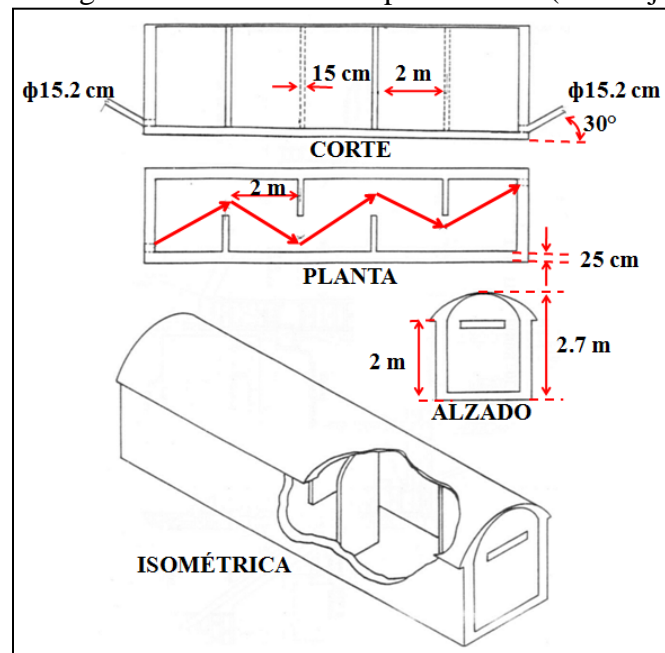
Periódicamente se extrae una parte del líquido en fermentación a través del tubo de salida, mediante una cubeta, y una o dos veces al año el digester se vacía completamente, aplicando el residuo a los campos de cultivo. Los digestores se construyen casi siempre por los mismos usuarios, con asesoramiento de un técnico especializado, a partir de ladrillos, bloques pre-fabricados o por vaciado integral de concreto ligero sobre la propia tierra.

A pesar de que el digester tipo chino es poco eficiente para generar biogás, es excelente en la producción de abono, ya que los tiempos de retención son en general largos, y además se tiene disponible una gran cantidad de este material cuando se necesita para mezclar con la tierra antes de la siembra. Dado que se emplea la técnica de autoconstrucción y que se hace uso de materiales comunes, el costo de este tipo de digester suele ser menor que el del tipo indio.

## 2.6.4 DIGESTOR HORIZONTAL DE DESPLAZAMIENTO

Los digestores horizontales de desplazamiento, generalmente se construyen enterrados, son poco profundos y alargados, semejando un canal, con relaciones de largo a ancho de 5 a 1 hasta 8 a 1 y sección transversal circular, cuadrada o en "V". En la Figura 2.15 se presenta un diagrama de este tipo de planta. Se operan a régimen semicontinuo, entrando la carga por un extremo del digester, y saliendo los lodos por el extremo opuesto. La cúpula puede ser rígida o de algún material flexible que no presente fugas de gas y que resista las condiciones de intemperie. El gas generado se colecta en esta cúpula, de la que puede pasar a un gasómetro flotante.

Figura 2.15 Digestor horizontal de desplazamiento (Mandujano, 1981)



Este tipo de digestores se recomiendan cuando se requiera trabajar con volúmenes mayores de los  $15 \text{ m}^3$ , para los cuales la excavación de un pozo vertical comienza a resultar muy problemática; o sea que están más bien enfocados a la generación de biogás para

aplicaciones comunales, como puede ser el accionar pequeños motores para bombeo, molienda, o generación de electricidad.

### **2.6.5 OTROS TIPOS DE DIGESTORES**

La investigación en el tema de fermentación anaeróbica, buscando aumentar la eficiencia de generación de biogás y de degradación de la materia orgánica reduciendo el tiempo de retención, ha llevado al desarrollo de diversos tipos de digestores, como son los llamados filtros anaeróbicos. En estos sistemas de alimentación continua y alta dilución (1 a 1.5 % de sólidos totales), por métodos físicos se logra retener los microorganismos dentro del digestor durante 20 a 30 días, mientras que el líquido activo pasa a través del sistema en tiempos de 1 a 5 días. Con ésto se logra reducir en forma significativa el tamaño de la planta, con la consecuente disminución de los costos de instalación y operación, mejorando la eficiencia de generación de biogás.

Otro sistema que se encuentra en desarrollo son los digestores de etapas múltiples, diseñadas para aislar grupos de bacterias en cámaras separadas, cada una de las cuales trabaja en las condiciones óptimas para el desarrollo del tipo de microorganismos que contienen. Con este sistema se logra una mayor degradación de la materia orgánica alimentada, con el consecuente aumento de la cantidad de biogás generado (Mandujano, 1981).

## **2.7 DISEÑO DE UN DIGESTOR**

El diseño del digestor se determinará basándose en una serie de análisis para determinar si es viable o no la construcción de dicho sistema.

### **2.7.1 FACTORES A CONSIDERAR PARA LA SELECCIÓN DE UN DIGESTOR**

- Identificar que se necesita en el lugar, por ejemplo, electricidad (que tipos de conexiones eléctricas) o energía térmica
- Ver si es posible usar sustratos alrededor el sitio
- Saber la disposición del lodo digerido y cuál será su alimentación
- Determinar si es económicamente factible si esto se basa en un proyecto comercial. En la fase de creación un análisis de costos en un nivel básico es suficiente
- Analizar si los requerimientos de construcción y diseño pueden ser obtenidos fácilmente
- Cantidad de alimentación a digerir
- Composición de la alimentación (humedad, pH, características químicas)
- Disponibilidad de otro material orgánico digerible, otros residuos
- Consumo y costos de electricidad de la propia empresa
- Demanda de energía calorífica de la propia empresa. El transporte de calor es caro, con un máximo de 200 m.
- Destino final del lodo digerido
- Estado financiero (MDL, gobierno, etc)

- Permisos de construcción
- Permisos ambientales.- Por ejemplo el uso como fertilizante
- Adaptaciones de las conexiones existentes

Al encontrar las respuestas positivas a la mayoría de los puntos anteriores se puede tener una primera impresión de la instalación proyectada que incluye un bosquejo de los resultados obtenidos y reunir los grupos de personas para la realización del proyecto, después se podrá entonces seguir con la siguiente fase que es el estudio de factibilidad (Castro, 2009).

## **2.7.2 ESTUDIO DE FACTIBILIDAD**

Los puntos a tomar en cuenta en el estudio de factibilidad se mencionan a continuación.

### **Proveedores**

- Se debe de hacer un rastreo de los proveedores actuales que den el mismo o más próximo a la idea del proyecto
- Las preguntas que generalmente se tienen es aclarar qué tipo de instalación es requerida y que debería ser excluido o incluido como por ejemplo:
  - Cantidad anual de desecho
  - Composición del desecho
  - Cantidad anual de cosustratos, descripción física y composición
  - Infraestructura existente que pueda integrarse a instalaciones anaerobias, incluyendo sistemas de almacenamiento, sistemas de mezclado, bombas, etc
  - Descripción del suelo o cimentación en la cual el digestor será instalado
  - Demanda de calor que será aportado con la instalación del digestor directamente el producido por la unidad CHP

### **Permisos**

- Permisos en el D.F. o en el lugar del proyecto

### **Alimentación eléctrica**

- Usualmente en las horas pico de uso de electricidad es más favorable económicamente al país a producir la propia electricidad.
- Debe realizarse el costo beneficio con base en la corriente eléctrica aportada por la instalación del digestor iniciando con su inversión

### **Utilización de calor**

- En la fase de creación de proyecto se estudió el uso posible del calor producido. En esta fase la demanda de calor debe ser detallada:

- Cantidad
- Variación producida en el tiempo (verano, invierno, etc)

### **Disminución de sustratos**

- Si en el lugar de donde se localiza el digestor no es suficiente el desecho deben buscarse sitios externos
  - Para los sustratos alternos deben considerarse varios aspectos:
  - Tipos de sustratos y cantidad
  - Velocidad o tiempo en que se produzcan y por tanto se tengan disponibles
  - Especificaciones de calidad, contenido de humedad, contaminación, nutrientes
  - Duración del contacto
  - Precio del sustrato
  - Condiciones de pago

### Disposición de nutrientes extras

- Son costos extra para mejorar la eficiencia de la degradación anaerobia

En caso de que sea viable el proyecto se continúa con el cálculo de los parámetros de diseño del digestor (Castro, 2009).

## **2.7.3 DIMENSIONAMIENTO DE UN DIGESTOR**

Para construir el digestor es necesario tomar en cuenta las dimensiones de los contenedores para tener una mejor funcionalidad de dicho elemento (Castro, 2009).

### **2.7.3.1 CÁLCULO DEL VOLUMEN DE UN DIGESTOR**

El volumen del digestor se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$\text{Vol. del digestor} = \left[ \text{desecho (m}^3/\text{año)} + \text{co - sustrato (m}^3/\text{año)} \right] \times \frac{\text{Tiempo de retención (días)}}{365} \quad (2-4)$$

Para degradación mesofílica son 30 días de TRH (Castro, 2009).

### **2.7.3.2 ALMACENAMIENTO DE LODO DIGERIDO**

En caso de contar con un lugar para montar con un sistema de almacenamiento de los lodos digeridos se puede emplear instalaciones selladas o con tanques de techo flotante, se puede determinar el volumen del tanque de almacenamiento de los lodos digeridos mediante la siguiente expresión (Castro, 2009):



$$\text{Vol.} = \text{Sustrato entrante} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right) \times \frac{\text{Tiempo de almacenamiento (meses)}}{12} \times \text{Medida del digestor (m}^3\text{)} \quad (2-5)$$

### 2.7.3.3 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y DIMENSIONES DEL ALMACENAMIENTO

La producción de biogás se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$\text{Biogás} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right) = \left[ M \times DM_M \times \frac{OM_M}{DM_M} \times \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{kg OM}_M} \times 1000 \right] + \left[ CS \times DM_{CS} \times \frac{OM_{CS}}{DM_{CS}} \times \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{kg OM}_{CS}} \times 1000 \right] \quad (2-6)$$

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

### Dimensiones del contenedor del biogás

El volumen se puede determinar mediante la siguiente fórmula (Castro, 2009):

$$\text{Volumen del contenedor de biogás} = \text{Producción diaria de biogás} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right) \times 20\% \quad (2-7)$$

### 2.7.3.4 RELACIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL DIGESTOR

El diámetro del digestor recomendado para el digestor se obtiene mediante la siguiente fórmula (Castro, 2009):

$$D(m) = 2 \times \sqrt{\frac{\text{Volumen del digestor (m}^3\text{)}}{\text{Altura del digestor (m)} \times 3.14}} \quad (2-8)$$

### 2.7.3.5 SISTEMA DE BOMBEO PARA LA ALIMENTACIÓN O RECIRCULACIÓN

El tipo y potencia depende:

- La cantidad de materia seca o sólidos del desecho
- La altura a la que será bombeada

Por ejemplo: Un digestor de 460 m<sup>3</sup> recibe tres veces en un día, 5m<sup>3</sup> de desecho en un tiempo de trabajo de una hora. El contenido de materia seca es de 7 a 10% y una bomba de 3kW será suficiente.

