



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

"PROYECTO PARA LA CONSTRUCCION DE UNA  
PLANTA GENERADORA DE BIOGAS A PARTIR DE  
DESECHOS ORGANICOS GENERADOS EN LA  
CENTRAL DE ABASTOS DEL D.F."

292574

**TESIS MANCOMUNADA**

PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERA QUIMICA**

**E**

**INGENIERO QUIMICO**

P R E S E N T A N T E

**BERENICE LOPEZ VILLANUEVA**

**E**

**IVAN HUMARAN CURET**



MEXICO, D.F.,



2001.

EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUIMICA



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

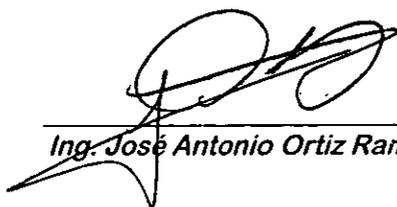
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición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

**Jurado asignado:**

<b>Presidente:</b>	<b>Mauro Cruz Morales</b>
<b>Vocal:</b>	<b>José Antonio Ortiz Ramírez</b>
<b>Secretario:</b>	<b>Rodolfo Torres Barrera</b>
<b>1er Suplente:</b>	<b>Simón Hernández Ortega</b>
<b>2º Suplente:</b>	<b>Landy Irene Ramírez Burgos</b>

**Sitio donde se desarrolló el tema:**  
**Facultad de Química, UNAM.**

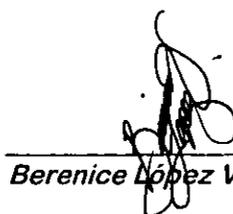
**Nombre completo y firma del asesor del tema:**



---

**Ing. José Antonio Ortiz Ramírez**

**Nombre completo de los sustentantes:**



---

**Berenice López Villanueva**



---

**Iván Humarán Curet**

*A mi México...  
A Sergio y mis padres... en general,  
a todos aquellos que han creído en mí.*

*Berenice.*

*A mis padres, a mi familia, a Jessica  
y a todos los que me han apoyado.*

*Iván.*

## Índice

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
o Introducción	2
o Objetivo	2
<b>2. BIOGÁS</b>	<b>3</b>
o ¿Qué es el Biogás?	4
o El Biogás en el Ciclo global del Carbono	4
o Composición y Propiedades	4
o Usos	4
o Beneficios de la tecnología del biogás	6
o Limitaciones de la tecnología del biogás	9
o Breve historia y perspectivas	10
o El biogás en el ámbito mundial	12
o El biogás en México	25
<b>3. PRODUCCIÓN</b>	<b>26</b>
o Cómo se forma	27
o Operación: Parámetros y optimización del proceso	29
o Diferentes tecnologías	35
o Tipos de plantas	42
<b>4. PROBLEMÁTICA Y SOLUCIONES</b>	<b>44</b>
o Basura en México	45
o Basura orgánica en México DF	46
o Basura en la Central de Abasto del DF	49
o Soluciones	50
o Marco legal e Institucional del Sector Energético	52
<b>5. PROPUESTA DEL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA DE BIOGAS     EN EL DISTRITO FEDERAL</b>	<b>61</b>
o Desarrollo del proyecto	62
o Localización	62
o Condiciones	64
o Selección de tecnología	68
o Dimensionamiento	70
<b>6. ANÁLISIS ECONÓMICO</b>	<b>83</b>
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>90</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>93</b>
<b>9. APÉNDICE</b>	<b>97</b>

**Capítulo 1**

**INTRODUCCIÓN**

## **Introducción**

La "crisis de energía" de los 1970's y la presente necesidad de la conservación de la energía ha ocasionado cierto crecimiento en el interés en la biogásificación de los desechos sólidos. En los 1970's y principios de los 1980's surgió un frenesí de interés en la comunidad agrícola como un medio no sólo para tratar los desechos agrícolas, sino para cubrir una parte de la demanda de energía de las granjas modernas. Sin embargo, con el alivio de la escasez de energía de origen fósil, palideció rápidamente la preocupación con respecto al tratamiento de desperdicios y la producción de energía.

Con una o dos notables excepciones, el interés en biogásificar los RSM (Residuos sólidos municipales), se mantuvo muy ligero.<sup>1-3</sup> Sin embargo, durante los 1980's se empezó a desarrollar un incremento gradual en el proceso como adjunto o hasta como alternativa al compostaje aeróbico. La curiosidad fue estimulada por la aparición del enfoque de la digestión anaeróbica de "sólidos altos"<sup>4,5</sup> - esta digestión anaeróbica de sólidos altos también se ha denominado "compostaje anaeróbico" - la cual se tomó como una alternativa seria al compostaje aeróbico en los 1940's y principios de los 1950's.<sup>6,8</sup>

La digestión anaeróbica de "sólidos altos" difiere de la digestión anaeróbica "convencional" en que el contenido de sólidos del lodo de digestión es del orden de 20% o mayor, mientras que en la digestión convencional, generalmente es menor de 3 ó 4%.

## **Objetivo**

El objetivo de la presente tesis consiste en efectuar una propuesta para el manejo de los residuos orgánicos que se producen en la Central de Abasto del DF, realizando la ingeniería conceptual de una planta de biogás con el fin de obtener una producción constante de un gas combustible totalmente renovable, mismo que a su vez puede ser utilizado como energético para el consumo interno de la Central de Abasto o para ser comercializado, obteniendo en cualquiera de los casos, beneficios económicos (ahorro o ingreso).

En el siguiente trabajo propondremos, a través de la generación de biogás, una alternativa viable tanto para el manejo de residuos sólidos orgánicos, como para la insuficiencia de energéticos no renovables, mediante una planta generadora de biogás.

Se presentará de manera fácil y sencilla el prediseño de una planta de biogás que, como se explicó anteriormente, se ubicará en la Central de Abastos del Distrito Federal debido a las facilidades que presenta el sitio, para el abasto tanto de materia prima (RSM) como del espacio que ocuparía tal instalación.

## **Capítulo 2**

# **BIOGÁS**

## ¿Qué es el biogás?

El biogás se origina de las bacterias en el proceso de bio-degradación de material orgánico bajo condiciones anaeróbicas (sin aire). Las metanógenas (bacterias que producen metano) son el último eslabón en una cadena de microorganismos que degradan la materia orgánica y le regresan los productos de la descomposición al ambiente. En este proceso se genera biogás, una fuente de energía renovable.

## El Biogás en el ciclo global del carbono

Cada año se liberan en todo el mundo de 590-880 millones de toneladas de metano a la atmósfera, a través de la actividad microbiana. Alrededor del 90% del metano emitido se deriva de fuentes biogénicas, por ejemplo, de la descomposición de biomasa, el resto es de origen fósil (por ejemplo, procesos petroquímicos). En el hemisferio norte, la concentración de metano presente está cerca de 1.65ppm.

## Composición y propiedades

El biogás es una mezcla de gases, compuesta principalmente por:

- ⊕ metano ( $\text{CH}_4$ ): 40 – 70% vol.
- ⊕ dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ): 30 – 60% vol.
- ⊕ otros gases: 1 – 5% vol., incluyendo:
  - + hidrógeno ( $\text{H}_2$ ): 0 – 1% vol.
  - + sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ): 0 – 3% vol.

Al igual que las de cualquier gas puro, las propiedades del biogás son dependientes de la presión y la temperatura. También son afectadas por el contenido de humedad. Los factores de mayor interés son:

- ⊕ Cambio en volumen como una función de temperatura y presión
- ⊕ Cambio en el valor calórico como una función de temperatura, presión y contenido de vapor - agua, y
- ⊕ Cambio en el contenido de vapor - agua como una función de temperatura y presión.

El valor calórico es de alrededor de  $6\text{kWh/m}^3$  (esto corresponde a aproximadamente medio litro de diesel). El valor calórico neto depende de la eficiencia de los quemadores o aparatos. El metano es el componente valioso en el aspecto de usar el biogás como combustible. En muchos países el biogás se utiliza como una tecnología ecológicamente amigable y orientada al futuro.

Normalmente, el biogás producido por un digestor se puede usar tal como está, igual que cualquier otro gas combustible. Pero es posible que sea necesario un tratamiento o acondicionamiento ulterior, por ejemplo, para reducir el contenido de sulfuro de hidrógeno en el gas. Cuando se mezcla biogás con aire en una relación de 1:20 se forma un gas altamente explosivo. Por lo tanto, las tuberías con fugas de gas en espacios cerrados, constituyen un peligro.

## Usos

El biogás es un gas ligero que, en principio, puede usarse como cualquier otro gas combustible para el hogar y para propósitos industriales, especialmente para:

- ⊕ Estufas de gas
- ⊕ Lámparas de biogás
- ⊕ Radiadores (calentadores)
- ⊕ Incubadoras
- ⊕ Refrigeradores
- ⊕ Motores

**Estufas de gas:** Las estufas para biogás deben cumplir varios requerimientos básicos:

- ⊕ Operación simple y sencilla
- ⊕ Versatilidad, por ejemplo, para recipientes de diferentes tamaños para cocinar
- ⊕ Limpieza fácil
- ⊕ Costo aceptable y fácil reparación
- ⊕ Buenas propiedades de quemado, por ejemplo, fama estable, alta eficiencia
- ⊕ Apariencia atractiva

Deben realizarse mediciones de prueba para optimizar el ajuste del quemador y minimizar el consumo. La demanda de gas se puede definir sobre las bases de la energía previamente consumida, entonces 1kg de leña equivale a 200L de biogás, 1kg de estiércol seco de vaca equivale a 100L de biogás y 1kg de carbón equivale a 500L de biogás.

**Lámparas de biogás:** Las lámparas de biogás no son muy eficientes energéticamente, esto significa que se calientan mucho.

La brillante luz de una lámpara de biogás es el resultado de la incandescencia. Si se cuelgan directamente del techo, provocan riesgo de incendio.

La producción de luz (flux luminoso) se mide en lúmenes (lm). A 400-500lm, los máximos valores de flux de luz que se pueden lograr con lámparas de biogás son comparables con los de un foco normal de 25-75W. Una lámpara consume alrededor de 120-150L de biogás al día.

Las lámparas de biogás se controlan ajustando el suministro de gas y, primordialmente, de aire. La meta es hacer que el manto de gas se queme con brillo uniforme y un sonido estable (del biogás que se quema y del flujo de gas).

**Radiadores (calentadores):** Los calentadores por radiación desarrollan su radiación térmica infrarroja mediante un cuerpo cerámico que se calienta a 600-800°C (rojo vivo) con la flama de biogás.

La capacidad de calentamiento del calentador mediante radiación se define multiplicando el flujo de gas por su valor calórico neto, ya que el 95% del contenido energético del biogás se convierte en calor. La producción de calentadores pequeños va de 1.5 a 10KW de poder térmico.

Los calentadores de tipo comercial están diseñados para trabajar con butano, propano y gas natural a una presión de suministro de entre 30 y 80mbar. Dado que el suministro primario de aire se fija en la fabricación, el convertir un calentador para uso con biogás, normalmente consiste en reemplazar el inyector; la experiencia muestra que los calentadores de biogás rara vez trabajan satisfactoriamente porque el biogás tiene un bajo valor calórico neto y la presión de suministro del gas está por debajo de los 20mbar. Así, la barra cerámica no se calienta adecuadamente.

En la agricultura se usan calentadores infrarrojos para alcanzar las temperaturas requeridas para la crianza de animales, como cerditos y pollos, en un espacio limitado. La temperatura de crianza para cerditos empieza a 30-35°C para la primer semana y luego va cayendo gradualmente hasta la temperatura ambiente de 18-23°C en la 4ª/5ª semana.

Como regla, el control de la temperatura consiste en levantar o bajar el calentador. En la crianza estable es importante tener una buena ventilación, con el fin de evitar concentraciones excesivas de CO o CO<sub>2</sub>. Consecuentemente, los animales deben de supervisarse regularmente, y la temperatura debe revisarse a intervalos regulares. Los calentadores para cerdos o pollos requieren de 200-300L/h como regla de dedo.

**Refrigeradores:** Las máquinas refrigeradoras del tipo de absorción que operan con amoníaco y agua, equipadas para circulación automática termo-sifón, se pueden rellenar con biogás.

Dado que el biogás es sólo la fuente externa de calor del refrigerador, sólo el quemador debe de modificarse. Para un volumen de 100L de refrigeración, deben asumirse alrededor de 2000L de biogás por día, dependiendo de las temperaturas exteriores.

**Motores de biogás:** Si la producción de un sistema de biogás se usará para alimentar motores, la planta deberá producir por lo menos 10m<sup>3</sup> diarios de biogás.

Por ejemplo, para generar 1kW de electricidad con un generador, se requiere alrededor de 1m<sup>3</sup> de biogás. Por lo tanto, los sistemas a pequeña escala son inadecuados como proveedores de energía para motores.

Tipos de motores: four-stroke diesel, four-stroke ignición por chispa, convertidores a diesel, convertidores de ignición por chispa.

### ***Combustible y Fertilizante***

En muchas áreas rurales, la mayoría de los habitantes dependen del estiércol y los residuos orgánicos como combustible para cocinar y para calentamiento. Tal es el caso, por ejemplo, de las regiones sin árboles de la India, Nepal u otros países de Asia, así como en las Montañas de los Andes en América del Sur y amplias extensiones del continente Africano. De acuerdo con los datos publicados por la FAO, en 1970 se quemaron unas 78 toneladas de estiércol de vaca y 39 millones de toneladas de desperdicios fitogénicos, sólo en la India.

La combustión del estiércol y residuos de plantas es un desperdicio considerable de los nutrientes de las plantas. Los granjeros de los países en vías de desarrollo tienen una extrema necesidad de fertilizante para mantener la productividad de la tierra de cultivo. Sin embargo, los pequeños granjeros continúan quemando fertilizantes potencialmente valiosos, aún cuando no tienen para comprar fertilizantes químicos. Al mismo tiempo, la cantidad de nitrógeno, potasio y fósforo técnicamente disponible en la forma de materiales orgánicos es alrededor de ocho veces la cantidad de fertilizantes químicos realmente utilizados en los países en desarrollo.

Especialmente para los granjeros pequeños, la tecnología del biogás es una herramienta útil para maximizar el uso de recursos escasos:

Después de la extracción del contenido energético del estiércol y otros materiales orgánicos (desperdicios), el lodo resultante todavía es un buen fertilizante, incrementando la calidad general del suelo, así como los rendimientos del cultivo.

### ***Beneficios de la tecnología del Biogás***

Los sistemas funcionales de biogás pueden producir un gran número de beneficios para sus usuarios, la sociedad y el ambiente en general:

- ⊕ Producción de energía (calor, luz, electricidad);
- ⊕ Transformación de desperdicios orgánicos en fertilizante de alta calidad;
- ⊕ Mejora de las condiciones de higiene, a través de la reducción de patógenos, huevecillos de gusanos y moscas;
- ⊕ Reducción de la carga de trabajo, principalmente para las mujeres, en la recolección de leña y en la cocina;
- ⊕ Beneficios ambientales, mediante la protección de suelo, agua, aire y vegetación boscosa;
- ⊕ Beneficios micro-económicos mediante sustitución de energía y fertilizante, fuentes adicionales de ingresos y producción creciente de la cría y la agricultura;
- ⊕ Beneficios macro-económicos mediante la generación descentralizada de energía, sustitución de importaciones y protección ambiental.

Sin embargo, deben considerarse a profundidad el alto capital de inversión requerido y otras limitaciones de la tecnología del biogás.

El apoyo financiero por parte del gobierno se puede ver como una inversión para reducir costos futuros debidos a la importación de productos del petróleo y fertilizantes inorgánicos, mediante el incremento de los costos para salud e higiene y a través de la degradación natural de recursos.

## ***Fertilizante Orgánico a partir de plantas de Biogás***

### ***Sustancias orgánicas en los fertilizantes***

Así como hay sustitutos inorgánicos adecuados para los nutrientes nitrógeno, potasio y fósforo de un fertilizante orgánico, no existe sustituto artificial para otras sustancias como proteína, celulosa, lignina, etc.. Todas ellas contribuyen a incrementar la permeabilidad e higroscopia, mientras previenen la erosión y mejoran las condiciones generales de la agricultura. Las sustancias orgánicas además constituyen la base para el desarrollo de los microorganismos responsables de convertir los nutrientes del suelo en una forma que pueda fácilmente ser incorporada por las plantas.

### ***Nutrientes y Organismos del Suelo***

Debido a la descomposición y agotamiento de parte de su contenido orgánico, los lodos digeridos proporcionan nutrientes de acción rápida que fácilmente entran en la solución del suelo, quedando inmediatamente disponibles para las plantas. Simultáneamente sirven como nutrientes primarios para el desarrollo de los organismos del suelo, como la sustitución de los microorganismos perdidos a través de la exposición al aire durante el esparcimiento del lodo sobre los campos.

### ***Reducción de la Erosión del Suelo***

La materia húmica y los ácidos húmicos presentes en el lodo contribuyen a una humificación más rápida, que a su vez ayuda a reducir la velocidad de erosión (debido a lluvia o dispersión en seco), incrementando el suministro de nutriente, la higroscopia, etc.. El contenido de humus es especialmente importante en los suelos tropicales con bajo humus. La relativamente alta proporción de bloques de construcción orgánicos estables como la lignina y ciertos compuestos de celulosa contribuyen a una inusualmente alta velocidad de formación de humus estable. La cantidad de humus estable formada con lodos digeridos es el doble de la que se puede lograr con estiércol. Además se ha demostrado que la actividad de los gusanos de tierra se estimula más al fertilizar con lodos que fertilizando con estiércol de establo.

### ***Reducción del deslave de Nitrógeno***

Al ser comparado con fertilizantes con alto contenido de nitratos y nitritos más solubles en agua (estiércol, composta), el elevado contenido de amonio del lodo digerido ayuda a reducir la velocidad con la que se deslava el nitrógeno. El nitrógeno del suelo en forma de nitrato o nitrito también es sujeto de mayores pérdidas por desnitrificación que el amonio, el cual primero requiere de nitrificación para asumir una forma desnitrificable. Considerando todos los aspectos, es un hecho probado que el amonio constituye la forma más valiosa de nitrógeno para la nutrición de las plantas. Ciertamente, se puede decir que la eficiencia de Nitrógeno de los lodos digeridos es comparable con la de los fertilizantes químicos. Además de suministrar nutrientes, los lodos mejoran la calidad del suelo al proporcionarle masa orgánica.

### ***Efectos sobre los Cultivos***

Se sabe que generalmente la producción de los cultivos es más alta después de una fertilización con lodos digeridos. La mayoría de los cultivos como papa, rábano, zanahoria, col, cebolla, ajo, etc. y muchos tipos de

frutas (naranja, manzana, guayaba, mango, etc.), caña de azúcar, arroz y yute parecen reaccionar favorablemente a la fertilización con lodos.

En contraste, cultivos como trigo, oleaginosas, algodón y tabaco reaccionan menos favorablemente. Los lodos son un buen fertilizante para pasturas y prados. Los datos disponibles tienen grandes variaciones, pues el efecto fertilizante no sólo es específico de cada planta, sino que también depende del clima y el tipo de suelo. Por lo tanto, no se puede ofrecer información definitiva; tampoco, por la misma razón, es posible ofrecer una comparación económica del costo de los fertilizantes químicos contra el de los lodos de biogás. El único hecho indiscutible es que los lodos de biogás son mejores desde el punto de vista ecológico.

## ***Contribuciones de la Tecnología del Biogás a la Conservación y el Desarrollo***

### ***Conservación***

La conversión del material de desperdicio en fertilizante y biogás, ayuda a proteger al ambiente de cinco formas principales:

- ⊕ El biogás generado puede reemplazar a las fuentes tradicionales de energía como leña y estiércol animal, contribuyendo así a combatir la deforestación y la merma del suelo.
- ⊕ El biogás puede contribuir a reemplazar a los combustibles fósiles, reduciendo así la emisión de los GEI (gases del efecto invernadero) y otras emisiones dañinas.
- ⊕ Drenando el biogás de una planta de biogás y usándolo como fuente de energía, se reducen los dañinos efectos del metano en la biosfera.
- ⊕ Guardando el material de desperdicio y el estiércol en un espacio confinado, se puede minimizar la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, así como los efectos tóxicos en las poblaciones humanas.
- ⊕ Mediante la conversión del material de desperdicio y del estiércol en un fertilizante más conveniente y de alto valor (lodos de biogás), la materia orgánica es más fácilmente accesible para los propósitos de agricultura, protegiendo así a los suelos de la merma y la erosión.

### ***Desarrollo***

Los granjeros, estados industriales, municipios, y gobiernos pueden hacer uso de la tecnología del biogás de diferentes formas para contribuir a sus propios objetivos de desarrollo.

Los **granjeros** pueden desear sustituir insumos como fertilizantes, combustibles para la casa y para motores por los lodos de biogás y por el propio biogás. Un sistema de biogás puede liberar al granjero del trabajo que siempre han hecho de desecho de estiércol o de aplicación del estiércol a sus campos. Mediante el uso del biogás para la cocina, el alumbrado y la calefacción, la calidad de vida de toda la familia puede mejorar. Los establos mejorados, si son parte del sistema de biogás, pueden incrementar la producción de la cría animal. Un abono mejorado para el terreno puede incrementar la producción de las plantas.

Los **estados industriales** pueden, mediante el procesamiento de sus desechos en una planta de biogás, cumplir con las obligaciones legales de disposición de desechos. Al mismo tiempo, pueden generar energía para los procesos de producción, alumbrado o calefacción (calentamiento).

Los **municipios** pueden usar la tecnología del biogás para resolver problemas de disposición de desechos públicos y tratamiento de aguas residuales. La producción de energía de la digestión de biogás, normalmente no es una prioridad, pero puede responder a las demandas públicas de energía, como alumbrado de calles, bombeo de agua y cocina en hospitales o escuelas.

Los **Gobiernos Nacionales** tienen intereses macroeconómicos que pueden mostrar a la tecnología del biogás como una interesante opción en los planes generales de desarrollo. A escala nacional, un número sustancial de sistemas activos de biogás ayudarán a reducir la deforestación, aumentar la producción agrícola, crear empleos y sustituir el uso de combustibles fósiles y fertilizantes. Si los beneficios macroeconómicos son obvios y cuantificables, el gobierno debe incluso considerar el subsidio de sistemas de biogás para encausar un vacío de utilidades micro-económicas.

Los **artesanos, ingenieros y trabajadores de mantenimiento** han sido vistos por largo tiempo como un grupo objetivo para la promoción del biogás. La tecnología de biogás no sólo abre nichos de mercado (oportunidades de empleo) para obreros, plomeros, ingenieros civiles y agrónomos, sino que ellos son los promotores más efectivos de la tecnología del biogás.

### ***Condiciones bajo las que la tecnología del biogás puede contribuir a la Conservación y el Desarrollo***

**Tecnología madura:** El desarrollo de la tecnología del biogás ya ha pasado la fase experimental. Cualquiera que sea el diseño elegido de la planta de biogás, los encargados de su diseminación cargan con la responsabilidad de entregar un producto confiable, durable y amigable.

**Diseño apropiado:** Sólo los diseños apropiados se desempeñarán satisfactoriamente y tendrán una favorable relación costo-beneficio. Los diseños se deben apegar a las siguientes condiciones básicas:

- ⊕ Condiciones climáticas y de suelo
- ⊕ La calidad del sustrato a digerir
- ⊕ La cantidad de sustrato
- ⊕ La asignación de prioridades de los beneficios esperados
- ⊕ El capital disponible
- ⊕ La disponibilidad de habilidades para la operación, mantenimiento y reparación.

**Política gubernamental de apoyo:** las políticas de gobiernos y organizaciones de donación no pueden convertir tecnologías inmaduras y diseños inapropiados en sucesos exitosos, ni pueden crear una demanda artificial de energías alternativas o fertilizantes mejorados. Pero donde existe una necesidad nacional de alternativas de energía y se sienten la creciente carga de contaminantes en el agua, la deforestación y la erosión del suelo, los gobiernos deben de apoyar la diseminación del biogás mediante un marco legal en contra de la sobre explotación de los recursos naturales y a favor de las tecnologías verdes.

### ***Limitaciones de la Tecnología del Biogás***

Actualmente, ya no hay duda de que los sistemas de biogás alrededor del mundo están funcionando en una amplia variedad de condiciones climáticas. Responden bien a las necesidades de las poblaciones rurales pobres, comunidades urbanas y estados industriales. Sin embargo, aún no se ha materializado una amplia aceptación y diseminación de la tecnología del biogás en muchos países. Una de las razones principales, frecuentemente mencionadas, es el gran capital de inversión. Sin embargo, una de las razones del fracaso fueron las irrealmente altas expectativas de los usuarios potenciales. La tecnología del biogás no puede resolver todos los problemas de una granja, de una villa o de una unidad de producción de animales grandes. Para evitar decepciones, deben expresarse claramente las limitaciones de la tecnología del biogás. Las siguientes son preguntas guía; si de ellas una o más no se pueden contestar con 'Sí', el éxito de la tecnología de biogás es cuestionable o hasta imposible.

- ⊕ ¿Realmente hay un problema que la tecnología de biogás pueda solucionar?
- ⊕ ¿Puede garantizarse un suministro permanente y a bajo costo de material biodegradable?
- ⊕ ¿Puede resolverse realmente el financiamiento de los sistemas de biogás?
- ⊕ Para plantas sin calentamiento: ¿El clima permite la biodigestión durante la mayor parte del año?
- ⊕ Bajo condiciones áridas: ¿Está asegurada y se puede pagar la disponibilidad del agua?
- ⊕ ¿Es culturalmente aceptable el uso de heces humanas como sustrato y fertilizante?
- ⊕ ¿Es aceptable el uso de biogás, generado a partir de desechos humanos, para cocinar?
- ⊕ ¿Hay alianzas entre el gobierno y quienes toman decisiones con un cierto grado de conciencia sobre los problemas ambientales?
- ⊕ ¿Hay en la región un número suficiente de obreros con habilidades disponibles que puedan ser capacitados para ser 'técnicos de biogás'?
- ⊕ ¿El número de usuarios potenciales de biogás en la región justifica un 'proyecto de biogás' o el establecimiento de un 'negocio de biogás' privado?

Muchas plantas de biogás tienen severos problemas de olores, y esto puede ser una barrera para la futura extensión y uso de la tecnología. Una planta danesa de biogás "Vester Hjørnitslev Energiselskab" ha tenido una buena experiencia en la eliminación de problemas de olor con un biofiltro BBK.<sup>1</sup>

La tecnología del biogás no es una tecnología universalmente aceptada como el radio de transistor. Una planta de biogás debe adecuarse a un sistema existente de cultivo, producción o desecho de desperdicios. Intentar adecuar el sistema a la planta de biogás, dará como resultado costosas y frustrantes fallas.