## **Sistema mezclador**

El tipo y medida de mezclador depende grandemente del contenido de materia seca en el digestor y las dimensiones del digestor. La capacidad del mezclador estará entre 2 a 25 kW. Por ejemplo si un digestor de 460 m<sup>3</sup> con un contenido de materia seca de 7%. Un mezclador de 7.5 kW es suficiente. Si el contenido de materia seca incrementa a 10%, el mezclador necesario sería de 11 kW. Se determina con la información adquirida en el estudio de factibilidad para ver si es positivo para llevar a cabo la preparación del proyecto. (Castro, 2009).

## CAPÍTULO 3 ESTUDIO DEL CASO

Residual fue un proyecto de intervenciones artísticas en la ciudad de México que se inauguró con proyectos durante los meses de junio a septiembre de 2010. La propuesta abordó el problema de la basura desde distintas perspectivas y buscó sensibilizar a los habitantes sobre la responsabilidad compartida que conlleva su generación y manejo.

La realización de este proyecto fue posible gracias a la colaboración entre la Universidad Nacional Autónoma de México y el Goethe-Institut Mexiko, así como al apoyo de diversas iniciativas privadas y públicas.

El proyecto tiene la finalidad de llamar la atención sobre la problemática de la basura y el irresponsable manejo de la misma en todo tipo de tiraderos. Igualmente, evidencia la cantidad de energía que podría producirse y lo devastador que resulta para la atmósfera el escape no controlado del gas metano.

Durante un viaje de investigación a la ciudad de México, Tue Greenfort visitó distintos sitios para el tratamiento y confinamiento de la basura, entre ellos tiraderos a cielo abierto y rellenos sanitarios que representan una importante fuente de contaminación ambiental por su alta generación de gases invernadero. Con el propósito de llamar la atención sobre la elevada concentración de gas metano emitida en estos sitios, el artista diseñó un faro para la explanada del MUAC en Ciudad Universitaria, que se iluminó a partir de la combustión del biogás producido por la descomposición de residuos orgánicos.

Éste proyecto tiene por objetivos sociales los siguientes:

- Convocar a la mayor cantidad de personas empleando una obra artística para concientizar a las mismas acerca de la contaminación que se produce con los residuos orgánicos.
- Mostrarles que los residuos sólidos al descomponerse producen gas metano que es un gas contaminante.
- Enseñar a las personas como pueden aprovechar los residuos orgánicos para generar biogás y así contaminar menos.

El proyecto se desarrolló en estrecha colaboración con especialistas y alumnos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, quienes se encargaron del diseño, selección de materiales, construcción, arranque y operación del sistema. El mecanismo diseñado consistió en un digestor que sirvió para el almacenamiento de residuos generados en restaurantes universitarios, en el que tiene lugar un proceso de descomposición igual al que ocurre en tiraderos o rellenos sanitarios, y en la adaptación de un mecanismo óptico que dirigió la luz generada de la combustión de los gases generados.

Aunado a las necesidades sociales también hay necesidades académicas que se pretenden satisfacer con este proyecto, los objetivos que se tienen son conjuntar el arte y la ciencia, construir un sistema para aprovechar los desechos orgánicos producidos en una cafetería y generar biogás para que los estudiantes de ingeniería puedan ver un sistema aplicado en la

realidad, que el proyecto sirva para realizar prácticas en una instalación que comprende un reactor anaerobio.

Otro objetivo es que los estudiantes de ingeniería puedan colaborar con especialista y miembros de otras disciplinas teniendo la experiencia de trabajar en equipo en un proyecto de ingeniería aplicada.

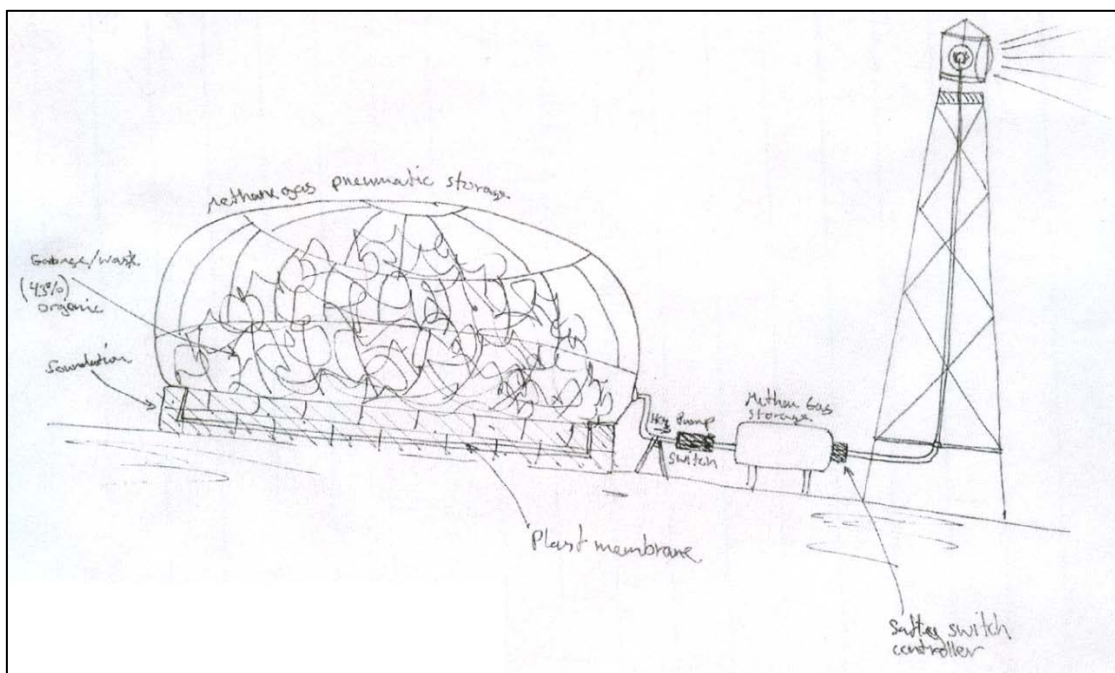
El estudio del caso se realiza para determinar las partes y procedimientos involucrados para el desarrollo del proyecto. La metodología a seguir para realizar el estudio del caso conto de los siguientes puntos:

- Planteamiento del proyecto
- Localización de los elementos necesarios, su cantidad y composición.
- Determinar los consumos energéticos.
- Analizar los requerimientos de construcción y diseño.
- Disposición de los desechos
- Permisos de construcción y ambientales.
- Determinar si es económicamente factible

### 3.1 ESTRUCTURA

El artista Tue Greenfort planteo que la obra consistiera en una torre y un sistema donde se produjera metano aprovechando los desechos orgánicos urbanos. En la Figura 3.1 se muestra el boceto planteado por el artista.

Figura 3.1 Boceto de la estructura



Para la construcción se buscó un equipo de constructores y un arquitecto que se encargaran de realizar las construcciones necesarias, la elaboración de los diseños se realizaría por diferentes estudiantes para posteriormente analizar la mejor opción.

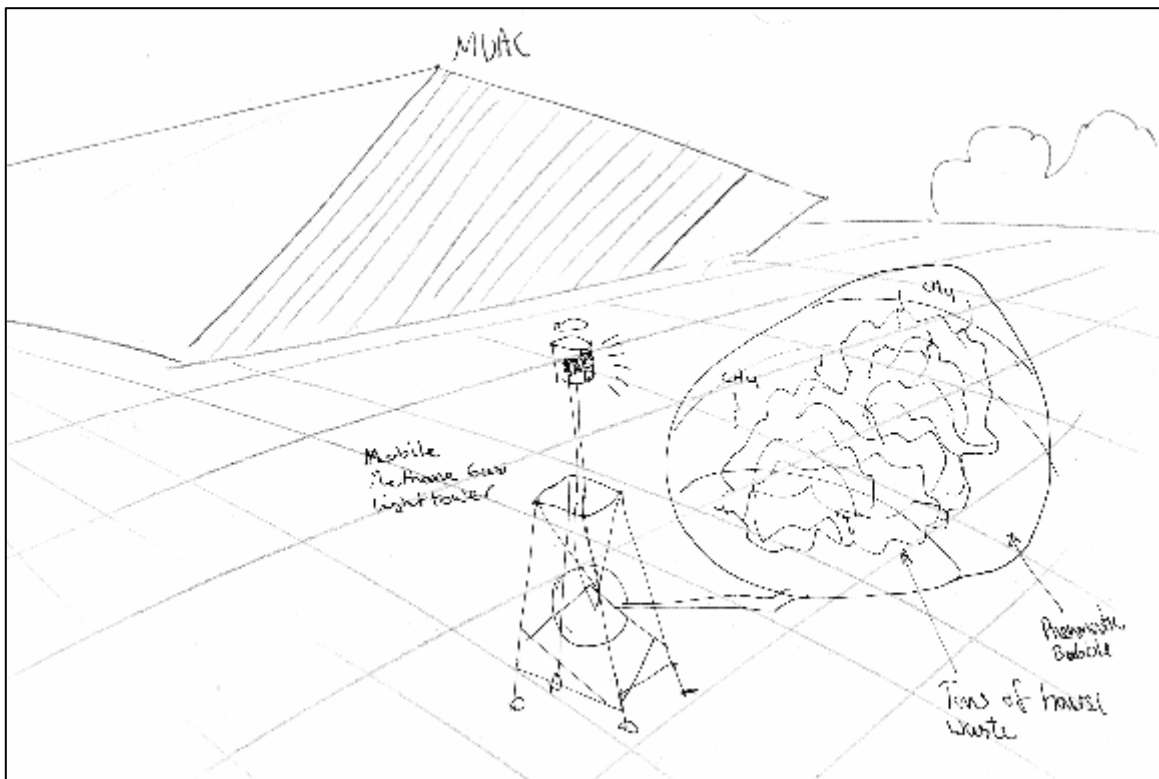
Éste proyecto fue cultural y no presentaba restricciones estrictas respecto al costo. El capital existente se manejaba de forma subjetiva, se proponía un tren de tratamiento y posteriormente se hacían simplificaciones o se modificaba el circuito para reducir costos, sin dejar de lado la seguridad y el objetivo principal del proyecto.

### 3.2 SITIO DE INSTALACIÓN

Lo primero fue identificar el lugar y las características que debe tener éste. Las características que se tomaron en cuenta fueron contar con un espacio amplio al aire libre que fuera concurrido, que en su proximidad se contara con instalaciones eléctricas, un lugar para guardar herramientas y materiales, que fuera de fácil acceso en caso de ocurrir algún accidente y que contara con seguridad.

De los lugares posibles, uno fue en la explanada del MUAC, TUE Greenford había planteado la posibilidad de que quedara colocado como se muestra en la Figura 3.2

Figura 3.2 Boceto de la ubicación de la estructura



Se tomó en cuenta obtener los desechos lo más próximo al sitio del proyecto para facilitar el traslado de los mismos. No existía problema para cubrir la demanda de alimentación ya

que se contaba con diferentes fuentes, que en este caso comprendían cafeterías y desechos de una tienda de cocteles de frutas. El control de la alimentación se realizaría por equipos de estudiantes para regular los parámetros de humedad, pH y las características químicas.