La tecnología del biogás tiene numerosos competidores. La energía puede ser producida por plantaciones de madera para combustible o leña (con otros efectos secundarios positivos), por sistemas solares, energía micro-hidráulica, y otras tecnologías de energía renovable. Producir fertilizante de alta calidad puede hacerse de otras formas más baratas, como el compostaje, que se parece más a las técnicas tradicionales.

Lo que hace atractiva a la opción del biogás es el hecho de que esta tecnología puede proporcionar soluciones a diversos problemas simultáneamente. Esto, si existen los diversos problemas.

## **Breve Historia y Perspectivas**

### **Europa / Alemania**

- 1770** El italiano Volta colecta gas de pantano e investiga su comportamiento.
- 1821** Avogadro identifica el metano (CH<sub>4</sub>).
- 1875** Propoff establece que la formación del biogás se lleva a cabo bajo condiciones anaeróbicas.
- 1884** Investigaciones de Pasteur sobre la formación del biogás a partir de los desechos de animales. Él propone la producción del biogás para su uso en las linternas de las calles.
- 1906** En Alemania se construye la primera planta de tratamiento anaeróbico de aguas residuales.
- 1913** Primer digestor anaeróbico con uso de calentamiento.
- 1920** Primera planta de depuración de aguas residuales en Alemania que provee el biogás recolectado en un servicio de gas público.
- 1940** Adición del uso de residuos orgánicos a la depuración de aguas residuales para aumentar la producción del biogás.
- 1947** Investigaciones demuestran que los desechos de una vaca pueden proporcionar 100 veces más biogás que las heces fecales de una pequeña comunidad urbana.
- 1950** Instalación de la primera gran planta agrícola de biogás.

<sup>1</sup> <http://www.bbk.dk/biogás.htm>

- 1950's Se construyen alrededor de 50 plantas productoras de biogás, alimentadas de una mezcla de aguas residuales y desechos fecales. Problemas técnicos llevan al cierre de todas las plantas excepto dos.
- 1974 Después de la primera crisis energética, aumenta el desarrollo y la implementación de nuevas tecnologías en la producción del biogás por los departamentos federales.
- 1985 Se instalan alrededor de 75 plantas productoras de biogás. La demanda de este nuevo recurso aumenta.
- 1990 Gracias a la estabilidad del precio para la formación del biogás y al desarrollo de tecnología se comienza a usar para la generación de energía eléctrica. Gracias al avance tecnológico se comienza a experimentar con diferentes tipos de sustratos para la generación de biogás.
- 1992 Se funda la asociación de biogás alemana "Fachverband Biogás".
- 1997 Existen en Alemania más de 400 plantas agrícolas para la generación del biogás.

### *China e India*

La historia de la exploración y utilización del biogás en China cubre un periodo de más de 50 años. Las primeras plantas de biogás fueron construidas en los 40's por familias prósperas.

En las áreas rurales, se han construido más de 5 millones de pequeños digestores de biogás, y actualmente alrededor de 20 millones de personas usan regularmente el biogás como combustible.

En India, el desarrollo de plantas simples de biogás para recintos rurales empezó en los 50's. En los 70's tuvo lugar un incremento masivo en el número de plantas de biogás, mediante un fuerte respaldo por parte del gobierno.

Mientras tanto, existe más de un millón de plantas de biogás en este país.

Los países industrializados no tenían experiencia suficiente ni las tecnologías apropiadas para basarse en los países en desarrollo. Más bien esta experiencia se identificó en India y China y se transmitió mediante una transferencia sur-norte-sur.

El término tecnología apropiada parecía justificado por el hecho de que esta tecnología se adaptó a las condiciones locales respectivas durante un proceso de "Aprendizaje con países en desarrollo".

Inicialmente la tecnología del biogás y digestión anaeróbica, se concentró en los granjeros a pequeña escala.

En una etapa posterior, las granjas más grandes, así como los terrazas de tratamiento de desperdicios cada vez más, se convirtieron en el objetivo de la tecnología del biogás.

### *Perspectivas*

Hoy, el mayor grado de madurez del mercado se puede encontrar en el área de tratamiento de lodos municipales, purificación de aguas residuales industriales y tratamiento de desperdicios agrícolas. El tratamiento anaeróbico de desperdicios orgánicos municipales está experimentando un "boom" en el Norte de Europa.

La creciente liberación de los gases del efecto invernadero (GEI), el creciente consumo de agua y contaminación de la misma, la decreciente fertilidad del suelo, el manejo insatisfactorio de desechos y la creciente tasa de deforestación, deben verse como parte de los sistemas no sustentables de uso de los recursos, prevalecientes en todo el mundo. La tecnología del biogás es uno de los componentes importantes del hardware en una cadena de medidas para contrarrestar los problemas anteriores. La empresa GATE / ISAT tiene el compromiso de interpretar el papel principal en la creación de una red de contactos y el intercambio de información para asegurarse de que se reconozca el potencial y se haga un uso óptimo de la tecnología del biogás.

## ***El Biogás en el Ámbito Mundial***

Actualmente, la tecnología del biogás se usa prácticamente en todo el mundo, especialmente en aquellas zonas donde no hay reservas considerables de combustibles fósiles. En los países en vías de desarrollo, la preocupación por el aspecto energético se ha manifestado mediante la proliferación de esquemas de biogasificación – particularmente en los países deficientes en fuentes de energía.<sup>9-11</sup> Junto con la proliferación de diseños propuestos, se ha dado una escalada en el número de instalaciones para biogasificación que se suponen en operación en varios países en desarrollo. Aunque es verdad que el número de instalaciones construidas no es pequeño, hay poca evidencia que respalde la magnitud de los números reportados. Desgraciadamente, los reportes normalmente no mencionan el número significativamente grande de aventuras sin éxito dentro de la Biogasificación.

Es bien sabido que la biogasificación ha sido un elemento clave del tratamiento de aguas residuales en los países desarrollados casi desde los principios del tratamiento de las aguas residuales.<sup>12-14</sup> Y mantiene ese estatus en la mayoría de los sistemas modernos de tratamiento de aguas. El rol es principalmente como un medio para tratar los sólidos suspendidos en la corriente y los sólidos producidos en el tratamiento secundario y terciario de aguas residuales. En años recientes se ha convertido en un medio para tratar muchos desechos industriales.

A continuación se presenta una breve reseña de algunos de los datos disponibles en el internet sobre plantas de biogás alrededor del mundo; es importante aclarar que muchas de las páginas visitadas no habían sido actualizadas recientemente, pero sólo se pretende mostrar una visión general.

### **⊕ América**

#### **⊕ Costa Rica <sup>2</sup>**

Sistema de tratamiento de aguas residuales – Beneficio San Juanillo de Naranjo: Depuración de aguas y generación de energía. La nueva legislación obliga al sector cafetalero a buscar soluciones para reducir sus emisiones contaminantes. El Instituto del Café de Costa Rica, junto con el BTG (Biomass Technology Group) de Holanda, han desarrollado un novedoso sistema de tratamiento para las aguas residuales: un tratamiento anaeróbico en un proceso específicamente adaptado a las condiciones de los beneficios Costarricenses.

Las aguas residuales de los beneficios contienen altas concentraciones de azúcares y otros compuestos orgánicos que provienen de la pulpa y del mucilago del café; las bacterias se encargan de la eliminación de la materia orgánica disuelta en las aguas. El producto de excreción de estas bacterias es un producto gaseoso: *Biogás*.

En San Juanillo el biogás se usa para quemar en los hornos que generan el calor para el secado del café, sustituyendo a la leña como combustible. Además, como el proceso anaerobio no requiere inyección de aire, el consumo de energía eléctrica de este proceso es bajo, lo que significa otro aporte positivo al medio ambiente. El sistema en este momento se encuentra bajo prueba intensiva en el beneficio San Juanillo de Naranjo.

#### **⊕ Belice <sup>3</sup>**

El primer proyecto de la GTZ con respecto a la tecnología del biogás en Belice comenzó en 1988. Los consultores y técnicos de biogás de la región construyeron tres plantas de tambor flotante del modelo BORDA dentro de los CTCS (Caribbean Technology Consultancy Services). El leitmotiv del interés, que halló gran resonancia en la realidad socioeconómica de Belice fue:

- 1) La rápida transferencia de conocimiento al sector productivo.

<sup>2</sup> [http://umwelt.imedia.de/biogás/BG\\_ameri1-es.htm](http://umwelt.imedia.de/biogás/BG_ameri1-es.htm)

<sup>3</sup> <http://gate.gtz.de/biogás/reports/belize.html>

2) Inducir una extensa demanda independiente del financiamiento externo.

3) Anclar la tecnología del biogás en una estructura de diseminación que se sostenga a sí misma. Para modificar la tecnología, proporcionar demostraciones prácticas y entrenar a los albañiles locales, se inició la construcción de seis plantas de domo fijo y tres plantas de tambor flotante, con la ayuda de expertos regionales de Guyana, Nicaragua, Jamaica y otras islas caribeñas en dos talleres de biogás. En 1991 fue introducido el modelo CARMATEC. En comparación con la alta necesidad de materiales y trabajo previa (coraza y estructura de acero reforzado), se logró una reducción de costos de entre 15 y 20%. Desde 1993 se han construido 20 plantas (de éstas 5 son plantas institucionales, 13 plantas caseras y 2 plantas de tamaño medio).

El grupo objetivo para las plantas de biogás caseras a la fecha ha estado constituido por los granjeros relacionados con la producción comercial de cerdos.

Los usuarios, hasta ahora, normalmente producen cacahuete, maíz y frijol en terrenos de cultivo de entre 3 y 10 acres. Hasta la construcción de las plantas el uso de fertilizantes orgánicos era poco común. Los nutrientes de las plantas usualmente son proporcionados mediante métodos de poda y combustión, y fertilizantes químicos en pequeñas cantidades.

La tecnología del biogás tiene buena reputación en los niveles gubernamentales y administrativos (principalmente en el Ministerio de Agricultura) responsables por él. Esta buena reputación ha dado lugar a que se asignen cantidades financieras significativas para el pequeño país de Belice.

El gobierno clasifica la tecnología del biogás, particularmente como una parte de sus esfuerzos para mejorar la infraestructura rural (descentralizar la oferta de energía) y sustituir las importaciones (sustitución de fuentes de energía fósiles). Hasta el momento, el aspecto de fertilización solo se ha considerado como efecto secundario de la tecnología del biogás.

#### ⊕ *Bolivia (Región Cochabamba)* <sup>4</sup>

En 1986, la GTZ, en colaboración con la Universidad Mayor de San Simón (UMSS) en Cochabamba, inició un proyecto para diseminar la tecnología del biogás. Hasta 1989 estas actividades fueron parte del Programa supra-regional de Diseminación de Biogás GTZ. De enero de 1990 a finales de 1992 se continuaron las actividades de biogás como componente del Programa Especial de Energía de Bolivia, iniciado en ese momento.

A través de diversas medidas, tomadas por diversas organizaciones, se produjeron 27 plantas, 9 de ellas en el área de Cochabamba y de las cuales, en 1988 sólo una seguía funcionando.

En la idea de la integración de la tecnología en estructuras socio-económicas locales, regionales y nacionales, las plantas de biogás se entendían principalmente como "plantas de fertilizantes", lo cual contribuye a fortalecer una intensiva crianza de animales y a apoyar la producción agrícola.

Sabiendo que las regiones de mayor altitud no son adecuadas para la diseminación del biogás, la *Oficina de Biogás* se concentró en las regiones migratorias de los trópicos, con menor infraestructura. Aquí se construyeron aproximadamente 35 plantas entre 1989 y 1992.

La *Oficina de Biogás* ha identificado un interesante potencial, particularmente en Santa Cruz, en el campo de la sanitización industrial y comunal.

#### ⊕ *Colombia* <sup>5</sup>

El Programa Especial de Energía de Colombia, ubicado en Barranquilla, comenzó a trabajar en Mayo de 1985. De noviembre de 1985 a abril de 1987 y de noviembre de 1987 a marzo de 1989, en colaboración con expertos alemanes, el problema central era "la contaminación de los recursos acuáticos"; el propósito del proyecto era "diseminar la tecnología modificada del biogás". Hasta ese momento, el proyecto se había caracterizado por una gran cantidad de investigación y desarrollo. También se realizaron investigaciones con respecto al uso de los lodos.

<sup>4</sup> <http://gate.gtz.de/biogas/reports/bolivia.html>

<sup>5</sup> <http://gate.gtz.de/biogas/reports/columbia.html>

De noviembre de 1989 a principios de 1992, se pretendía lograr "una contribución a la mejora de la situación de la energía rural y la conservación de los recursos acuáticos, mediante el uso de plantas de biogás". Entre 1985 y principios de 1992 se construyó un total de 25 plantas de biogás.

Las plantas se construyeron principalmente para productores de medianos a grandes de ganado, que tuvieran entre 20 y 2000 cabezas de animales.

El manejo y administración de las granjas tenía una especial influencia sobre el grado de efectividad de la tecnología del biogás. Normalmente eran los obreros quienes alimentaban a las plantas. El administrador jugaba un papel central en la instrucción del equipo de trabajos (staff) sobre el funcionamiento de las plantas de biogás debido a la alta rotación de empleados en algunos casos.

#### ⊕ **Jamaica**<sup>6</sup>

En respuesta a la crisis de energía de los 1970's, desde los 1980's se han conocido e introducido a un ritmo muy lento los bio-digestores agrícolas a Jamaica con el Consejo de Investigación Científica (SCR) como promotor principal. La producción descentralizada de energía era el tema crucial, más que el manejo de desechos y los asuntos ambientales involucrados. La desaceleración del debate de la energía ulteriormente ha reducido la aplicación y asistencia a la tecnología.

Con un total de 120 unidades existentes en Jamaica, se inició un programa nacional en 1993, basado en el control del progreso del proyecto y cuya única misión es la diseminación de los digestores agrícolas existentes de biogás a pequeña escala.

El potencial de producción de biogás ha sido evaluado desde una perspectiva diferente. En general, es enorme, particularmente para tratamiento de aguas agro-industriales en Jamaica.

Como el biogás frecuente y comúnmente se asocia con el manejo de residuos animales en granjas, parece que hay dificultades para promocionar el tratamiento de aguas residuales bajo el término biogás.

El potencial de producción total en Jamaica es de más de 20 millones m<sup>3</sup> de gas por año. Se espera un ahorro por tratamiento aeróbico de aguas residuales mucho mayor a 100GWh por año.

#### ⊕ **África**

##### ⊕ **Burundi**<sup>7</sup>

Las primeras plantas agrícolas familiares se construyeron en granjas de ganado en la región de Cankuzo en 1985. En 1987 se extendió el proyecto para incluir a la región de Ruyigi. Al mismo tiempo comenzó la construcción de plantas de biogás para los sanitarios de escuelas y otras instituciones. Las plantas más grandes se comisionaron a contratistas privados. El concepto fue de auto-diseminación, con base en el entrenamiento de trabajadores, el establecimiento de un sistema de servicio y la apertura de fondos para créditos. Para 1992 se habían construido 206 plantas de pequeña escala y 84 plantas con volumen de digestor superior a 100m<sup>3</sup>.

##### ⊕ **Costa de Marfil**<sup>8</sup>

La historia del biogás comenzó en el matadero de Ferkessedougou. Para éste se desarrollaron y construyeron dos grandes plantas de globo. El gas obtenido se usó para producir la electricidad para el matadero en un generador. En 1982 se construyeron las primeras seis plantas caseras con contenedores de gas de tipo globo en el corral del matadero para los vaqueros y sus familias. El objetivo de esta medida era, principalmente, ahorrar en madera como combustible. En el curso de la posterior diseminación, resultó que la luz producida por el biogás jugó un papel preponderante en la

<sup>6</sup> <http://gate.gtz.de/biogas/reports/jamaica.html>

<sup>7</sup> <http://gate.gtz.de/biogas/reports/burundi.html>

<sup>8</sup> <http://gate.gtz.de/biogas/reports/ivorycoast.html>

demanda de plantas pequeñas de biogás. Por esta razón, en el subsiguiente programa el gas se promocionó como un gas ligero para cocinar.

Para marzo de 1991, se había construido un total de 80 plantas familiares de biogás. En 1992 sólo 10 de las 80 plantas seguían operando. Las principales causas de esto fueron: **defectos técnicos** (además de la falta de mantenimiento) y **causas sociales** (muchas de las plantas eran plantas individuales de demostración y los usuarios realmente no las querían; por otro lado, la poligamia le multiplicaba el trabajo a los hombres). Por otro lado, en la fase de demostración cuando se construyó un gran número de plantas en muchos lugares diferentes, hubo una enorme falta de personal de contacto.

Para hacer atractiva y económicamente factible a la tecnología del biogás se tendrán que tomar medidas más extensas con respecto a la reestructuración interna de las granjas, como introducir un compostaje controlado de los lodos.

#### ⊕ **Kenya**<sup>9</sup>

A mediados de los cincuentas, en Kenya ya se intentaba usar el biogás para obtener energía de la pulpa del café. En los siguientes 25 años, se vendieron más de 100 plantas de diferentes tipos, principalmente a granjeros a gran escala. Después de la crisis de energía, el interés en esta tecnología experimentó un boom. Organizaciones privadas, a menudo con auspicios extranjeros, instalaron un gran número de plantas, particularmente para instituciones públicas, como escuelas y otros centros de educación. Sin embargo, como además de que la calidad técnica dejaba mucho que desear, las condiciones sociales y económicas no fueron consideradas durante el tiempo de implementación de las plantas, las plantas muy pronto dejaron de ser alimentadas y/o dejaron de operar por problemas técnicos. Para aliviar todos los problemas que surgieron como la falta de aseguramiento de calidad, entre otros, en 1985 se contrató a un experto de mucho tiempo para proporcionar asesoría.

De las plantas construidas entre 1984 y 1988, 9 ya no están operando por diversas razones, la más importante es la falta de mantenimiento.

#### ⊕ **Marruecos (Región de Sous-Massa)**<sup>10</sup>

Las primeras actividades relacionadas con el biogás datan de 1983. Dentro de un acuerdo entre el CDER (*Centre de Développement des Energies Renouvelables*) y la ORMVA (*Office régionale de mise en Valeur Agricole*) Haouz, tres expertos tomaron parte en un curso de entrenamiento de 20 días de la tecnología del biogás en China. En el curso de varios programas entre 1983 y 1990, se construyeron 60 plantas de biogás sólo del tipo de domo fijo chino. En una cooperación con UNICEF de 1984 a 1991 (cuya finalidad era mejorar las condiciones sanitarias en las áreas rurales), el Ministerio de Agricultura (con la intención de proteger los bosques y mejorar las condiciones de vida en general de las familias de granjeros) proporcionó aproximadamente 600,000Dh para la tecnología del biogás. La intención era arraigar la tecnología del biogás a través de intensivos programas de entrenamiento y del establecimiento de una estructura nacional de disseminación. En cursos de 15 días, la mayoría realizados en Marrakech, un total de 70 albañiles, 115 técnicos y 61 oficiales de extensión agrícola se familiarizaron con la tecnología del biogás. De acuerdo con los registros del CDER, en 1992 había 255 plantas de biogás en Marruecos, principalmente con volumen de digestor de 10m<sup>3</sup>.

Los resultados de todos estos esfuerzos son decepcionantes. Según una investigación realizada por el CDER, 63 de las 139 plantas (modelo chino) estaban completamente detenidas en 1990, 37 mostraban una producción débil o sólo satisfactoria y sólo 39 se clasificaban como "buenas". La

<sup>9</sup> <http://gate.gtz.de/biogas/reports/kenya.html>

<sup>10</sup> <http://gate.gtz.de/biogas/reports/morocco.html>

ORMVA Haouz declaró que 40 de las 80 plantas que ellos construyeron eran completamente incapaces de funcionar.

El CDER debe tomar el rol de institución involucrada en la investigación, desarrollo y servicios de asesoría y el de fuente nacional de experiencia o "know-how". Un Comité de Biogás, instituido en la primavera de 1992, en el que están representados los tomadores de decisiones de las diversas instituciones afectadas por la diseminación del biogás, está en el punto medio, para constituir el enlace legal entre los niveles políticos de decisión y las corporaciones comisionadas a la diseminación del biogás; éste tendrá la competencia necesaria para definir el camino a seguir. La rehabilitación de 3 plantas de domo fijo y la construcción de tres plantas de 12m<sup>3</sup>, cinco plantas de 20m<sup>3</sup> y dos plantas de 85m<sup>3</sup> (principalmente para manejar motores), han demostrado que la eficiencia técnica de las plantas de biogás se puede alcanzar con la planeación y ejecución calificadas para la construcción. El objetivo es integrar la tecnología del biogás a la estructura de la ORMVA/Souss-Massa para que en el futuro se pueda ofrecer a los granjeros como un servicio normal (altamente subsidiado) de la ORMVA.

## ⊕ Asia

### ⊕ Bangladesh<sup>11,12</sup>

De acuerdo con un estimado - "1.3m<sup>3</sup> de biogás por Kg de estiércol de vaca, se pueden obtener 2.97 x 10<sup>9</sup>m<sup>3</sup> de biogás, lo cual equivale a 1.52 x 10<sup>6</sup>ton de Keroseno (que es el combustible principal en las áreas rurales del país) ó 3.04 x 10<sup>6</sup>ton de carbón. Además también es posible obtener biogás de la excreta humana, los desechos avícolas, la basura, las plantas marinas, etc. Si cada familia en Bangladesh tuviera relación con una planta de biogás, tan sólo la excreta humana daría 1 x 10<sup>9</sup>m<sup>3</sup> de gas".

Entre todas las fuentes renovables de energía, sólo el biogás ha atraído la atención del Gobierno y en este campo se ha llevado a cabo un desarrollo sistemático comparado con otras fuentes renovables. La tecnología del biogás ha alcanzado la mayoría de edad en Bangladesh (es una tecnología probada). El éxito se ha logrado a través de diferentes actividades de las siguientes organizaciones:

- + Agricultural Chemistry Department of Bangladesh Agricultural University (BAU)
- + Bangladesh Academy for Rural Development (BARD)
- + Institute of Fuel Research & Development (IFRD) of Bangladesh Council of Scientific & Industrial Research (BCSIR)
- + Department of Environment (DOE)
- + Bangladesh Small & Cottage Industries Corporation (BSCIC)
- + Danish International Development Agency (DANIDA)
- + Local Government Engineering Department (LGED)
- + Department of Livestock (DLS)
- + Algunas ONG's.

En 1972 Bangladesh entró en la arena de la tecnología del biogás a través de la primer planta de demostración del Dr. M A Karim en la BAU, campus Mymensingh. Esta planta era del tipo domo flotante y el tamaño era de 3m<sup>3</sup>. En 1980 se estableció un departamento llamado "Departamento de Control de Contaminación Ambiental" (EPCD), con la finalidad de extender la tecnología del biogás. En 1981 el DOE inició el programa bajo la subvención del gobierno e instaló, mediante contratistas, 110 plantas de domo fijo y alrededor de 150 plantas de domo flotante. Todas las plantas se proporcionaron sin costo.

En 1985, el LGED, con la iniciativa de su Ingeniero principal Quamrul Islam Siddique, comenzó el estudio, investigación, desarrollo y extensión de la tecnología del biogás. En 1992, el IFRD del BCSIR en colaboración con la Corporación de la Ciudad de Dhaka, construyeron una planta experimental de

<sup>11</sup> <http://gate.gtz.de/biogas/reports/bangladesh.html>

<sup>12</sup> [http://umwelt.imedia.de/biogas/BG\\_asia1-en.htm](http://umwelt.imedia.de/biogas/BG_asia1-en.htm)

biogás con un volumen de digestor de 85m<sup>3</sup> en Dholpur para el tratamiento de basura de la ciudad. Una carga de 52.5ton de basura produjo 2000ft<sup>3</sup> (56.63m<sup>3</sup>) de biogás al día en promedio, durante un período de dos meses, y 40ton de residuo (bio-fertilizante) rico en nutrientes para plantas. El residuo no tenía olor.

En 1992 LGED construyó la primer planta de estiércol humano en la Misión Faridpur Muslim. Antes de la construcción de esta planta, existía una gran aprehensión sobre su aceptabilidad, pero luego de terminarla, la barrera social y cultural desapareció. En 1994 LGED construyó la primer planta de biogás para desechos de avicultura en Utter Khan, Dhaka y 10 plantas de biogás para basura.

Al final de 1994 LGED había construido alrededor de 200 plantas de biogás.

Actualmente, BCSIR, LGED y Grameen Shakti (miembro de Grameen Trust) se encargan de la publicidad de la tecnología del biogás en el país. Hasta ahora (1997) se han terminado alrededor de 6000 plantas de biogás. El LGED pretende instalar 10,000 digestores en los próximos tres años.

Con el "Proyecto de Ahorro de Combustibles de BCSIR" el contenedor de gas se proporcionó sin costo con la condición de que el dueño pagaría el costo del digestor y otros accesorios, que normalmente involucraban la mitad del costo total.

### ⊕ Nepal<sup>13, 14</sup>

Nepal se sitúa en el Himalaya central cubriendo un área total de 147,181km<sup>2</sup>. Tiene una población de 22 millones. Más del 90% de la población se dedica a la agricultura. La situación energética en Nepal se caracteriza por un muy bajo consumo per cápita. La demanda doméstica total se estimaba ser de 248 x 10<sup>6</sup>GJ en 1990/91 y ha ido creciendo con un promedio de 2.4% anual. Casi el 35% de las ganancias por exportaciones se necesita para la importación de productos del petróleo y carbón mineral, que juntos cubren alrededor del 8% de la demanda total de energía. Cerca del 91% de la demanda de energía se cubre con fuentes tradicionales (leña, subproductos agrícolas y desechos animales).

La tecnología del biogás ha tenido mucho éxito en el país, pues no sólo produce gas para el mantenimiento del hogar, sino que además proporciona un buen fertilizante en forma de lodos digeridos. Así el programa nacional de biogás se ha considerado como uno de los programas más exitosos de Nepal. Esto ha sido el resultado de la estandarización del diseño, un extenso sistema de control de calidad y el incentivo financiero proporcionado a usuarios potenciales de la instalación de plantas de biogás en Nepal.