Se emplearon las conexiones eléctricas de 110 V y la toma de agua existente, todos los elementos extra se instalan nuevos. Respecto al consumo de energía eléctrica, existía la capacidad de alimentar todos los equipos requeridos para el proyecto y no existían limitantes respecto al consumo.

Respecto a las necesidades de fuentes de calor, no se tomó en cuenta este parámetro como suministro extra debido a que durante los meses que duró la exposición se contaba con condiciones ambientales favorables para el proyecto.

Para conocer la disposición del lodo digerido se evaluaron diferentes lugares al igual que la fuente de alimentación. El lodo digerido se colocaba en contenedores para su posterior traslado a la planta de composta de la UNAM.

Se requirió permiso para la instalación de la torre en el exterior del MUAC en la Ciudad Universitaria y se reportó la construcción a vigilancia UNAM para que vigilara la construcción. No se requirieron permisos ambientales pero si se notificó a los bomberos para que mantuvieran una revisión constante.

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS

### 4.1 CÁLCULOS DE DISEÑO

Para la realización de los cálculos es necesario conocer las características de los residuos sólidos orgánicos del restaurante. La generación diaria de los residuos se registró durante un periodo de dos meses, obteniendo la generación promedio de residuos sólidos orgánicos de 40.46 kgRSO/día, con un valor máximo de 77 kg-RSO/día y un mínimo de 9.0 kg-RSO/día.

Algunas de sus características físicas y químicas también se tomaron en cuenta, para caracterizar a los residuos del restaurante, se tomó diariamente una muestra representativa de los mismos durante un periodo de 2 semanas (lunes a sábado). Las pruebas abarcaron la determinación de la densidad, pH, contenido de Sólidos Totales (ST), de Sólidos Totales Volátiles (STV) y de Sólidos Totales Fijos (STF). En la siguiente Tabla 4.1 se muestran los valores obtenidos de los análisis realizados a los RSO.

Tabla 4.1 Valores obtenidos en la caracterización de la biomasa

Parámetro	Valor promedio	Valor máximo	Valor mínimo
Densidad, kg/m <sup>3</sup>	715.41	1,090.54	459.52
pH	5.74	6.49	3.77
%ST	22.96	32.66	13.18
%STV con respecto a los ST	94.21	96.30	92.32
%STF con respecto a los ST	5.79	7.68	3.70

La preparación de la alimentación se realizó con la modalidad de digestión húmeda, esto es, un %ST en el sustrato inferior a 15%. Un sustrato con un contenido no muy elevado de ST se maneja con mayor facilidad a menor costo. La mezcla seleccionada fue 1:1 con el valor promedio más alto de 12.40% de ST.

Si se elige la proporción 1:1 para la alimentación, con los 40.46 kg/día de residuos orgánicos generados en promedio se tendrían en torno de 69.16 L/día de sustrato.

El cálculo de ST por día se muestra a continuación:

$$ST = \frac{22.96\% \left( 40.46 \frac{\text{kgRSO}}{\text{día}} \right)}{100\%} = 9.29 \frac{\text{kgST}}{\text{día}}$$

El cálculo de ST por litro se muestra a continuación:

$$ST = \frac{9.29 \frac{\text{kgST}}{\text{día}}}{69.16 \frac{\text{L}}{\text{día}}} = 0.1343 \frac{\text{kgST}}{\text{L}}$$

El cálculo de STV por día se muestra a continuación:

$$STV = \frac{94.21\% \left( 9.29 \frac{\text{kgST}}{\text{día}} \right)}{100\%} = 8.75 \text{ kgST/día}$$

El cálculo de STV por litro se muestra a continuación:

$$ST = \frac{8.75 \frac{\text{kgST}}{\text{día}}}{69.16 \frac{\text{L}}{\text{día}}} = 0.1265 \frac{\text{kgST}}{\text{L}}$$

Su concentración de ST sería cercana a 0.1343 kgST/L (13.43% de ST) y de STV de 0.1265 kgSTV/L (12.65% de STV). Por tanto al sistema anaerobio ingresarían 9.29 kgST/día, que representan a su vez 8.75 kgSTV/día.

#### 4.1.1 DIGESTOR

El proceso anaerobio podrá acontecer tanto en la porción superior del rango psicrófilo (5 a 20 °C), como en límite inferior del mesófilo (20 a 40 °C). Sin embargo, no se descarta la posibilidad de que en casos esporádicos la temperatura se acerque al valor óptimo del intervalo mesófilo, que está en dentro de los 30 a 35 °C. Aunque difícilmente perdurará dicha temperatura más allá de algunas horas. En consecuencia, se asumirá que la temperatura de operación del sistema anaerobio se ubicará la mayor parte del tiempo en el rango psicrófilo.

En la siguiente Tabla 4.2 se describen las características de una planta piloto de la Universidad de Venecia, que se emplearan como referencia para realizar los cálculos

Tabla 4.2 Características de una planta piloto de la Universidad de Venecia, Italia. (Cecchi y col., 1986)

Tipo de sustrato	Tipo de digestor	Volumen del digestor, m <sup>3</sup>	Tiempo de residencia hidráulico, días	Temperatura de digestión, ° C
Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos seleccionada manualmente	Reactor anaerobio continuo de mezcla completa	3	9 – 25	35±2
Velocidad de carga orgánica, kgSTV/m <sup>3</sup> ·día	Tas de producción específica de CH <sub>4</sub> , m <sup>3</sup> /kgSTV	Razón de producción de biogás, m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> <sub>reactor</sub> ·día	Contenido de CH <sub>4</sub> en el biogás, %	Remoción de STV, %
2.1 – 6.9	0.39	1.3 – 3.6	56 - 63	63 - 69

Safley y Westerman introdujeron una ecuación que relaciona las cargas orgánicas de digestores que operan a distintas temperaturas. Los investigadores parten de la ecuación de van't Hoff-Arrhenius, empleada muy a menudo en la predicción del rendimiento de



procesos biológicos a distintas temperaturas (Safley y Westerman, 1990). De ella deducen una expresión

$$VCO_2 = (VCO_1) \exp \left[ \frac{E(T_2 - T_1)}{RT_2T_1} \right] \quad (4 - 1)$$

Donde:

$VCO_1, VCO_2$ : Velocidad de carga orgánica a una temperatura dada, kgSTV/m<sup>3</sup> reactor·día

$T_1, T_2$ : Temperatura absoluta, K

E: Constante de energía de activación, 15,175 cal/mol

R: Constante de gas ideal, 1.987 cal/K·mol

Para hacer uso de la ecuación anterior se estipulan un par de condicionantes. Primero, una concentración de STV de baja a moderada en el influente, y segundo, un TRH prolongado (por arriba de 20 días).

Se emplearán, entonces, como referencia los valores de 35° C en temperatura de digestión y en velocidad de carga orgánica 6.9 kgSTV/m<sup>3</sup>·día, la temperatura  $T_2$  se establece en 20°C.

El cálculo de la VCO se muestra a continuación:

$$VCO_2 = \left( 6.9 \frac{kgSTV}{m^3 \text{ día}} \right) \exp \left[ \frac{15175 \frac{cal}{mol} (293^{\circ}K - 308^{\circ}K)}{1.987 \frac{cal}{K \text{ mol}} (293^{\circ}K)(308^{\circ}K)} \right] = 1.94 \frac{kgSTV}{m^3 \text{ día}}$$

Con la VCO seleccionada, 1.94 kgSTV/m<sup>3</sup>·día, y los valores de Q, 0.06916 m<sup>3</sup>/día, y  $S_0$ , 126.5 kgSTV/m<sup>3</sup>, se calculara el volumen del reactor.

De la fórmula de la velocidad de carga orgánica (VCO) definida como la cantidad de materia orgánica aplicada o suministrada al sistema por unidad de volumen del digestor en un tiempo dado, se obtendrá el volumen del digestor.

La fórmula se muestra a continuación:

$$VCO = \frac{Q S_0}{V} \quad (4 - 2)$$

Quedando para el cálculo del volumen la siguiente fórmula:

$$V = \frac{Q S_0}{VCO} \quad (4 - 3)$$

Donde:

Q: Flujo esperado de sustrato, m<sup>3</sup>/día,

S<sub>0</sub>: Concentración de materia orgánica, kgST/m<sup>3</sup>, kgSTV/m<sup>3</sup>, kgDQO/m<sup>3</sup> ó kgDBO/m<sup>3</sup>

V: Volumen del digestor, m<sup>3</sup>.

El cálculo del volumen del reactor se muestra a continuación:

$$V = \frac{\left(0.06916 \frac{m^3}{día}\right) \left(126.5 \frac{kgSTV}{m^3}\right)}{1.94 \frac{kgSTV}{m^3 día}} = 4.51m^3$$

Para el cálculo del Tiempo de residencia hidráulica TRH, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (4 - 4)$$

El cálculo del TRH se muestra a continuación:

$$TRH = \frac{4.51m^3}{0.06916 \frac{m^3}{día}} = 65 \text{ días}$$

Para estimar la cantidad de metano consiste en recurrir a la tasa de producción específica de metano (PEM), esto es, el volumen producido de dicho gas por cada kilogramo de sólido total volátil introducido al digestor. Recuérdese que el valor de la PEM se obtuvo de la información reportada concerniente a los parámetros de operación de la planta de biogás de la Universidad de Venecia (Tabla 4.2).

El cálculo del metano producido por día se muestra a continuación:

$$V_{CH_4} = (PEM)(STV) \quad (4 - 5)$$

$$V_{CH_4} = \left(0.39 \frac{m^3 CH_4}{kgSTV_{degradado}}\right) (8.75 kgSTV) = 3.41m^3 CH_4$$

Tomando en cuenta el menor porcentaje de metano en el biogás producido, se obtendrá la cantidad de biogás de la siguiente manera:

$$V_{biogás} = \frac{(\%_{biogás})(V_{CH_4})}{\%_{CH_4}} \quad (4 - 6)$$

El cálculo del biogás producido por día se muestra a continuación:

$$V_{biogás} = \frac{(100\%_{biogás})(3.41m^3CH_4)}{56\%_{CH_4}} = 6.09m^3_{biogás}$$

Para los 40.46 kg/día de residuos orgánicos que poseen 8.75 kgSTV, y la tasa PEM igual a 0.39 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/kgSTV<sub>degradado</sub>, el volumen de CH<sub>4</sub> que se tendría entonces alcanzaría 3.41 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>. Si se asume que el CH<sub>4</sub> conforma el 56% del biogás, la producción de biogás rondaría los 6.09 m<sup>3</sup>.