El pionero del biogás en Nepal fue el padre B. R. Sauboll, un maestro belga de la escuela Sn. Xavier en Godavari. Él construyó una planta de demostración en 1955. Sin embargo, las actividades relacionadas con el biogás en Nepal iniciaron con un programa llevado a cabo por las Misiones Unidas pro Nepal en el contexto del Año de la Agricultura 1974/1975, cuyo objetivo era introducir plantas de biogás igual que en la India. La *Gobar Gas Tatha Krishi Yantra Vikas (P.) Ltd.* (Desarrollo de Equipo Agrícola y para Biogás), comúnmente conocida como *Compañía de Gas Gobar* (CGG), fue fundada en 1977 por el *Banco de Desarrollo Agrícola de Nepal* (BDA/N), *Misiones Unidas pro Nepal* (MUN) y la *Corporación de Combustibles de Nepal* (hoy: *Corporación Timber de Nepal - CTN*).

Durante la historia de la campaña se han involucrado muchas fuentes extranjeras en promocionar la disseminación del biogás a través de la CGG. Desde 1988 la *Organización de Desarrollo Holandés* (SNV Nepal) ha estado trabajando con la CGG en la integración de dos expertos alemanes en las divisiones "Unidad de Investigación" y "Sitio de Trabajo". Esta cooperación se expandió a un *Programa de Apoyo para el Biogás* más extenso a principios de 1992, con la intención de colocar 100,000 plantas más para el año 2003. Los objetivos principales de este programa nacional eran reducir la tasa de deforestación, mejorar la salud y las condiciones sanitarias en las áreas rurales e incrementar la producción agrícola. Cada una de las oficinas de disseminación de la CGG vende,

<sup>13</sup> <http://gate.gtz.de/biogas/reports/nepal.html>

<sup>14</sup> <http://www.panasia.org.sg/nepalnet/technology/biogas.html>

instala, repara y da servicio a las plantas de biogás. El departamento de investigación tiene la responsabilidad de desarrollar soluciones técnicas y estructuras de diseminación, cuando sea posible, reducir costos, mejorar el servicio al cliente y la solución de problemas específicos en el uso diario. Hasta 1992/93 sólo había una compañía reconocida de biogás (CGG). Gradualmente, este número aumentó en 11 en 1993/94, 23 en 1995/96, 36 en 1996/97, 41 en 1997/98 y 39 en 1998/99. De manera similar sólo había un sitio de trabajo de la CGG para la fabricación de aparatos para biogás. Sin embargo, hoy hay 13 proveedores reconocidos locales y 3 internacionales de aparatos para biogás en el país.

Hoy día, se han reconocido 39 Compañías por la instalación de plantas de biogás, y para Enero de 1999, había 49,500 plantas operando, lo cual representa tan sólo el 3.8% del potencial total.

El Grupo de Promoción del Biogás en Nepal (GPBN) fue establecido como una organización sombrilla en 1994, por parte de las compañías constructoras de biogás. Es una organización no lucrativa para el desarrollo sostenible del programa de biogás en Nepal. Se formó con la iniciativa de las compañías constructoras de biogás para la promoción, extensión, coordinación, investigación, entrenamiento y estandarización de la tecnología del biogás en el país. El objetivo general del GPBN es desarrollar y diseminar al biogás como una fuente natural, sostenible de energía en las áreas rurales del país. Actualmente, el GPBN tiene 44 miembros (de los cuales sólo 39 están reconocidos por el Programa de Apoyo al Biogás (PAB)) y un miembro honorario (G. Devkota). Existe un continuo monitoreo y evaluación de los programas de biogás por parte de consultores, tanto locales como externos. El monitoreo del control de calidad durante las visitas de campo es un proceso corriente.

La planta de domo fijo nepalí es un desarrollo peculiar de Nepal que se ha modificado de varias formas a través de los años. Las razones del éxito del biogás en Nepal se resumen en los siguientes puntos:

- + Después de varios años de investigación y desarrollo de la tecnología, se han introducido diseños de plantas y aparatos de biogás confiables y probados.
- + Se ha realizado una inspección apropiada del potencial, así como de la demanda de las plantas en el país.
- + Se han efectuado actividades de promoción y concienciación a diferentes niveles.
- + Como resultado de los estudios financieros realizados, se están proporcionando continuos subsidios a través de los bancos.
- + Las capacidades técnicas se han examinado adecuadamente y se ha entrenado a los albañiles locales.
- + Se realizan visitas de control de calidad con el fin de mantener los estándares para las plantas.
- + Se han formado interconexiones organizacionales como el Comité de coordinación de biogás y el comité de coordinación de lodos.
- + Se ha introducido el programa de extensión de lodos para incrementar el mercado de las plantas de biogás y maximizar los beneficios de las plantas de biogás en operación mediante mejoras en el uso de los lodos en las tierras de cultivo, mejorando la producción. Además ha ayudado a reducir la carga de trabajo, especialmente para las mujeres y niñas.
- + Se formó una asociación de todas las compañías constructoras de biogás, el GPBN, para la promoción y extensión del biogás. De manera similar, se estableció el Centro de Promoción de Energías Alternativas.
- + Ha habido una mejora significativa en el ambiente de la comunidad debido a que el drenaje del sanitario se alimenta a las plantas de biogás, ahorrando en leña y keroseno, y mejorando el ambiente.
- + Generación de fuentes de empleo en áreas rurales.

#### ⊕ Java <sup>15</sup>

BORDA (Asociación Bremen de Investigación y Desarrollo en el Extranjero), una empresa de consultoría alemana, ha estado trabajando desde 1989 con la ONG LPTP (Lembaga Pengembangan Teknologi Pedesan = Instituto para el Desarrollo de Tecnología Rural) en un *Proyecto Integrado de Desarrollo Rural* (PIDR) auspiciado por el Ministerio Federal de Cooperación Económica de Alemania. Al principio de los ochentas se instaló un gran número de plantas de biogás en el área del proyecto a través del servicio de extensión agrícola de la administración regional. Ninguna de las plantas suministró jamás energía para sus operadores debido a serios defectos en el sistema de la planta.

<sup>15</sup> <http://gate.gtz.de/biogas/reports/java.html>

Consecuentemente, el personal del proyecto enfrentó escepticismo y falta de interés por parte de los miembros de la administración regional. Mientras, el LPTP ha demostrado que se pueden construir plantas de biogás técnicamente perfectas y que son de gran utilidad para los granjeros. La situación primera ha cambiado drásticamente sobre esta base, de tal forma que la LPTP, en cooperación con la administración regional, pudo arreglar una conferencia nacional sobre biogás con alrededor de 100 participantes en el Otoño de 1992.

A finales del Otoño del 1990, un ingeniero de BORDA supervisó la construcción de las primeras tres plantas de domo fijo. En el Otoño de 1992 había 58 plantas de biogás y para Diciembre ya se habían construido otras 27 plantas, incluyendo una planta a gran escala con un volumen de digestor de 93m<sup>3</sup> para un productor de carne seca. El gran número de plantas nuevas se puede atribuir a que se ha extendido el área de diseminación, para incluir una comunidad entre Cepogo y Boyolali.

La buena calidad y las altas producciones de gas (0.275m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> de volumen de digestor), combinadas con un ejemplar servicio de asesoría en fertilizantes, han significado que tanto el departamento de biogás como el PIDR, tengan una buena reputación en la región.

#### ⊕ *China (Sichuan)*<sup>16</sup>

Las primeras plantas caseras de biogás fueron instaladas por familias acomodadas en los cuarentas. Sin embargo, el biogás no fue extensamente propagado o promovido sino hasta cerca de 1970. Luego de una fase de campañas masivas se construyeron algunos millones de plantas de biogás, pero su funcionamiento fue pobre, debido a defectos técnicos. El punto focal de la diseminación del biogás fue la provincia de Sichuan, especialmente el área alrededor de Mienyang. Debido a las condiciones climáticas, el biogás desempeñó un papel menos importante en la China del Norte. Las plantas de biogás se esparcieron más rápido en las áreas donde los políticos se avocaron particularmente a esta tarea y en donde la infraestructura de tráfico estaba bien desarrollada, regiones que de hecho no se contaban entre las más pobres.

La interacción de los tres niveles, estado, cooperativa y casa, fue una atmósfera favorable para la diseminación del biogás en periodos de fuerte tendencia socialista. El estado proporcionó las condiciones esqueleto, las cooperativas o comunas proporcionaron el material y pagaban la labor de las plantas que de otra forma serían privadas. Del lado del usuario difícilmente había una coalición de intereses entre las comunas y cooperativas. Esta interesante interacción de diversos niveles ha cesado desde la introducción de la privatización. Por ejemplo, desde la privatización la paja se usa con mucho menos frecuencia en las plantas de biogás, pues el vaciado de las plantas, que involucra mucho trabajo, deja de ser necesario ya que la paja digerida no se tiene que proporcionar para su uso en las tierras comunales de cultivo, como se hacía durante la administración comunal.

Desde 1982 se han prescrito y aplicado estándares obligatorios en la construcción de plantas de biogás. Simultáneamente, la agresiva estrategia de diseminación se ha reducido, la investigación científica se ha intensificado y los subsidios directos se han disminuido. Desde que se abolieron los subsidios el número de plantas construidas anualmente ha declinado. En Sichuan, en 1992 había alrededor de 1.7 millones de plantas en operación.

De acuerdo con los oficiales de alto nivel del biogás, la estrategia de diseminación de biogás se basa en el reconocimiento de que las plantas de biogás son importantes para ahorrar energía, para mejorar la agricultura y para proteger al ambiente. Sin embargo, se asume que estos predominantes objetivos son de menor importancia para el dueño potencial de la planta al tomar la decisión de invertir. Por esta razón, se enfatiza, como incentivo para la inversión, que el integrar inteligentemente la planta de biogás en el proceso de producción producirá un incremento en los ingresos. Aquí el papel más importante lo interpreta la utilización de los lodos. Así, se propagan los procesos de producción que involucran el uso de los lodos para el cultivo de hongos comestibles, la crianza de peces, el control de pestes o como alimento para cerdos; lo que a su vez incrementa el valor de los subsecuentes

<sup>16</sup> <http://gate.gtz.de/biogas/reports/china.html>

productos. El uso de las heces humanas como sustrato es, por supuesto, una condición y, de hecho, se practica en el 80% de los casos.

#### ⊕ **India** <sup>17,18</sup>

El desarrollo técnico del biogás empezó con una iniciativa de Gandhi para desarrollar tecnologías para los pueblos en los cincuentas. La tecnología del biogás se está promocionando ampliamente en la India por el aspecto energético. Esto se deriva de la situación crucial de suministro de energía para la población en el país. Después de China, la India es el país donde inició el desarrollo de plantas de biogás poco complicadas para los Trópicos, las cuales son sencillas de operar. La diseminación masiva de plantas de biogás ha sido propagada e iniciada para casas rurales desde los 1950's, sin embargo, este desarrollo no experimentó un alza notable sino hasta los setentas, así que para 1980 se habían instalado 100,000 plantas.

La diseminación del biogás en la India experimentó un gran número de reveses ya que una gran proporción de las plantas construidas no se usaban o sólo se usaban insuficientemente. Las razones por un lado, fueron las inmaduras propiedades técnicas de las plantas hasta principios de los ochentas, y por el otro, la infimamente desarrollada estrategia de diseminación, la cual no reconoció la importancia del entrenamiento de los usuarios y de los servicios de seguimiento hasta muy tarde. A pesar de esto, la tecnología del biogás fue constantemente apoyada por el gobierno hindú. En 1982, el recientemente fundado *Departamento de Fuentes de Energía No-Convencionales* (DFEN) como un departamento del *Ministerio de Poder y Fuentes de Energía No-Convencionales* (MPFEN) tomó el control central de la diseminación del biogás. Entre tanto, hay alrededor de 1 millón de plantas de biogás caseras en la India, de las cuales 70-80%, se asume que están operando. El trabajo actual de diseminación lo realizan los gobiernos de los estados hindúes, las corporaciones públicas *Khadi and Village Industries Comision* (KIVC) y la *Junta Nacional de Desarrollo Lácteo* (JNDL), pero principalmente, incontables ONG's. Dentro del marco de ayuda prescrita por MPFEN, cada estado es responsable por los lineamientos aplicables en su región. Por lo tanto, las disposiciones individuales prevalecientes varían de estado a estado.

Un total de siete tipos diferentes de plantas están oficialmente reconocidos por el MPFEN, de los cuales 5 son de tambor flotante y los otros 2 son de domo fijo. Sólo estos tipos de plantas y sólo cuando no exceden una producción nominal de 10m<sup>3</sup> de gas diarios (un volumen de digestor de aprox. 30m<sup>3</sup>), pueden solicitar subsidios pagados por el gobierno central.

El instrumento más importante en la promoción de la tecnología del biogás es la prestación de subsidios pagados mediante los costos de inversión, lo cual beneficia directamente a los granjeros. Cualquiera que instale una planta de biogás en la India tiene derecho a un subsidio pagado por el gobierno central.

Hasta ahora se han construido más de 2 millones de plantas de biogás en la India. Se han creado casi 200,000 empleos permanentes para los proveedores masculinos de las familias hindúes.

#### + **Orissa**

La autoridad central coordinadora es la Agencia de Desarrollo de Energía Renovable de Orissa (ADERO), la cual define los caminos a seguir para la promoción por parte del estado y organiza la distribución de los fondos proporcionados por el gobierno central. Una importante función de la ADERO es la aprobación de "operadores carceleros". Estos son organizaciones que construyen plantas comisionados por el gobierno y reciben los subsidios del estado transferidos a los constructores por parte del gobierno central por cada planta de biogás construida o reparada.