#### 4.1.2 LODO DIGERIDO

Partiendo de una remoción de STV del 63% de la tabla 4.6, se tendrá que la transformación a biogás de los STV será la siguiente:

$$\frac{kgSTV}{día} \text{ transformados a biogás} = 63\% \left( 8.75 \frac{kgSTV}{día} \right) = 5.51 \frac{kgSTV}{día}$$

Quedando como lodos digeridos

$$\frac{kgST}{día} \text{ lodos digeridos} = \left( 9.29 \frac{kgST}{día} - 5.51 \frac{kgSTV}{día} \text{ transformados a biogás} \right) = 3.78 \frac{kgST}{día}$$

#### 4.1.3 ALMACENAMIENTO DEL BIOGÁS

El almacenamiento del biogás tendrá que ser de 6.09 m<sup>3</sup>, repartido entre dos tanques de almacenamiento elásticos con una capacidad aproximada de 3 m<sup>3</sup> a temperatura ambiente y 1 psi, el gas restante quedara almacenado en el espacio. Las características elásticas del material de construcción de los contenedores para el biogás permitirán que en caso de haber un excedente de gas, se compensara aumentando la presión en los tanques, debido a las características del material también se cuenta con una tolerancia de un aumento de hasta el 10% del tamaño original de la geomembrana.

#### 4.1.4 PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS

Remoción del ácido sulfhídrico

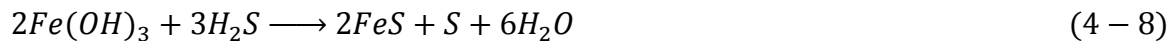
Típicamente, el biogás se compone de las siguientes sustancias en los rangos que las acompañan: Metano (CH<sub>4</sub>) entre 48% y 65%; dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) entre 36% y 41%; nitrógeno (N<sub>2</sub>) mayor al 17%, oxígeno (O<sub>2</sub>) menor a 1%, ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) entre

0.005% y 0.5%; y cantidades traza de otros gases (Muñoz, 1981; Chynoweth e Isaacson, 1987; Rivard, 1994; Ward y col., 2008).

Tomando en cuenta el nivel máximo posible de ácido sulfhídrico de 0.5%

A través del método de adsorción en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , el azufre del  $\text{H}_2\text{S}$  y el hierro del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  interactúan químicamente produciendo agua, azufre elemental (S) y sulfuro de hierro ( $\text{FeS}$ ). Este último es convertido posteriormente en S luego de concluido el proceso de regeneración del lecho. Como ocurre en toda reacción química, la proporción de  $\text{H}_2\text{S}$  susceptible de sustraerse mediante este procedimiento está limitada por la cantidad de hierro presente en el lecho. A este respecto, las proporciones estequiométricas en el proceso de remoción de  $\text{H}_2\text{S}$  por adsorción seca en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , están dados por los coeficientes de las reacciones químicas siguientes (López, 1996):

**a) Reacciones de remoción**



**b) Reacción de regeneración**



Se deduce entonces que por cada 3 moles de  $\text{H}_2\text{S}$  presentes en el biogás se necesita de 1 mol de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , es decir, poniendo las cantidades correspondientes en gramos, 156.19 g de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  por cada 100 g de  $\text{H}_2\text{S}$ . Puesto en otros términos, el biogás a  $25^\circ \text{C}$  y  $1.0871 \text{ atm}_{\text{abs}}$ , que posee una concentración de  $\text{H}_2\text{S}$  del 0.5% en vol. requiere para su desulfuración de  $11.83 \text{ g Fe}_2\text{O}_3/\text{m}^3_{\text{biogás}}$ . Ahora bien, si se considera que la eficiencia del proceso de absorción es del 80%, la cantidad del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  por unidad de volumen de biogás asciende entonces a cerca de  $15 \text{ g Fe}_2\text{O}_3/\text{m}^3_{\text{biogás}}$ .

Con tales cifras, la desulfuración de los  $6.10 \text{ m}^3/\text{día}$  de biogás precisaría de por lo menos 91.5 g de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , mismos que, considerando un ciclo de regeneración de dos semanas (12 días), da un total de 1.10 kg de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Transcurridas las dos semanas se efectuaría la regeneración del lecho para restaurar su capacidad adsorbente.

**Remoción de vapor de agua**

En el caso que aquí se estudia, dada la temperatura prevista para la digestión ( $20^\circ \text{C}$ ), se anticipa un contenido de  $\text{H}_2\text{O}$ , de acuerdo con estimaciones reportadas por Perret en 1982, cercano a  $20 \text{ g}/\text{m}^3_{\text{biogás}}$ . Ahora bien, como se augura una producción de biogás de  $6.10 \text{ m}^3/\text{día}$ , el vapor de agua totalizaría entonces  $122 \text{ g H}_2\text{O}/\text{día}$ , que corresponden

aproximadamente a 0.1524 L H<sub>2</sub>O/día (a 25° C y 1.0871 atm<sub>abs</sub>). Así pues, el contenido de H<sub>2</sub>O que se espera en el biogás es mínimo en comparación con el observado en biogás producido en digestores funcionando a temperaturas por arriba de los 35° C. Para remover los 122 g H<sub>2</sub>O/día del biogás bastaría con emplear aditamentos de sencilla manufactura, como los que se describen a continuación.

La más sencilla forma de disminuir el contenido de vapor de agua del biogás es a través de un dispositivo denominado trampa de condensación o trampa de agua. La trampa de condensación puede valerse de un ensanchamiento y posterior contracción del diámetro de la tubería para crear así una cámara de expansión donde la temperatura y presión del vapor disminuyen, por lo que éste tiende a condensar.

## 4.2 COMPONENTES DE LA ESTRUCTURA

La estructura final se construyó de perfil metálico, en su interior de colocó el digestor de desechos orgánicos, un sistema de alimentación, un sistema de compresión de biogás y un sistema de conexiones. En la parte superior se colocó un sistema de combustión y un sistema giratorio del faro. En la parte exterior en forma auxiliar se colocó un sistema de alimentación y manejo del lodo digerido.

### 4.2.1 DIGESTOR

Para construir el digestor se empleó un tinaco marca ROTOPLAS de 5000 L, de 1.6 m de alto, 2.2 m de diámetro, una tapa en la parte superior de 55 cm de diámetro, de polietileno de baja densidad y doble capa modificado. Contaba con dos salidas en los costados de 2 1/2 in de diámetro a una altura de 1.5 m, una salida de 2 1/2 in de diámetro a 15 cm de altura y una perforación en la parte superior del tanque de 1/2 in de diámetro. La tapa fue sellada por extrusión para que quedara sellada herméticamente. El digestor se muestra en la Figura 4.1.

Figura 4.1 Digestor



#### 4.2.2 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

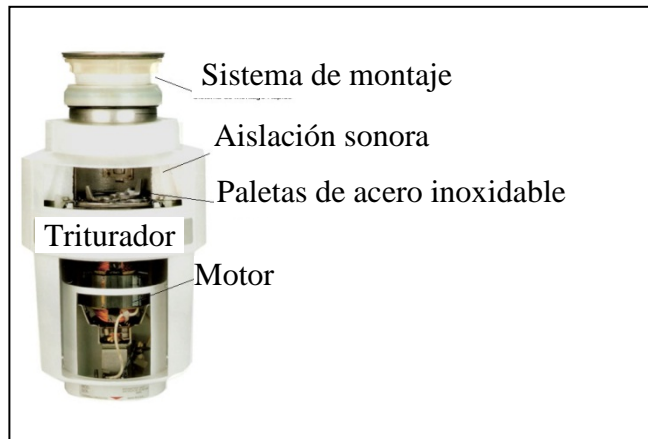
El sistema de alimentación se construyó con una estructura de madera con ruedas, un triturador de alimentos, una tolva de acero inoxidable y un tambo de metal con capacidad de 200 L.

En la parte posterior de la estructura de madera tenía un soporte para un tambo de metal de 200 L modificado para ponerle una salida en un costado a 5 cm de altura de 2 1/2 in.

El sistema de alimentación que se montó consta de una estructura de madera con ruedas la cual sostenía aun triturador de 1 HP marca InSinkEerator Evolution Excel que funcionaba a 120 V, 60 Hz, 1,725 RPM y con capacidad de 25.5 lbs se muestra en la Figura 4.2.

En la parte superior del triturador se adaptó una tolva de lámina de acero inoxidable tipo 304 rectangular cónica de 40 cm de largo por 40 cm de ancho y 40 cm de largo.

Figura 4.2 Triturador



En la parte posterior de la estructura de madera tenía un soporte para un tambo de metal, el tambo reciclado lo empleaban para el transporte de pintura de 200 L, fue modificado para ponerle una salida en un costado a 5 cm de altura, como se ve en la Figura 4.3.

Figura 4.3 Sistema de alimentación



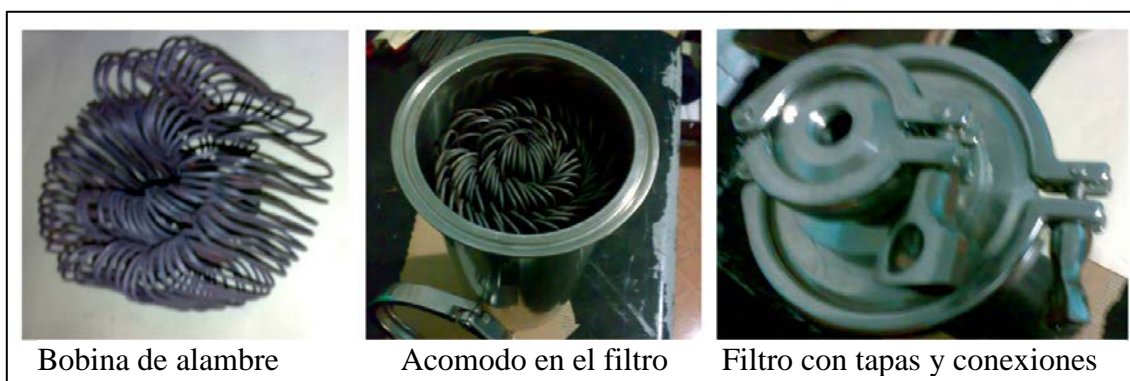
### 4.2.3 SISTEMA PARA EL TRATAMIENTO DEL BIOGÁS

El sistema de tratamiento para el biogás requirió de dos filtros. El primer filtro tenía la función de quitar el ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), construido con acero inoxidable con una salida inferior y una superior de 1/2 in. En su interior se introdujo 1 Kg de alambre de hierro enrollado como se ve en la Figura 4.4, previamente lavado con solución ácida y alcalina. El segundo filtro tendría la función de quitar la humedad del biogás, construido con acero inoxidable en forma de serpentín y con terminales en rosca de 1/2 in, tipo NPT de acero inoxidable.

El sistema de tratamiento para el biogás quedó de la siguiente forma.

El primer filtro construido para quitar el ácido sulfhídrico  $H_2S$ , se construyó con un cilindro de acero inoxidable tipo 304 de 40 cm de largo, 4 in de diámetro, una salida inferior y una superior de 1/2 in y en su interior contaba con tres bobinas de alambre de hierro que en su totalidad sumaban 1 Kg.

Figura 4.4 Filtro para quitar el ácido sulfhídrico



El segundo filtro tenía la función de quitar la humedad del biogás, construido con un tubo de acero inoxidable tipo 304 de 1.0 in de diámetro, en forma de serpentín y con terminales en rosca de 1/2 in, tipo NPT de acero inoxidable tipo 304. Ver figura 4.5.