<sup>17</sup> <http://gate.gtz.de/biogas/reports/india.html>

<sup>18</sup> <http://www.ecouncil.ac.cr/rio/focus/report/english/inforse.htm>

Gram Vikas, una organización hindú, ha estado involucrada en la diseminación del biogás en Orissa desde 1981 y se ha convertido en la organización diseminadora más importante de Orissa; además es una de las organizaciones de biogás más grandes y exitosas de la India.

Los albañiles no se consideran empleados, pues la labor de construcción casi se paraliza durante los monzones. Las plantas de biogás se construyen principalmente entre los meses de Marzo y Junio (antes de los monzones) y por lo tanto, a los albañiles se les paga por día.

Dentro de los dos años de la garantía en cerca del 5% de las plantas se necesitan reparaciones. Dado que el gobierno no proporciona fondos para subsidiar reparaciones durante el periodo de la garantía, los costos afectan directamente a las cabezas de las organizaciones. El control de calidad por lo tanto es un aspecto particularmente importante de la administración de diseminación.

Las esposas de los granjeros desempeñan un papel primordial en la aceptación y la utilización eficiente de las plantas de biogás. Debido a esto, en varios distritos existen equipos móviles que consisten en tres mujeres cada uno y cuya principal tarea es motivar a las esposas de otros granjeros a utilizar las plantas de biogás con precisión e instruirlos en la operación de las plantas y la utilización del gas.

#### + Sangli

La tecnología del biogás es particularmente evidente en el Sur de Maharashtra debido al alto nivel de desarrollo agrícola. En ningún otro estado Hindú hay tantas plantas como aquí. En 1992 había alrededor de 345,000.

Los subsidios proporcionados por el gobierno central hindú se manejan a través de las Agencias de Desarrollo Rural del Distrito (ADR). Las ADR tienen el poder para decidir en su distrito. Un gran número de ONG's y constructores privados construyen y diseminan las plantas de biogás como "operadores carceleros".

El grupo objetivo original consistía en cooperativas de granjeros de la industria del azúcar. Para éstas se construyeron 350 plantas a mediados de los setentas durante una fase de demostración de tres años.

## ⊕ Europa

### ⊕ España: Viznar – Granada <sup>19</sup>

Desde hace unos días se comenzó a trasladar parte de la basura que genera la ciudad a Alhendín, se inició el sellado de parte del actual vertedero. De los tres conos que lo forman, uno de ellos se está sellando ya. A la vez que se realiza el sellado se están introduciendo tuberías de canalización para el gas que produce la basura, llamado biogás, por un lado, para evitar concentraciones de ese gas y posteriores explosiones y, por otro, canalizar el gas hasta una serie de depósitos desde los que, más tarde, se pueda recuperar y utilizar. El proyecto consiste en canalizar todo el biogás que genere el vertedero, que se estima que estará produciéndose durante al menos 10 años, y convertirlo en energía eléctrica. Esto ya se ha experimentado con éxito en otras capitales españolas como Murcia.

La extracción y explotación de este recurso generado por la basura del vertedero correría a cargo de la Compañía Sevillana de Electricidad por ser la mayor de las que operan en Granada. Esta operación servirá para que en la ciudad de Granada la luz que consumen los puntos de iluminación pública, que asciende a más de 100 millones de pesetas anuales, no cueste nada al municipio. El proyecto podrá ser una realidad en un plazo breve de tiempo, ya que se espera que para el mes de abril ya no se deposite basura en el vertedero y las obras de canalización del biogás puedan realizarse a la vez que se procede al sellado definitivo de este espacio donde existen millones de toneladas de basura.

<sup>19</sup> <http://www.geocities.com/RainForest/6368/biogas.html>

## ⊕ Suiza <sup>20</sup>

En este país se usa ampliamente la tecnología del biogás; muestra de ello es que hay 36 plantas TOTEM (para producción de energía eléctrica), de las cuales, la más antigua data de 1977 y las más recientes de 1999; la producción total anual de todas estas plantas es de 7962.28MWh. Además hay 32 plantas para uso térmico del gas, de las cuales la de mayor antigüedad se construyó en 1978, y la de menor, en 1990; su producción total anual es de 4512.7MWh.

## ⊕ Austria <sup>21</sup>

No hay un programa nacional de biogás en Austria, pero los estados federales, el Ministerio de Agricultura y el Ministerio del Ambiente apoyan las nuevas plantas, bajo circunstancias específicas. El apoyo financiero para los costos de instalación de las plantas de biogás lo proporcionan las organizaciones agrícolas federales y el "Osterreichsche Kommunalkredit Bank". Las principales compañías austriacas que ofrecen plantas de digestión anaeróbica para estiércol son 3: ENTEC Environment Technology GmbH, ESU Energiesparunternehmen GmbH y VSP Anlagenbau.

La estandarización de las plantas estimula la planeación y construcción de plantas de biogás. Se están realizando cursos de entrenamiento para operadores de plantas de biogás. Actualmente hay 67 plantas de biogás en Austria que se encuentran operando, principalmente para granjas. En este país no se realiza co-digestión de estiércol con otro tipo de desechos.

Se ha comprobado que las plantas centralizadas para una amplia variedad de sustratos adecuados son más económicas que las plantas para granjas, pero para ambos tipos se requiere de subsidios para los costos de inversión. Se tiene el objetivo de incrementar el número de plantas de biogás a 150 para el 2000.

Las actividades de investigación y desarrollo se concentran en las medidas anti-olores en las plantas de biogás, en mejorar la purificación y utilización del biogás y en hacer posibles y disponibles los sistemas de suministro a larga distancia del biogás purificado.

## ⊕ Dinamarca <sup>20</sup>

En Dinamarca se ha desarrollado el concepto de plantas centralizadas de biogás desde 1987. Actualmente hay 20 plantas operando, con capacidades desde 50 hasta 500ton de biomasa (aproximadamente el 80% es estiércol, principalmente como lodo, que se co-digiere con 20% de desechos orgánicos de mataderos, otras industrias alimentarias y municipios). Unas pocas plantas co-digieren lodos de aguas residuales o la fracción orgánica de los desechos domésticos. El biogás resultante se usa principalmente para generación combinada de electricidad y calor, y la biomasa digerida se redistribuye a un gran número de tierras de cultivo en granjas como fertilizante nutricionalmente definido. La experiencia operacional muestra una considerable mejora en la economía trabajadora de las plantas centralizadas de biogás. La producción de gas ha aumentado, primordialmente debido a la co-digestión de estiércol y desperdicios orgánicos adecuados.

El biogás, al ser una fuente renovable de energía, está exenta de los impuestos estatales Daneses, mientras que se pagan impuestos por la energía producida con combustibles fósiles.

La situación actual de la producción de biogás en Dinamarca es de 2.4PJ por año, y se pretende que para el año 2020 sea de 20PJ por año. El potencial actual de biogás en Dinamarca es de 32PJ, de los cuales el 80% está representado por estiércol animal. Los programas para 1997-2000 harán posible duplicar la producción de biogás e integrar el biogás producido a la red de gas natural existente.

En 1997 estaban en funcionamiento 64 plantas de tratamiento de aguas, 10 plantas de relleno (desperdicios enterrados), 5 plantas de tratamiento de desperdicios industriales, 20 plantas centralizadas de biogás, co-digestión y 20 plantas para granjas, haciendo un total de 119 plantas de biogás.

<sup>20</sup> <http://www.biogas.ch/Anlaet.htm>

<sup>21</sup> <http://www.ecop.ud.ac.be/aebiom/articulos/biogas/biogas.htm>

#### ⊕ *Finlandia* <sup>20</sup>

El total de estiércol es de 14 millones de toneladas al año. Las granjas son razonablemente pequeñas y se localizan relativamente lejos entre sí. No hay problemas de estiércol en exceso y los costos de transportación serían muy altos en el caso de una situación de plantas centralizadas de biogás. La producción de biogás es casi inexistente debido a la legislación actual, que permite modos más baratos de manejar el estiércol animal, el método más común es el compostaje. Una planta de biogás en Vaasa produce alrededor de 1.7Nm<sup>3</sup> de biogás por año (10,200MWh) procesando RSM (residuos sólidos municipales). También se encuentran operando algunas plantas experimentales para granjas que procesan estiércol animal.

No hay ningún programa nacional de biogás, pero la asociación "Biogás Centre" está promoviendo el uso del biogás. La Universidad de Joensuu está haciendo cierta investigación sobre digestión anaeróbica. Se están realizando estudios de factibilidad con respecto al establecimiento de nuevas plantas centralizadas de biogás, pero hasta ahora no se ha tomado ninguna decisión. Los desechos orgánicos se entierran, y ahora cuatro de los sitios están equipados para la recolección del biogás producido. Se espera que aumente la práctica de recolección del biogás de rellenos en el futuro cercano, mientras que el desarrollo de la co-digestión será más lento.

Las principales barreras para la implementación del biogás son: la legislación actual que permite métodos más baratos de tratamiento del estiércol, los relativamente bajos precios de la electricidad y los combustibles comparados con otros países europeos y los altos costos del biogás causados por la localización relativamente dispersa de las granjas. La opinión pública es favorable a la recolección del gas producido por los desperdicios enterrados, mientras que el tratamiento centralizado en grandes plantas se considera menos atractivo, debido a los problemas de tráfico y olor.

La legislación ambiental será más estricta en el futuro, por lo que se evitará enterrar los desperdicios. La producción de energía se permite como una posible solución al manejo de desechos.

#### ⊕ *Italia* <sup>20</sup>

Hay 5 plantas centralizadas de biogás, construidas o en construcción en Italia, y más de 150 plantas para granjas. Aproximadamente 50 de las plantas para granjas siguen operando. El número de plantas de biogás se ha incrementado en los últimos dos años. Se están desarrollando sistemas pre y post tratamiento. Ya no hay un programa de biogás en Italia, pero la Compañía Eléctrica de Italia está obligada a comprar la electricidad producida con biogás, a casi 80% arriba del precio de la electricidad para el consumidor final.

Los problemas legales relacionados con la reutilización de aguas tratadas se consideran como la barrera más importante para el desarrollo del biogás. Se requiere reforzar un programa de reciclaje post-tratamiento del estiércol digerido.

#### ⊕ *Portugal* <sup>20</sup>

En Portugal hay regiones con alta concentración de granjas de cerdos. En estas regiones se encuentran operando 4 plantas centralizadas de biogás. En la parte central y del sur del país operan alrededor de 60 plantas para granjas.

Las plantas centralizadas de biogás operan con resultados no muy satisfactorios, debido a la inadecuada elección del método de tratamiento. Las tecnologías más usadas son la digestión anaeróbica con producción de biogás, todos activados y líneas de tratamiento por compostaje. En Portugal no ocurre la co-digestión de estiércol y otros sustratos.

El programa nacional "Energía" apoya las actividades de producción de biogás como parte de la producción de energía renovable. Otros programas de apoyo son promovidos por entidades públicas o privadas. Los beneficios ambientales así como la posibilidad de amortización de la inversión inicial en periodos reducidos de tiempo (3 a 7 años), con la comercialización y/o uso de la energía producida, se marcan como la fuerza de empuje para integrar al biogás al sector energético. La falta de incentivos

monetarios afecta las posibilidades de mejorar el conocimiento técnico, lo que da como resultado baja calidad en las construcciones y los equipos, bajo nivel de mantenimiento de las plantas existentes y un control y exploración deficientes de los sistemas.

En Portugal hay optimismo sobre el futuro del biogás, aún cuando hay muy poca conciencia pública al respecto. El público está consciente de los problemas que involucra la contaminación del efluente de agua y todos quieren que se encuentren soluciones, lo cual coloca al biogás en una posición favorable.

#### ✦ Países Bajos (Holanda)<sup>20</sup>

Actualmente, todas las plantas centralizadas de biogás para digestión de estiércol están cerradas por razones económicas, como consecuencia de lo costoso del procesamiento y la transportación de la biomasa y el bajo valor del producto. Entre ellas se encuentra PROMEST B. V., la planta nacional para la demostración para digestión de estiércol de cerdo, con una capacidad diseñada de 100,000ton. Esta planta empezó a operar en 1990, con un proceso de dos pasos, digestión anaeróbica en un digestor de 4000m<sup>3</sup>, seguida del procesamiento del estiércol digerido para convertirlo en gránulos secos. Alrededor de 1980 se instalaron más de 30 plantas para granjas; los altos costos de operación y el bajo valor como fertilizante del estiércol digerido condujeron a la situación actual, en que la mayoría de las plantas han dejado de operar. Desde entonces no se han construido plantas nuevas.

Hoy, la digestión anaeróbica se usa principalmente para el tratamiento de lodos y limpieza de aguas residuales. Se planea instalar 2 grandes plantas de digestión anaeróbica en Moerdijk y Grononge, como sitios nacionales de demostración para la digestión de la fracción orgánica separada mecánicamente de los RSM (residuos sólidos municipales). Una tecnología implementada es la promovida por BIOCEL, que consiste en un proceso de tres pasos para el tratamiento de desechos sólidos: preprocesamiento, digestión (15 días a 35°C) y valuación del producto; esta tecnología se implementó en el primer digestor para VJF (vegetales / jardín / frutas). Se implementaron programas nacionales de medición de la digestión anaeróbica de VJF en dos locaciones, con la intención de examinar las ventajas de la digestión anaeróbica con respecto al compostaje, práctica actual en Holanda. Se espera que las conclusiones se tengan para Enero de 1998.

#### ✦ Venecia<sup>22</sup>

Científicos alemanes e italianos están convirtiendo el exceso de algas marinas de la laguna de Venecia en biogás, un combustible versátil y de combustión limpia. Los investigadores en Calabria están cultivando fitoplancton en estanques poco profundos de agua de mar. En ambos casos, con la ayuda del sol, se crea biomasa y se fermenta a biogás. El potencial para generar combustible a partir del cultivo de algas es tremendo. En todo el mundo hay más de 18,750 millas de áreas desérticas adecuadas para tales plantaciones de energía.

#### ✦ Reino Unido<sup>23</sup>

Actualmente el metano de desecho producido por la descomposición de materia orgánica en los sitios donde se entierra la basura, se usa para generar la energía eléctrica suficiente para 350,000 viviendas. El gas de los rellenos es una de las tecnologías apoyadas por los nuevos y grandes esfuerzos del gobierno para desarrollar fuentes de energía renovable.

Con 600MW de capacidad contratada, el RU es el mercado más grande para esta tecnología en el mundo. Sus miembros son los líderes mundiales en la tecnología del gas de rellenos.

<sup>22</sup> <http://www.bullfrogfilms.com/catalog/bfs.html>

<sup>23</sup> <http://www.biogas.org.uk/>

## ***El Biogás en México <sup>24</sup>***

La forma de aprovechar la biomasa como energético puede ser por medio de la combustión directa, como tradicionalmente se han aprovechado en México la leña y el bagazo de caña, o bien mediante la conversión de la biomasa en diferentes hidrocarburos a través de diferentes procesos.

Buscando aplicaciones para la fermentación anaeróbica, el Instituto de Investigaciones Eléctricas empezó trabajando con residuos animales; por un lado, el proceso produce fertilizantes o un abono orgánico, que más que un fertilizante es un acondicionador de suelos y en muchos casos se han hecho experimentos para emplearlo como un complemento alimenticio y por el otro tenemos un combustible, el conocido como biogás. Hay una gran variedad de residuos que pueden aprovecharse: agrícolas, animales, algas que se generan en grandes cantidades en las costas, el lirio acuático que es una plaga en las presas de México y la basura que se genera todos los días.

En México se generan alrededor de 170m<sup>3</sup> por segundo de agua residual y según las cifras de SEDESOL, existe la infraestructura para tratar del 20 al 30% aproximadamente, o sea que en ese campo existe una gran oportunidad de combinar procesos aeróbicos y anaeróbicos para abatir el consumo de energía y la generación de lodos y lógicamente para tratar esa agua; más aún en las aguas industriales.

Por el lado de la basura urbana, se conocen los rellenos sanitarios, en 1990 el IIE realizó un estudio en los que hay aquí en el DF. Había 6 clausurados y 3 en operación y muchos de ellos ya tenían 40 años, entre ellos del de Santa Fe y el de Santa Cruz Meyehualco, donde ya no es factible la recuperación del gas generado. Sin embargo, en los que estaban en operación se estaban produciendo grandes cantidades de gas. Un ejemplo es el de Prados de la Montaña, que se encuentra en condiciones operativas.

En el año de 1996 la CONAE inició un estudio para determinar la viabilidad del aprovechamiento energético del biocombustible generado en rellenos sanitarios; la idea era aprovecharlo en un sistema de generación de energía eléctrica para alumbrado público y sistemas de bombeo para aguas negras y agua potable para la Ciudad de México, bajo la modalidad de autoabastecimiento.

En particular la Subdirección de Fuentes no Convencionales de Energía de esta comisión, recopiló la información requerida para desarrollar el estudio en un relleno sanitario dentro de los límites del Distrito Federal.

En México se comienza a tener una mayor conciencia del potencial que ofrece el aprovechamiento de residuos, principalmente urbanos, dados los volúmenes que se manejan en las grandes ciudades del país. Estos residuos y desechos de animales, desde hace tiempo se han venido utilizando en instalaciones a nivel prototipo en el Instituto de Investigaciones Eléctricas y en el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

La cuantificación del recurso de la biomasa es una tarea complicada y no existen en México datos precisos, salvo las estadísticas que presenta anualmente el balance nacional de energía, en el que se consignan las cantidades consumidas de leña y bagazo de caña. Se estima que el consumo anual de los particulares es de 87,820 Tera Joules (TJ) de bagazo de caña y 247,400TJ de leña, lo cual da un total de 335,220TJ.

---

<sup>24</sup> <http://www.conae.gob.mx/renovables/biomasa.html>

## **Capítulo 3**

# **PRODUCCIÓN**

## ¿Cómo se forma el biogás?

### Definición de Biogasificación

Dependiendo del autor, "Biogasificación" se puede designar alternativamente como "fermentación de metano", "producción de metano" o "digestión anaeróbica". El término fermentación de metano se puede entender como la destrucción del gas mediante fermentación microbiana; en la digestión anaeróbica, no siempre hay formación de metano; sin embargo, los términos se usan indistintamente.

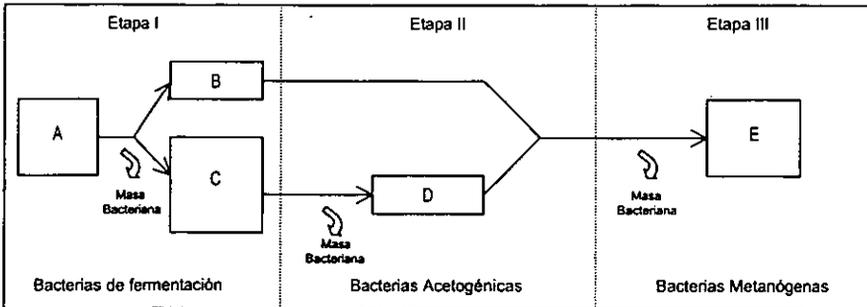
Para los propósitos de este escrito, "Biogasificación" se define como la descomposición biológica de materia orgánica de origen biológico en condiciones anaeróbicas, con la colateral formación de, principalmente, metano ( $\text{CH}_4$ ) y bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Hay dos características que distinguen al proceso de otras descomposiciones biológicas, que son: "en condiciones anaeróbicas" y "producción de metano".

### Microbiología

#### Los tres pasos de la producción de biogás

Los microbios del biogás consisten en un gran grupo de especies complejas de microbios y que actúan de diferentes formas.

El proceso completo de formación de biogás se puede dividir en tres pasos: hidrólisis, acidificación y formación de metano. Están involucrados tres tipos de bacterias:



- A) Desperdicios orgánicos, carbohidratos, grasas, proteínas.
- B)  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , ácido acético.
- C) Ácido propiónico, ácido butírico, varios alcoholes y otros compuestos.
- D)  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , ácido acético.
- E) Metano,  $\text{CO}_2$ .

### ⊕ Hidrólisis

En el primer paso (hidrólisis), la materia orgánica es externamente enzimolizada por enzimas extracelulares (celulasa, amilasa, proteasa y lipasa) de los microorganismos. Las bacterias descomponen las largas cadenas de los complejos carbohidratos, proteínas y lípidos, en partes más cortas.

## ⊕ Acidificación

Las bacterias productoras de ácidos, involucradas en el segundo paso, convierten los intermediarios de las bacterias de fermentación en ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) y bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Estas bacterias son facultativamente anaeróbicas y pueden crecer en condiciones ácidas. Para producir ácido acético, necesitan oxígeno y carbón; para esto utilizan el oxígeno disuelto en la solución u oxígeno enlazado. Debido a esto, las bacterias productoras de ácido crean una condición anaeróbica que es esencial para los microorganismos productores de metano. Además reducen los compuestos de bajo peso molecular a alcoholes, ácidos orgánicos, aminoácidos, bióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, y trazas de metano.

## ⊕ Formación de metano

Las bacterias productoras de metano, que participan en el tercer paso, descomponen compuestos con bajo peso molecular. Por ejemplo, utilizan hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético para formar metano y bióxido de carbono.

En condiciones naturales, las bacterias que producen metano ocurren en la medida en que se proporcionen condiciones anaeróbicas, por ejemplo, bajo el agua (como en sedimentos marinos), en estómagos de rumiantes y en pantanos. Son obligatoriamente anaeróbicas y muy sensibles a cambios ambientales. Las bacterias metanógenas pertenecen al género *archaeobacter*, un grupo de bacterias con una morfología muy heterogénea.

La diferencia principal con las bacterias acidogénicas y acetogénicas, yace en la estructura de las paredes celulares de las bacterias.

### **Simbiosis de las bacterias**

Las bacterias productoras de metano y de ácido actúan de manera simbiótica. Por un lado, las bacterias productoras de ácido crean una atmósfera con los parámetros ideales para las bacterias productoras de metano (condiciones anaeróbicas, compuestos con bajo peso molecular). Por otro lado, los microorganismos productores de metano consumen los intermediarios de las bacterias productoras de ácido, pues de otra forma se desarrollarían condiciones tóxicas para las productoras de ácido.

Ninguna bacteria es capaz de producir productos de fermentación por sí sola.

### **Biología de la metanogénesis**

Como ya se mencionó, la fermentación anaeróbica involucra las actividades de tres diferentes comunidades bacterianas.

El proceso de producción de biogás depende de varios parámetros. Por ejemplo, el que la temperatura ambiente cambie puede tener un efecto negativo sobre la actividad bacteriana.

En principio, todos los materiales orgánicos pueden fermentar o ser digeridos. Sin embargo, para plantas simples de biogás, sólo se pueden considerar sustratos homogéneos y líquidos: heces y orina de ganado, cerdos y, posiblemente de aves, y el agua residual de los baños.

Al llenar la planta, el excremento debe diluirse en aproximadamente la misma cantidad de líquido, de ser posible, deberá usarse la orina. Los desechos y agua residual de las industrias procesadoras de alimentos sólo son útiles para plantas simples si son homogéneos y líquidos.

La sensibilidad de las metanógenas a los factores ambientales clave es mucho más aguda que la de las bacterias formadoras de ácido. La diferencia es especialmente pronunciada con respecto al nivel de pH. Otra diferencia importante es la sensibilidad de las metanógenas al oxígeno atmosférico ( $\text{O}_2$ ): las metanógenas son obligadamente anaerobias y su crecimiento es inhibido por pequeñas trazas de  $\text{O}_2$ .

### **Factores limitantes de la velocidad**

El primer factor potencialmente limitante de la velocidad es la conversión de celulosas insolubles en carbohidratos solubles por medio de extracelulasas, así como la solubilización de compuestos orgánicos nitrogenados complejos.

El segundo es la actividad de las bacterias formadoras de ácido convirtiendo los carbohidratos solubles en ácidos grasos de bajo peso molecular.

El tercer factor es la conversión de los ácidos, a través de las metanógenas en  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ . El tercer factor, la conversión en metano, generalmente se conoce como la etapa limitante de la velocidad para el proceso completo, ya que es el paso final, además de que las metanógenas son básicamente de lento crecimiento.

### **Operación: Parámetros y Optimización del proceso**

La actividad metabólica involucrada en la metanación microbiológica depende de los siguientes factores:

- ⊕ Temperatura del sustrato
- ⊕ Nutrientes disponibles
- ⊕ Tiempo de retención (tiempo de flujo interior)
- ⊕ Nivel de pH
- ⊕ Inhibición de nitrógeno y relación C/N
- ⊕ Contenido de sólidos y agitación del sustrato
- ⊕ Factores de inhibición

Cada uno de los diversos tipos de bacterias responsables por las tres etapas de la metanogénesis se ve afectado de diferente forma por los parámetros anteriores.

Dado que existen efectos interactivos entre los varios factores determinantes, no hay datos cuantitativos precisos sobre la producción de gas como función de los factores anteriores. Así, la discusión sobre los varios factores se limita a sus efectos cualitativos sobre el proceso de fermentación.

#### **⊕ Temperatura del sustrato:**

##### **Rango de temperatura en la fermentación anaeróbica**

La fermentación anaeróbica, en principio, es posible entre  $3^\circ\text{C}$  y aproximadamente  $70^\circ\text{C}$ . Se hace una diferenciación entre tres rangos de temperatura:

- ⊕ El rango psicofílico de temperatura está por debajo de  $20^\circ\text{C}$ ,
- ⊕ El rango mesofílico de temperatura está entre  $20^\circ\text{C}$ , y  $40^\circ\text{C}$ , y
- ⊕ El rango termofílico de temperatura está por encima de  $40^\circ\text{C}$ .

##### **Temperatura mínima promedio**

La velocidad de producción bacteriológica de metano aumenta con la temperatura. Dado que, de cualquier forma, la cantidad de amoníaco libre también aumenta con la temperatura, como resultado, el desempeño biodigestivo pudiera ser reducido o hasta inhibido. En general, las plantas de biogás sin calentamiento se desempeñan satisfactoriamente sólo cuando la media de temperatura anual está alrededor de  $20^\circ\text{C}$  ó más, o cuando la media de temperatura diaria es de por lo menos  $18^\circ\text{C}$ . Dentro del rango de  $20\text{-}28^\circ\text{C}$  de temperatura media, la producción de gas se incrementa sobre-proporcionalmente. Si la temperatura de la biomasa está por debajo de  $15^\circ\text{C}$ , la producción de gas será tan baja que la planta de biogás dejará de ser económicamente factible.

### **Cambios en la temperatura**

El proceso de bio-metanación es muy sensible a cambios en la temperatura. Sin embargo, el grado de sensibilidad depende del rango de temperatura. Pequeñas fluctuaciones que no excedan los siguientes límites se pueden considerar como aún no inhibitoras con respecto al proceso de fermentación:

- ⊕ Rango psicrófilico:  $\pm 2^{\circ}\text{C/h}$ ,
- ⊕ Rango mesófilico:  $\pm 1^{\circ}\text{C/h}$
- ⊕ Rango termófilico:  $\pm 0.5^{\circ}\text{C/h}$ .