Figura 4.5 Filtro para quitar la humedad



#### 4.2.4 SISTEMA PARA REGULAR LA PRESIÓN Y ALMACENAR EL BIOGÁS

El sistema para regular la presión del gas requería dos tanques elásticos de 3 m<sup>3</sup> de capacidad cada uno, una polea, una plancha de yeso y ladrillos y un sistema de medición y calibración.

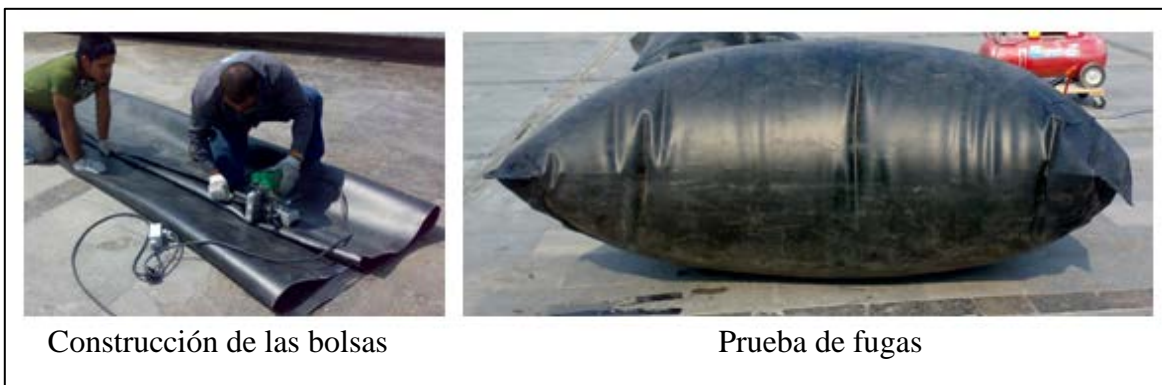
Para almacenar el biogás se construyeron contenedores de polietileno de alta densidad (geomembrana) de 1.0 mm de espesor color negro, cara lisa marca AGRU, selladas por soldadura de extrusión con medidas de de 1.65 m de largo por 1.15 m de ancho, con dos salidas de 1/2 in en los extremos.

Se preparó una plancha de yeso y ladrillos para crear presión sobre los contenedores del biogás. La las planchas tuvo unas medidas de 10 cm de alto, 2 m de largo y 1.5 m de ancho, sostenida en el centro por un lazo y con ayuda de la polea se pondría encima del tanque de polietileno.

Para calibrar la presión y el flujo del biogás se necesitó montar un manómetro de baja presión, un regulador de presión de 1/2 in a 1/4 in y un medidor de gas.

En la Figura 4.6 se ve el proceso de construcción de la bolsa y las pruebas para detectar posibles fugas que se le realizaron.

Figura 4.6 Bolsas elásticas



La plancha de yeso y ladrillos midió 10 cm de alto, 2 m de largo y 1.5 m de ancho, sostenida en el centro por un lazo que pasaba por la polea, la polea estaba anclada en la parte superior de la torre y la plancha estaba colocada sobre las bolsas elásticas, el peso de la plancha estaba regulado para suministrar la presión requerida al biogás. En la Figura 4.7 se muestra el sistema empleado para aumentar la presión en las bolsas de biogás.

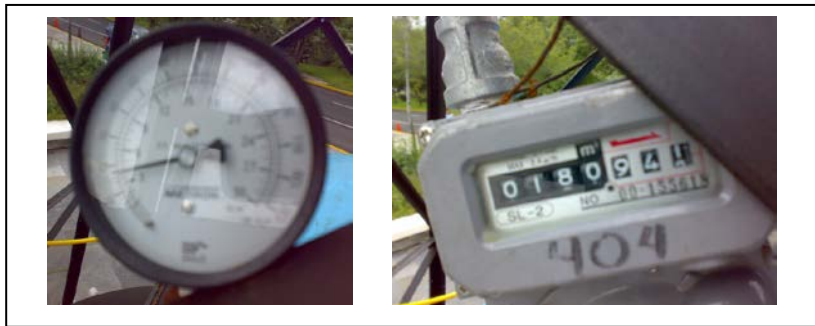


Figura 4.7 Plancha de yeso



Para calibrar la presión y el flujo del biogás se necesitó montar un manómetro de alta presión, un regulador de presión bushing de 1/2 in a 1/4 in y un medidor de gas. En la Figura 4.8 se aprecian los instrumentos empleados.

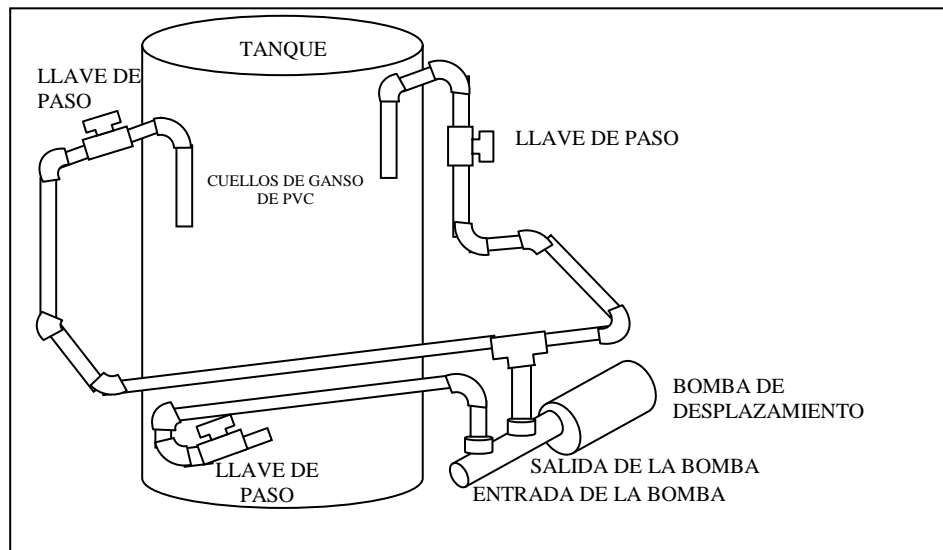
Figura 4.8 Manómetro y medidor de consumo de gas



#### 4.2.5 SISTEMA DE CONEXIONES

Las conexiones para el manejo de líquidos y recirculación pertenecientes al digester incluyen la bomba de recirculación y las interconexiones entre los sistemas. En la siguiente Figura 4.9 se muestra el diagrama de conexiones.

Figura 4.9 Diagrama de conexión del sistema de alimentación y recirculación



Las conexiones que se construyeron fueron las pertenecientes al digestor que incluyeron una bomba de recirculación y las interconexiones entre los sistemas.

Las conexiones internas del digestor llamadas cuellos de ganso fueron construidas con tubos de PVC hidráulico de 1 1/2 in de diámetro y 50 cm de largo. Las conexiones externas del digestor se construyeron con una manguera verde de 1 1/2 in de polietileno de baja densidad reforzada con un espiral del mismo material, las cuales estaban conectadas con una bomba para realizar la recirculación y la alimentación, La bomba fue de desplazamiento positivo para no matar las bacterias del lodo, de 1 1/4 in de diámetro de entrada y salida con adaptadores a 1 1/2 in, un motor de trifásico de 2 HP acoplado con un flujo de 20 gal/min. En la siguiente Figura 4.10 se muestra como quedo el sistema de conexión.

Figura 4.10 Sistema de alimentación y recirculación



Para armar las interconexiones de los sistemas se empleó manguera amarilla de polietileno de alta densidad de 1/2 in de diámetro, codos, uniones T y roscas de polipropileno de 1/2 in uniéndolas con una plancha de calor por medio de termofusión, 7 llaves de paso, de media vuelta, de acero inoxidable y coples de acero inoxidable. En la siguiente Figura 4.11 se muestra la tubería empleada para el biogás.

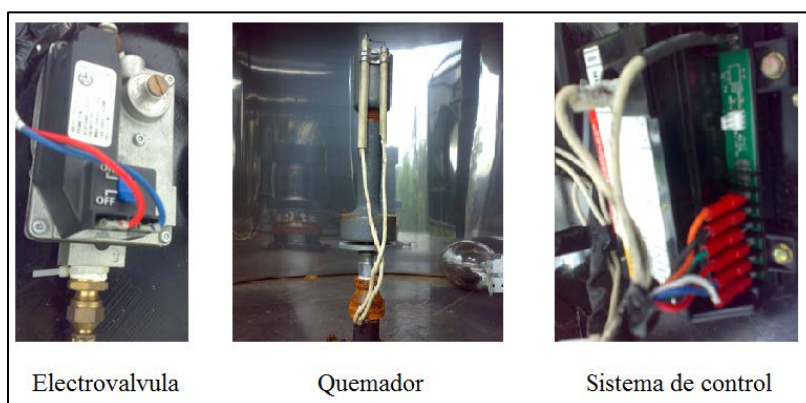
Figura 4.11 Tubería de interconexión entre los sistemas



#### 4.2.6 SISTEMA DE COMBUSTIÓN DEL BIOGÁS

El sistema de combustión requería un sistema de encendido electrónico automático, con temporizador programable, un chispero, electroválvula y un quemador de flama larga con esprea para gas natural. El sistema de combustión quedo armado con un sistema de encendido electrónico, con temporizador programable, un chispero de arco largo, electroválvula de 1/2 in, quemado de flama larga modelo QA-11, un quemador tipo soplete marca PYPESA, con 0.18 m de largo, conexión 1/4 in NPT, 9.500 BTU/hora a 1 psi. Consumo de 0.4185 litros de gas LP/hora con esprea para gas natural. En la siguiente Figura 4.12 se muestran los elementos empleados.

Figura 4.12 Sistema de combustión del biogás



El sistema de combustión quedo montado en un faro giratorio que contaba con un motor con reductor de velocidad y una caja cilíndrica con una perforación circular en un costado y una protección de vidrio.

#### 4.2.7 SISTEMA PARA EL MANEJO DEL LODO DIGERIDO

El lodo digerido se requirió almacenar en tambos de metal reciclados de 200 L y se transportaba con ayuda de un carrito de madera hasta el estacionamiento del MUCA para que posteriormente fuera trasladado a la planta de composta de la UNAM.

#### 4.3 ESTRUCTURA FINAL

La instalación de la estructura artística se realizó en la explanada de la zona cultural al exterior del MUAC en Ciudad Universitaria.

La estructura o torre se construyó de 6.0 m de alto, 2.5 m de ancho y 2.5 m de fondo, la construyeron de perfil metálico resistente y contara con travesaños, un soporte a 1/3 de la altura de la torre, una protección en la base y puertas de acceso. La estructura se construyó de perfil de metal y con travesaños para que mantuviera su forma y fuera resistente, se construyó un soporte a 2 m de su altura para soportar las bolsas de biogás y se le colocó una protección de reja de metal con dos puertas. En la Figura 4.13 se muestra el esquema de la

estructura artística y los elementos que la conformaron y en la Figura 4.14 se muestra una fotografía.

Figura 4.13 Esquema de la estructura

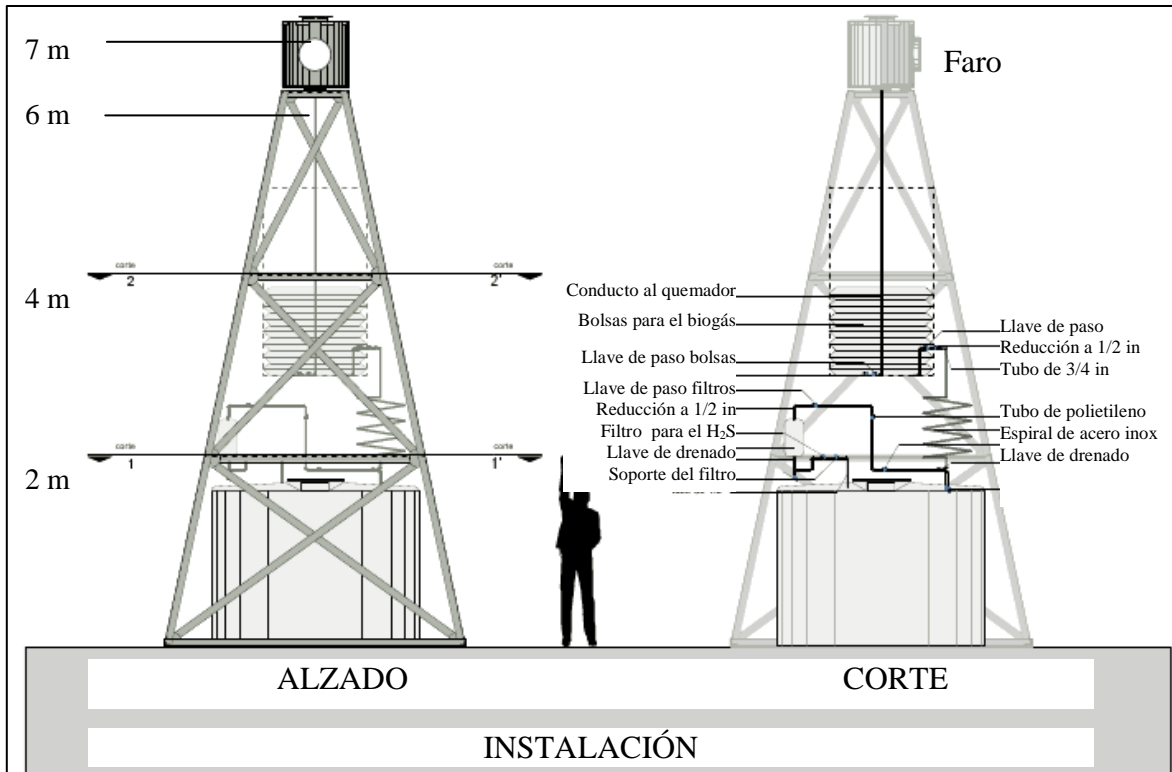


Figura 4.14 Fotografía de la torre



## **4.4 ARRANQUE Y OPERACIÓN DEL SISTEMA**

Para arrancar el sistema, fue necesario hacer lo siguiente:

- Ubicar la zona de instalación de la estructura.
- Colocar el digestor.
- Armar la estructura metálica.
- Armar el sistema de trituración y alimentación.
- Alimentar el digestor al 90% con 1,500 L de inóculo y 3,000 L de residuos orgánicos y agua.
- Neutralizar el pH de la mezcla empleando cal.
- Sellar el digestor, mediante termofusión se fijó la tapa para evitar fugas.
- Interconectar los sistemas correspondientes al tanque, la bomba, las bolsas de geomembrana, los instrumentos de medición y el quemador.
- Conectar los sistemas eléctricos correspondientes a la bomba y el sistema del faro.
- Verificar todos los sistemas.

Para la operación diaria en la mañana 8:00 hrs fue necesario lo siguiente:

- Levantar la plancha de yeso.
- Se cerraban las llaves de paso de biogás de las bolsas de biogás al quemador.
- Se abrían las llaves de paso de biogás del digestor a las bolsas.
- Se recirculaban los residuos en el interior del digestor.

Para la operación diaria en la tarde 19:00 hrs fue necesario lo siguiente:

- Recoger los residuos orgánicos del restaurante y puesto de frutas.
- Preparación de la alimentación del digestor.
- Neutralizar el pH de la alimentación.
- Extracción de los lodos digeridos.
- Extraer muestras de lodo digerido y biogás.
- Cerrar las llaves de paso de biogás del digestor a las bolsas de geomembrana.
- Colocar encima de las bolsas de biogás la pancha de yeso.
- Encender el motor del faro.
- Abrir llave de paso de las bolsas al quemador.
- Confirmar el encendido automático del quemador.

Para la operación diaria en la noche 23:00 hrs se apagaba el motor del faro y se cerraban automáticamente la electroválvula del sistema de encendido.

### **4.4.1 INÓCULO**

El inóculo que se empleó fue 1,500 L que fue donado por la Cervecería Cuauhtémoc Moctezuma, que representaba un equivalente a \$20,000. Se empleó el inóculo y 100 g de

micropan se necesitaron para arrancar el proceso de degradación y acelerar la actividad de las bacterias reduciendo el tiempo de la producción de biogás de 8 semanas a 1 semana.

#### 4.4.2 PREPARACIÓN DE LA ALIMENTACIÓN

La preparación de la alimentación consistió en triturar los residuos orgánicos mezclándolos con agua en el sistema de trituration. La proporción de los residuos fue 1:1 un promedio de 40.46 kg/día de RSO por 40.46 L de agua, aproximadamente 81 L de alimentación diaria. Posteriormente se analizaba el pH y se neutralizaba para mantener la estabilidad del interior del digestor, se realizaba la alimentación al digestor empleando el sistema de recirculación y alimentación como se ve en la Figura 4.15.

Figura 4.15 Preparación de la alimentación del digestor



La operación diaria de la torre consistía en emplear el biogás generado con los residuos orgánicos para encender el quemador, a continuación se muestran dos fotografías tomadas en los dos horarios de operación, en la Figura 4.16.



Figura 4.16 Torre en funcionamiento



#### 4.4.3 GENERACIÓN DEL BIOGÁS Y ENCENDIDO DEL QUEMADOR

Al día se producían aproximadamente  $6.09 \text{ m}^3$  de biogás con 56% de metano.

El encendido del quemador se realizaba a las 19:00 hrs durante 4 hrs, el procedimiento consistía permitir el paso del biogás generado hacia el quemador. Se encendía el sistema giratorio del faro mientras se mantuviera encendido el quemador. A continuación se muestra la flama producida por el biogás en la Figura 4.17.

Figura 4.17 Quemador encendido



## CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

El diseño del proyecto se llevó a cabo planificando en base a los requerimientos planteados por el artista Tue Greenfort, durante este diseño se contó con especialistas de diferentes áreas, estudiantes, instaladores y artistas, tomando en cuenta el diferentes aspectos como comparación de equipos, materiales, costos, dimensiones, tiempos, seguridad, entre otros, para posteriormente instalar dichos equipos bajo las condiciones que cada equipo requería y al así construir la estructura general, al final se puso en marcha el sistema para generar biogás.

La estructura del sistema tuvo una altura de 7 m de altura, un digestor de 5,000 L, producción de biogás de 6.09 m<sup>3</sup>/día, quemador del biogás con un sistema giratorio de luz óptica y un control de presión estricto de biogás. La estructura logró ser operativa y fue expuesta por tres meses en la explanada del MUAC para ser vista por la comunidad universitaria y la sociedad. Durante su operación se extrajeron muestras de lodo digerido y gas para su análisis, demostrando que sí logro generar metano de la forma y proporción deseada.

Con este proyecto se logró comunicar y concientizar a las personas a través del arte empleando la exposición de la torre, medios de comunicación como la gaceta UNAM, página en internet, periódicos, reportajes de televisión, etc. a una gran cantidad de personas sobre la importancia de separar los residuos orgánicos, hacerle saber el impacto perjudicial en el ambiente del gas metano producido por estos residuos. El proyecto tuvo la difusión en 2 programas de radio, 4 canales de televisión, 40 páginas de Internet, 5 periódicos, 3 ruedas de prensa y 1 catálogo.

Para el funcionamiento del prototipo se emplearon residuos orgánicos de una cafetería, un puesto de cocteles de fruta de la UNAM, la central de abastos y un restaurante. Este tipo de desechos se generan diariamente y en gran cantidad, no represento un esfuerzo extra para buscar en otros lados.

Durante la realización de este proyecto se extraían muestras que nos arrojaban datos muy importantes de la evolución de este sistema, dejando una gran experiencia para futuras generaciones. Posteriormente a desmontar los equipos se realizaron las siguientes donaciones a la Facultad de Ingeniería, donación de Geosintéticos Origo S.A. de C.V. donó 4 bolsas de polietileno de alta densidad para captura de biogás de 1mm de espesor, color negro, cara lisa marca AGRU con medidas de 1.65 de ancho y 1.15 m de largo. El valor es de \$15,000 pesos. Donación del Instituto Goethe y MUAC-UNAM de una torre artística que funcionó para el proyecto RESIDUAL que consiste en dos reactores anaerobios, almacenadores de biogás, purificación de biogás, quemador de biogás, sistema de acondicionamiento de desechos, torre estructural de 6 metros de altura y faro. El valor de los equipos asciende a \$350,000 pesos. Estos equipos se colocaron en otro proyecto posterior en el restaurante “El Cibarium” con el fin de que las siguientes generaciones tengan la facilidad de ver y manejar un sistema de este tipo.



El proyecto requirió un equipo multidisciplinario compuesto entre especialistas y alumnos, fueron 15 los alumnos participantes de diferentes carreras como Control, Eléctrica Electrónica, Mecánica de la Facultad de Ingeniería, tanto de licenciatura, especialidad y maestría. Los alumnos que participaron fueron de la Licenciatura de Ingeniería Eléctrica Electrónica para su proyecto final de la materia de “Planeación e Instalación de Sistemas de Bioenergía” (módulo de Sistemas Energéticos); alumnos de la Especialidad en Ingeniería Sanitaria para su proyecto final de la materia de “Manejo, Tratamiento y Disposición de Lodos”; alumnos de la Maestría en Energía para su proyecto final de la materia de “Producción y Utilización de Biocombustibles”; además de alumnos de servicio social en uno o dos meses de colaboración y un alumno de servicio social encargado del proyecto completo.

## ANEXO DIFUSIÓN Y DONACIONES DEL PROYECTO

Este proyecto tuvo difusión mediante:

### PUBLICACIONES

Arte y Ciencia se unen por el ambiente. Gaceta de la Facultad de Ingeniería, UNAM. Agosto del 2010. Época 2, 3(8):23-24. México, D.F. México.

Torre artística en la zona cultural genera energía a partir de desechos sólidos. Gaceta de la UNAM. 28 de Junio del 2010. Número 4,259 página 20. México, D.F. México.

Una puerta para la energía del mañana. Basura que nos quita el frío y nos da de comer. Publicación en capítulo México Investiga. Revista Mexicanísimo. 35:59. Revista publicada en México, EUA, Canadá, Latinoamérica y Europa.

Castro-González, A., Nájera-Ponce de León, H. M., Vargas-Querea, R., Sánchez-Gutiérrez, L. A., Campos-Hernández, A., Rodríguez-Hernández, V., Solórzano-Santana, C., Ortíz Rentería, C. A., Amenyro-Quiroz, J. C., Mora-García, H., Martínez-Salinas, C. y Messina Baas, O. 2011. Conversion from organic solid waste to thermal energy. En: Proceedings of Third International Congress of Alternative Energy / Tercer Congreso Internacional de Energías Alternativas (CINEA). Organizado por el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional, la Secretaría de Educación Pública, CONACYT y CONCYTEQ. 31 de Mayo al 3 de Junio del 2011. Querétaro, Querétaro, México.

### DIFUSIÓN

Conferencia de prensa 3 de junio del 2010 sobre la inauguración del proyecto general “Residual” donde estuvieron presentes el Patronato de la Industria Alemana, Consejera de Cultura en la Embajada de la República Federal Alemana, Directora General de Artes Visuales de la UNAM, Curador y Coordinador de Muca. Roma y Secretario de Desarrollo Urbano y Vivienda SETRAVI. Se asistió como inauguración del proyecto “Energía Residual” que es uno de los 8 proyectos que el proyecto general “Energía Residual” coordinó con el artista Tue greenfort y la Facultad de Ingeniería.

Publicidad del proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. La publicidad consistió en carteles del metrobús circuito insurgentes sur-norte, sistema de transporte colectivo Metro de la Ciudad de México, columna y parabús de la Ciudad de México, distribución de carteles en diferentes puntos de la Ciudad de México. A partir del 8 de Junio al 5 de Septiembre del 2010.

Publicación en periódico “Proceso” en línea del día 22 de junio del 2010. Residual, intervenciones artísticas en el DF. Publicidad del proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en página de Internet: “Iniciativas Urbanas, Arquine”. Página sobre Arquitectura, Diseño y Ciudad desde México. Iniciativas Urbanas: Residual. Información del proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. 25 de Agosto del 2010. México, D.F., México.

Publicidad en Gaceta UNAM del 14, 17, 21 de junio, 2, 9, 16, 23, 30 de agosto del 2010. En cartelera de Cultura UNAM para visitar proyectos de 10 a 18 horas. Publicidad del proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en revista “Chilango” de agosto del 2010 No. 81. Pieza del mes, proyecto “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicidad en folleto Museo Soumaya de julio del 2010. Publicidad del proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicidad en revista “Tiempo libre” del 22 de julio al 4 de agosto, número XXXI, 1577. Proyecto “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicidad en cartelera UNAM del 29 de julio al 4 de agosto del 2010. Para visitar el proyecto “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicidad en revista “Arte al Día-México”. En el apartado de exposiciones. Información del proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, mencionado el de “Energía Residual” del artista Tue Greenfort. México, D.F., México.

Publicación en periódico “El Milenio” del 29 de julio del 2010. Residual, intervención urbana. Información del proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en “Publímetro” del 8 de junio y 28 de agosto del 2010. Continúa UNAM con campaña arte-reciclaje en la Ciudad de México. Información del proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicidad en Gaceta UNAM del 26 de julio del 2010. Recuadro en páginas Publicidad del proyecto de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en “Arts-history” noticiario en Internet del 20 de julio del 2010. La UNAM y el Goethe-Institut presentan Residual. Intervenciones artísticas en la ciudad. Información del

proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en “Arte en la Red” en Internet del 20 de julio del 2010. Energía Residual: Tue Greenfort. Información del proyecto de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en “Kurimanzutto” en Internet del 28 de junio del 2010. Intervenciones artísticas en la Ciudad de México. Información del proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en “mx-df” fotos y comentarios de la Ciudad de México en Internet del 24 de Junio del 2010. Residual. Arte por la sustentabilidad de la Ciudad. Información de eventos donde se menciona el proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en “El Universal” en Internet del 4 de Julio del 2010. Publicidad de eventos donde se menciona el proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicidad en Fahrenheit Magazine en Internet volumen Julio del 2010. Publicidad de eventos donde se menciona el proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicidad en revista “Tiempo Libre” del 15 al 21 de Julio del 2010. Recuadro de publicidad donde se menciona el proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en “Política y Estilo” reportajes de información, crónica, entrevista y opinión en Internet del 28 de Junio del 2010. UNAM instala el proyecto “Energía Residual” a favor del cambio climático. Información sobre la instalación del proyecto “Energía Residual” a favor del cambio climático. México, D.F., México.

Publicación en “Arte en la Red” en Internet del 21 de junio del 2010. Energía Residual: Tue Greenfort. Información del proyecto de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en “Proyecto Cinco” en Internet del 30 de junio del 2010. Información del proyecto de “Energía Residual”, Universitarios desarrollan sistema para generar energía con desechos orgánicos. México, D.F., México.

Publicidad en Guía de Actividades del Cultura UNAM edición junio-julio del 2010. Recuadro de publicidad donde se menciona el proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en “Noticias Universia” en Internet del 28 de junio del 2010. Información del proyecto de “Energía Residual”, desarrolla la UNAM sistema que genera energía a partir de desechos orgánicos. México, D.F., México.

Publicación en “Journalmex Wordpress” en Internet del 27 de junio del 2010. Información del proyecto de “Energía Residual”, desarrollan sistema que genera energía a partir de desechos orgánicos. México, D.F., México.

Publicación en periódico “Reforma”, primera fila. Mugre, basura y arte. 11 de Junio del 2010. Información del proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en Gaceta de la UNAM del 10 de Junio del 2010. Muestra artística sobre el manejo de residuos. Información del proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en “Yahoo Noticias” en Internet del 8 de Junio del 2010. Busca proyecto Residual sensibilizar el espectador. Información del proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en “En el Show” en Internet del 8 de Junio del 2010. Busca Proyecto “Residual” sensibilizar al espectador. Información del proyecto de “Energía Residual”, desarrollan sistema que genera energía a partir de desechos. México, D.F., México.

Publicación en “Giresol” en Internet del 7 de Junio del 2010. México: Toman residuos calles del DF. Información del proyecto de “Energía Residual”, desarrollan sistema que genera energía a partir de desechos orgánicos. México, D.F., México.

Publicación en periódico “Reforma”, sección cultura. “Toman” residuos calles del DF. 7 de Junio del 2010. Información del proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en periódico “La Jornada”. Proyecto alterno para celebrar el bicentenario de la Independencia. Residual plantea el papel del museo ante los actuales desafíos ambientales. 6 de Junio del 2010. Información del proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en periódico “El Universal”, sección kiosko. Artistas tomarán la ciudad para convertirla en capital del reciclaje. A través del MUCA, el proyecto “Residual” busca crear conciencia sobre el problema de la basura. 4 de Junio del 2010. Información del proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en “Crónica de Hoy” en Internet del 4 de Junio del 2010. Transforman con arte 8 espacios del DF para crear conciencia ecológica. Información del proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en “Punto Crítico” en Internet del 4 de Junio del 2010. Artistas tomarán la ciudad para convertirla en capital del reciclaje. Información del proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicidad en revista “Plataforma DF” edición junio 2010. Recuadro de publicidad donde se menciona el proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en “Publímetro” y “Yahoo Noticias” del 3 de junio del 2010. Intervendrán artistas de México y Alemania espacios públicos. Información del proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en “El Financiero” en Internet del 3 de junio del 2010. Será México escenario de ocho propuestas artísticas. Información del proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en “Dirección General de Comunicación Social de la UNAM” en Internet del 27 de junio del 2010. Desarrollan universitarios sistema que genera energía a partir de desechos orgánicos. Información del proyecto “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en “Notimex” en Internet del 23 de junio del 2010. Intervendrán artistas de México y Alemania espacios públicos. Información del proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en revista No. 79 “Chilango” de junio del 2010. ¡Esta obra es basura!.

Información del proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

Publicación en “blancopop” en Internet del 25 de mayo del 2010. Intervenir la Conciencia”. Información del proyecto general “Residual” con los ocho proyectos, incluyendo el de “Energía Residual”. México, D.F., México.

## TELEVISIÓN

Canal 11 Noticias. Aprovechan los residuos orgánicos de cafeterías para obtener biogás. Reportaje realizado a la Dra. Castro sobre el proyecto “Energía Residual”. 6 de Julio del 2010. México, D.F., México.

Cadena 3 Noticias. Residuos orgánicos convertidos en energía. Proyecto “Energía Residual”. 14 de Julio del 2010. México, D.F., México.

Canal 2 Televisa Noticias con Adela Micha. Ingeniería y Arte. Proyecto “Energía Residual”. 2 de Julio del 2010. México, D.F., México.

Canal TVUNAM. Faro con desechos. Reportaje realizado sobre el proyecto “Energía Residual”. 23 de Junio del 2010. México, D.F., México.

Canal 11 Noticias. Prototipo de tratamiento de desechos para generar energía. Reportaje realizado sobre la exposición en evento “Pepenafest”, organizado por el Gobierno del D.F. 14 de Octubre del 2010. México, D.F., México.

## PONENCIAS

Ponencia en el Simposio: La Investigación y el Desarrollo Tecnológico en Ingeniería Eléctrica con el tema: “Energía Residual”. Auditorio Marshall. Facultad de Ingeniería, UNAM. Ciudad Universitaria, D.F., México. 30 de Septiembre del 2010.

Exposición en stand sobre el tema “Energía Residual” en el Festival Internacional de Reciclaje Creativo “Pepenafest”. Organizado por el Gobierno del D.F., Comisión para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos de la Ciudad de México y Círculo Verde. Del 14 al 24 de Octubre del 2010.

Ponencia en el Coloquio sobre trabajos del Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza. Con el tema: “Prototipo de obtención de energía térmica a partir de los residuos”. Organizado por la Coordinación de Investigación de la Secretaría de Posgrado e Investigación en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Auditorio Marshall. Facultad de Ingeniería, UNAM. Ciudad Universitaria, D.F., México. Abril 7, 2011.

Ponencia como Investigadora Invitada en el Programa de Divulgación Científica “Domingos en la Ciencia” con el tema: “Energía Residual” para alumnos de la carrera de Ingeniería en Energías Renovables de la UTT. Impartido en la Universidad Tecnológica de Tulancingo (UTT). Programa organizado por la Asociación Mexicana de Ciencias, Universidad Tecnológica de Tulancingo y el Cuerpo Académico de Química Aplicada de la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería. Tulancingo, Hidalgo, México. 18 de Mayo del 2011.

Ponencia como Investigadora Invitada en el Programa de Divulgación Científica “Domingos en la Ciencia” con el tema: “Energía Residual” para alumnos de la carrera de Ingeniería en Energías Renovables de la UABC. Impartido en la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Campus Valle de las Palmas. Programa organizado por la Asociación Mexicana de Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California y el Cuerpo

Académico de Química Aplicada de la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería. Valle de las Palmas, Tijuana, Baja California, México. 10 de Marzo del 2011.

Reconocimiento al fortalecimiento de la enseñanza y distinciones en el Cuarto Informe de Actividades del Director de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. En el fortalecimiento de la enseñanza se reconoce las visitas de campo que la Dra. Castro realiza con sus alumnos. En las distinciones y reconocimientos, la Dra. Castro es reconocida como evaluadora del CONACYT. En Investigación y Desarrollo de Proyectos, la Dra. Castro desarrolla el proyecto Energía Residual con conjunto con el MUAC. Febrero del 2011.

## CATÁLOGO

Catálogo RESIDUAL, Intervenciones Artísticas en la Ciudad. Publicación que documenta los proyectos artísticos de los artistas Eduardo Abaroa, Minerva Cuevas, Raúl Cárdenas, Claudia Fernández, Tue Greenfort, Ulrich Genth y Heike Mutter, Pia Lanzinger y Thomas Stricker llevados a cabo en diversos puntos del espacio urbano de la Ciudad de México entre el 8 de junio y el 5 de septiembre del 2010. El catálogo cuenta también con ensayos de los curadores, así como los especialistas que intervinieron en la realización de las obras. En el caso de la obra de Tue Greenfort.

## DONACIONES

Donación de Geosintéticos Origo S.A. de C.V. 4 bolsas de polietileno de alta densidad para captura de biogás de 1mm de espesor, color negro, cara lisa marca AGRU, termofusionadas de extrusión con medidas de 1.65 de ancho y 1.15 m de largo. Donación para proyecto: "Energía Residual". 26 de agosto del 2010. El valor es de \$15,000 pesos.

Donación del Instituto Goethe y MUAC-UNAM de una torre artística que funcionó para el proyecto RESIDUAL que consiste en dos reactores anaerobios, almacenadores de biogás, purificación de biogás, quemador de biogás, sistema de acondicionamiento de desechos, torre estructural de 6 metros de altura y faro. El valor de los equipos asciende a \$350,000 pesos.



## BIBLIOGRAFÍA

Albritton, D. y Meira, L. 2001. Technical Summary: A report accepted by Working. Ed. Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Inglaterra.

Angiolani, A. 1960. Introducción a la química industrial, fundamentos químicos y tecnológicos. Ed. Andrés Bello, Ahumada. Chile.

Appels, L., Baeyens, J., Degre`vea, J. y Dewil, R. 2008. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*. 34(6):755-781. Birmingham, Inglaterra.

Bernard, O. y Gouze, J. 2004. Multi-observateurs en boucle fermee pour des modeles biotechnologiques mal connus. Tesis de doctorado. Institute of Environment and Resources. Tecnical University of Denmark. Dinamarca.

Campos, I. 2003. Saneamiento Ambiental. Ed. Universidad Nacional a distancia. San José, Costa Rica.

Castells, X. 2000. Reciclaje de residuos industriales. Ed. Díaz de Santos S.A. Madrid, España.

Castells, X. 2005. Tratamiento y valorización energética de residuos. Ed. Díaz de Santos S.A. España.

Castro, A. 2009. Apuntes de la asignatura "Planeación e instalación de sistemas de bioenergía". Carrera Ingeniería Eléctrica Electrónica. Facultad de Ingeniería de la UNAM. Ciudad Universitaria, D.F México.

Chynoweth, P e Isaacson, R. 1987. Anaerobic digestion of biomasa. Elsevier Applied Science. Nueva York, EE.UU.

Cecchi, F., Traverso, P. y Cescon, P. 1986. Anaerobic digestión of organic fraction of municipal solid waste-digester performance. *The Science of Total Environment.*, 56:183-197.

Dalzell, H. y Biddlestone, A. 1991. Manejo del suelo: producción y uso del composte en ambientes tropicales y subtropicales. Ed. FAO. Roma, Italia.

Deffis, A. 1991. La basura es la solución. Ed. Concepto S. A. México, D.F. México.

Degreve, J., Everaert, K. y Baeyens, J. 2001. The use of gas membranes for VOC-air separations. Katholieke Universiteit Leuven, Departamento de Ingeniería Química. Bélgica.

Dewil, R., Appels L. y Baeyens, J. 2007. Enhancing the use of waste activated sludge as bio-fuel through selectively reducing its heavy metal content. *Journal of Hazardous*

**Materials.** 144(3):703-707. Department of Bioscience Engineering, University of Antwerp, Groenenborgerlaan. Bélgica.

Dewil, R., Baeyens, J., Neyens, E. 2006. Reducing the heavy metal content of sewage sludge by advanced sludge treatment methods. *Environmental Engineering Science.* 23(6):994-999

Dewil, R., Baeyens, J., Roels, J. y Van De Steene, B. 2008. The distribution of sulphur compounds in sewage sludge treatment. *Environmental Engineering Science.* 25(6):879-886.

EPA, 2002. Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2000. Office of Atmospheric Programs, Environmental Protection Agency. Washington, D.C. EE.UU.

Gómez, A., Klose, W. y Rincón, S. 2008. Pirólisis de Biomasa cuesco de palma. Publicación de la Universidad de Kassel. Alemania.

Griffin, P. 2004. Severn Trent Water wastewater treatment plant at Minworth. Technical University of Denmark, Dinamarca.

Hagen, M. y Polman, E. 2001. Adding gas from biogas to the gas grid. Final Report Danish Gas Agency. Technical University of Denmark. Dinamarca.

Hagmann, M., Heimbrand, E. y Hentschel, P. 1999. Determination of siloxanes in biogas from landfills and sewage treatment plants. Symposium on Silicones International Waste Management and Landfill Symposium No7. Cagliari, Italia.

Herrera, R. 2004. Cómo y porqué separar la basura: Una solución al problema de los residuos sólidos en la Ciudad de México. Secretaria del Medio Ambiente, Gobierno del distrito federal. México, D.F, México.

Huppmann, R., Lohoff, H. y Schoroder, H. 1996. Cyclic siloxanes in the biological waste water treatment process-determination, quantification and possibilities of elimination. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry.* 354(1):66-71.

IPCC, 1996. Climate Change 1995: The Scientific Basis. Group I, 2nd Assessment Report. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. Inglaterra.

IPCC, 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. Inglaterra.

Janczak, J. 1981. Madera fuente de energía. Artículo para la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Fuentes de Energía Nuevas y Renovables. FAO. Nairobi, Kenia.

Jenkins, D. 2010. Wood pellet heating systems: The Earthscan Expert Handbook for Planning, Design and Installation. Ed. Earthscan. Inglaterra.

Kapdi, S. Vijay, V., Rakesh, S. y Prasad, R. 2005. Biogas scrubbing, compression and storage: Perspective and prospectus in Indian context. Renewable Energy. Centre for Rural Development and Technology. Indian Institute of Technology. Nueva Delhi, India.

La Jornada, 2010. Diseñan prototipos de casas hechas con botellas de PET y con paja. Ciencias, periódico La Jornada 1 de Diciembre de 2010. México, D.F., México.

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. Ingeniería Mecánica-Eléctrica. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, D.F., México.

Mandujano A., Félix A., Martínez, A. 1981. Biogás, Energía y fertilizantes a partir de desechos orgánicos, manual para el promotor de la tecnología. OLADE Serie Publicaciones Especiales. Cuernavaca, Morelos, México.

Martí, N. 2002. Phosphorus precipitation in anaerobic digestion process. Ed. Dissertation. Florida, EE.UU.

Mejía, G. 1996. Digestión Anaerobia. Universidad Autónoma de Yucatán, folleto técnico. Mérida, Yucatán, México.

Mosquera, P. y Merino, L. 2006. Empresa y energías renovables. Editorial Fundacion Confemental. Madrid, España.

Muñoz, F. 1981. Revisión bibliográfica del proceso de digestión anaeróbica de desechos orgánicos. Tesis de Maestría en Ingeniería (Sanitaria). Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, D.F., México.

Muños, M. y Cuesta, M. 2010. Dimensionamiento ambiental de la RSC (Responsabilidad Social Corporativa). Editorial Gesbiblo. España.

Otero, A. 2001. Medio ambiente y educación: capacitación ambiental para docentes, segunda edición. Ed. Novedades Educativas. México, D.F., México.

Pavlosthatis, S. y Giraldo-Gomez, E. 1991. Kinetics of anaerobic treatment. *Water science and technology*. 24(8):35-59. IWA Publishing. New York, EE.UU.

Ritchie, R. y Fern, R. 2004. Wood Pellets. Ed. EBook. Springfield Oregon, EE. UU.

Rivard, C. 1994. Trash to treasure: NRSL's high-solids digester converts waste to biogas and compost. National Renewable Energy Laboratory. Golden, Colorado, EE.UU.

Ros Roca, 2008. El mejor experto para la transformación de residuos orgánicos. *Tecnologías aplicadas al medio ambiente*. 1:1-44.

Safley, L y Westerman, P. 1990. Psychrophilic Anaerobic Digestion of Animal Manure: Proposed Design Methodology. *Biological Wastes*. 34:133-148.

Saura, J. 2003. El cumplimiento del Protocolo de Kioto sobre cambio climático. Publicaciones de la Universidad de Barcelona. Barcelona, España.

Schweigkofler, M. y Niessner, R. 2001. Removal of siloxanes in biogases. *Bioresource technology*. 83(3):96-183. Institute of Hydrochemistry, Technical University Munich. Munich, Alemania.

SEMARNAT, 2010. Base de datos estadísticos. Módulo de consulta temática. Dimensión ambiental. Publicación de la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F., México.

SENER. 2012. Balance Nacional de Energía 2011. Secretaria de Energía. México, D.F., México.

Seoáñez, M. 2000. Tratado de gestión del medio ambiente urbano. Ed. Mundi-Prensa. España.

Speece, R. 1983. Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. *Environmental Science Technology*. 17(9):416-427.

Speece, R. 1987. Nutrient Requirements. *Anaerobic Digestion of biomass*. 109-129. Editado por Chynowth D. Y y Isaacson, R. Elsevier applied science LTD.

Van de Velden, M., Lokshina, L., Pavlostanthis, S. y Rytov, S. 2002. Distributed model of solid waste anaerobic digestion: Effects of leachate recirculation and pH adjustment. Fulbright Foundation. *Biotechnology and bioengineering*. 81(1): 66–73. Union Europea.

Walls, J., Ross, C., Smith, M. y Harper, S. 1989. Utilization of biogas. *Biomass*. 20:277-90.

Villegas, W., Acereto, P. y Vargas M. 2006. Análisis ultravioleta-visible, la teoría y la práctica en el ejercicio profesional. Universidad Autónoma de Yucatán. Yucatán, México.

Ward, A., Hobbs, P., Holliman, P. y Jones, D. 2008. Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*. 99:7928-7940.

Wellinger, A. y Lindeberg, A. 1999. Energy from Biological Conversion of Organic Wastes. *Biogas upgrading and utilization*. 24(1):1-19. IEA Bioenergy. Winterthur, Suiza

Yúfera, E. 1996. Química orgánica y aplicada: de la molécula a la industria. Ed. Reverté, S.A. España.