Las fluctuaciones de temperatura entre el día y la noche no son un gran problema para las plantas construidas bajo tierra (enterradas), pues la temperatura de la tierra por debajo de una profundidad de un metro, es prácticamente constante.

### ⊕ **Nutriente disponible:**

Con el fin de crecer, las bacterias necesitan más que sólo un suministro de sustancias orgánicas como fuente de carbón y energía. Además requieren de ciertos nutrientes minerales. Además de carbono, oxígeno e hidrógeno, la generación de biomasa requiere de un suministro adecuado de nitrógeno, azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio y un número de elementos trazas como hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel, etc. Los sustratos "normales" como residuos agrícolas o aguas residuales municipales, usualmente contienen las cantidades adecuadas de los elementos mencionados. Una concentración mayor de cualquier sustancia individual normalmente tiene un efecto de inhibición.

Dado que la digestión es un proceso de descomposición, una parte de la materia orgánica será destruida. En tanto que la velocidad y la cantidad de destrucción son funciones de la degradabilidad del sustrato, esto se debe tener en mente al interpretar una variación del valor del estado estacionario.

### ⊕ **Tiempo de retención:**

Son sinónimos: "periodo de detención", "tiempo de detención" y "tiempo de residencia".

#### **Plantas por lotes y continuas**

El tiempo de retención sólo se puede determinar con exactitud en las instalaciones de tipo batch (por lotes). Para los sistemas continuos, la media del tiempo de retención se aproxima dividiendo el volumen del digestor entre la velocidad de influjo diario.

En general, el término "tiempo de detención" sólo se usa para hacer referencia a cultivos continuos. Con un cultivo continuo típico, la población microbiana (sólidos suspendidos) puede colocarse en un periodo de detención y la fase líquida en otro; o pueden colocarse ambos en un tiempo de detención común. Los periodos de detención líquido y común se conocen como periodo hidráulico de detención. El periodo hidráulico de detención se puede expresar de la siguiente forma:

$$t = V/Q$$

Donde  $t$  es el tiempo de detención,  $V$  es el volumen del cultivo y  $Q$  es el influjo por unidad de tiempo. Dependiendo de la geometría del envase, los medios de mezclado, etc., el tiempo efectivo de retención puede variar mucho para los constituyentes del sustrato individual. Por lo tanto, la selección de un tiempo de retención adecuado depende no sólo de la temperatura del proceso, sino también del tipo de sustrato usado. Aplicar el tiempo de retención adecuado es importante por varias razones, entre las que se encuentran las siguientes: (1) si el tiempo de retención es demasiado largo, la capacidad del digestor no se usa eficientemente y el digestor es demasiado grande; (2) un periodo de detención excesivamente prolongado

puede permitir que la población bacteriana se pase de la fase de multiplicación exponencial (en otras palabras, la edad promedio de la población bacteriana es tal que los organismos han pasado su periodo de capacidad más alta); y (3) si el periodo hidráulico de detención es demasiado corto, la velocidad de multiplicación bacteriana puede no ser suficiente para compensar a las bacterias descargadas en el efluente. Eventualmente, el cultivo se "deslava". Aún cuando el cultivo fuese capaz de mantenerse a sí mismo, la población sería menor que la adecuada para lograr la conversión requerida de energía. En efecto, no se recuperaría la cantidad total de energía potencialmente disponible.

### **Eficiencia de costo**

Optimizar los parámetros del proceso (*tiempo de retención – temperatura del proceso – calidad del sustrato – carga volumétrica*) determina, entre otros, la eficiencia de costo de los procesos biológicos. Pero como cada m<sup>3</sup> de volumen de digestor tiene su precio, el equipo de calentamiento puede ser costoso y los sustratos de alta calidad pueden tener usos alternos, el óptimo costo-beneficio en la producción de biogás casi siempre está por debajo del óptimo biológico.

### **Sustrato**

Para el estiércol líquido que experimenta fermentación en el rango mesofílico de temperatura, aplican los siguientes valores aproximados:

- ⊕ Estiércol líquido de vaca: 20-30 días
- ⊕ Estiércol líquido de cerdo: 15-52 días
- ⊕ Estiércol líquido de pollo: 20-40 días
- ⊕ Estiércol animal mezclado con materia vegetal: 50-80 días

Si el tiempo de retención es demasiado corto, las bacterias que se encuentran en el digestor se "deslavan" más rápido de como se pueden reproducir, por lo que la fermentación prácticamente se va a un punto muerto.

### **⊕ Valor de pH:**

La concentración de iones hidrógeno se puede considerar como un parámetro operacional, ya que (1) las metanógenas se inhiben a niveles de pH más allá del relativamente estrecho rango de 6.5 a 7.5; y (2) el nivel de pH es una manifestación de la formación de ácidos orgánicos. Sin embargo, la utilidad del nivel de pH como parámetro disminuye por el hecho de que el pH no sólo es función de la concentración de ácidos orgánicos, sino que también depende de la capacidad amortiguadora (buffer) del cultivo.

Las bacterias productoras de metano viven mejor en condiciones de neutras a ligeramente alcalinas. El pH normalmente tendrá un valor entre 7 y 8.5. Debido al efecto buffer del bióxido de carbono – bicarbonato (CO<sub>2</sub> – HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y del amoníaco – amonio (NH<sub>3</sub> – NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), el nivel de pH rara vez se toma como una medida de los ácidos del sustrato y/o de la producción potencial de biogás.

Si el valor de pH cae por debajo de 6.2, el medio tendrá un efecto tóxico sobre las bacterias metanógenas.

### **⊕ Inhibición de nitrógeno y relación C/N:**

#### **Inhibición de nitrógeno**

Todos los sustratos contienen nitrógeno. Para valores más altos de pH, hasta una concentración relativamente baja de nitrógeno puede inhibir el proceso de fermentación. Ocurre una inhibición notable a una concentración de apenas 1700mg de amonio – nitrógeno (NH<sub>4</sub> – N) por litro de sustrato. Sin embargo, dado

el suficiente tiempo, las metanógenas son capaces de adaptarse a concentraciones de  $\text{NH}_4 - \text{N}$  en el rango de 5000-7000mg/l de sustrato, siendo el principal prerrequisito, que el nivel de amoníaco no exceda 200-300mg de  $\text{NH}_3 - \text{N}$  por litro de sustrato. La velocidad de disociación de amoníaco en agua depende de la temperatura del proceso y el valor de pH de la mezcla sustrato.

### **Relación C/N**

Los microorganismos necesitan de la asimilación en sus estructuras celulares de, tanto nitrógeno como carbono. Diversos experimentos han demostrado que la actividad metabólica de las bacterias metanógenas se puede optimizar a una relación C/N de aproximadamente 8:20, pero el punto óptimo varía de un caso a otro, dependiendo de la naturaleza del sustrato.

### **⊕ Contenido de sólidos del sustrato, agitación y cargado:**

#### **Contenido de sólidos del sustrato**

La movilidad de las metanógenas dentro del sustrato se ve gradualmente mermada por un contenido creciente de sólidos, y como resultado la producción de biogás puede sufrir disminución.

#### **Agitación**

Muchos sustratos y varios modos de fermentación requieren de alguna forma de agitación o mezclado del sustrato con el fin de mantener la estabilidad del proceso dentro del digestor. La agitación o mezclado hace la diferencia entre una digestión de alta velocidad y una digestión lenta o convencional. Los objetivos más importantes de la agitación son:

- ⊕ Remoción de los metabolitos producidos por mas metanógenas (gas)
- ⊕ Mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana (inoculación)
- ⊕ Prevención de formación de espuma y sedimentación
- ⊕ Evitación de gradientes pronunciados de temperatura dentro del digestor
- ⊕ Prevención de la formación de espacios muertos que reducirían el volumen efectivo del digestor.

Para seleccionar o diseñar un medio adecuado de agitación, deben considerarse los siguientes puntos:

- ⊕ El proceso involucra una relación simbiótica entre varias cadenas de bacterias, por ejemplo, el metabolito de una especie puede servir como nutriente de la siguiente especie, y así sucesivamente. Cuando la comunidad bacteriana sea perturbada, el proceso de fermentación se mantendrá más o menos improductivo hasta que se forme una nueva comunidad equivalente. Consecuentemente, un mezclado excesivo o demasiado frecuente, usualmente es dañino para el proceso. Un mezclado lento es mejor que una agitación rápida.
- ⊕ Una delgada capa de espuma en la superficie no necesariamente tendrá un efecto adverso sobre el proceso. Para sistemas en los que el digestor está completamente lleno de sustrato, de tal manera que cualquier espuma siempre estará suficientemente mojada, hay poco o ningún riesgo de que la extracción del gas pudiera ser impedida por la espuma.
- ⊕ Algunos tipos de sistemas de biogás pueden funcionar bien sin ninguna agitación mecánica.

Dado que los resultados de la agitación y el mezclado son altamente dependientes del sustrato que se use, sólo puede diseñarse cada sistema sobre las bases de datos empíricos.

## **Alimentación**

La frecuencia y cantidad de alimentación son factores determinantes de la cantidad de energía que se recupera de los desechos, y de la eficiencia de utilización de la capacidad del digestor. La consecuencia de la sobrecarga es un descenso en la cantidad de energía recuperada, un eventual cese completo de la actividad microbiana y la destrucción de la población microbiana. Cuando un digestor se encuentra en ese estado, se dice que está "atorado". Por otro lado, si la carga es menor que la que permite la capacidad del digestor, la capacidad del digestor se está usando ineficientemente. El importe económico es el costo agregado asociado a una unidad innecesariamente grande. Se puede decir que el cargar de menos tiene la ventaja de incrementar el porcentaje de energía recuperada.

De igual forma que para prácticamente todos los parámetros y procedimientos operacionales, la alimentación es una función de la naturaleza del sustrato y del grado al que las condiciones de operación se aproximan al óptimo.

### **Factores de inhibición:**

La presencia de metales pesados, antibióticos y detergentes usados en la cría de ganado, puede tener un efecto de inhibición sobre el proceso de bio-metanación. Estas sustancias no deben de rebasar ciertas concentraciones límite.

Los principales parámetros para juzgar el desempeño de un digestor son la producción de gas y su composición, velocidad y grado de destrucción de los sólidos orgánicos, alcalinidad, contenido de ácidos orgánicos y nivel de pH.

## **Producción de gas y Composición**

La producción de gas funciona como indicador, tanto de la condición del cultivo, como de la eficiencia del desempeño de un digestor. La producción de gas normalmente se expresa en términos del volumen de gas producido por unidad de masa de sólidos totales y/o sólidos orgánicos introducidos.

El volumen esperado de gas por unidad de materia orgánica es función del tiempo de retención y otras características operacionales, así como de la naturaleza de los desechos.

La velocidad de producción de gas que se usa como parámetro de la digestión de un desperdicio dado es aquella que es característica del cultivo una vez que ha alcanzado el "régimen permanente." La producción de gas es un parámetro particularmente útil, pues es fácil de reconocer, además de que da una respuesta inmediata a una condición adversa. Las desviaciones menores son el resultado de la imposibilidad práctica de mantener todas las condiciones operacionales y ambientales a un nivel constante. Sin embargo, una disminución continua de 4 ó 5 días de duración, puede considerarse como indicativo de problemas.

La producción de gas, cuando se usa como parámetro, no se debe interpretar como completamente independiente de la composición del gas. El gas de interés en la composición es el metano. Generalmente, cuanto mayor sea la concentración de carbohidratos en los desperdicios, más se acercará a 1:1 la relación metano: bióxido de carbono.

En las primeras etapas del desarrollo del cultivo de un digestor, el gas que se puede producir será mayormente bióxido de carbono. Sin embargo, el contenido de metano aumenta gradualmente hasta que se alcanza un nivel relativamente constante. Así, un descenso consistente en el contenido de metano indica una dificultad.

## **Cómo reparar un Digestor disfuncional**

Si los valores de los diversos parámetros indican la presencia de condiciones desfavorables y el subsiguiente deterioro del desempeño del digestor, se deben tomar ciertas medidas para remediar la situación. Por supuesto, antes de que se pueda tomar cualquier medida, deben identificarse las causas del cambio en el

desempeño. De otro modo, sólo se daría tratamiento a los síntomas y se pasarían por alto las causas subyacentes.

El problema de restaurar un digestor completamente desactivado ("atorado") a su funcionamiento normal, actualmente no tiene respuesta. Si hacerlo es factible, el mejor recurso es deshacerse del cultivo del digestor y luego desarrollar uno nuevo. Tal acción se logra muy fácilmente si la escala del digestor es pequeña. Sin embargo, la situación se complica tanto cuando se trata de un digestor grande (escala municipal), que se vuelve prácticamente imposible.

### **Mejora del biogás**

El biogás destinado para usuarios diferentes de los que simplemente lo emplean para calentar espacios y para cocinar en el ámbito casero, debe ser mejorado (purificado). La mejora se hace necesaria cuando la calidad del biogás crudo es relativamente baja. Es más, su composición cotidiana es muy diferente de la del gas natural. Una diferencia indeseable es el bajo y variable contenido calórico del biogás. La variación puede ir de 1780 a 5340kcal/m<sup>3</sup>. El valor mínimo para el gas natural es de 8900kcal/m<sup>3</sup>. Otra característica indeseable es el contenido de humedad del biogás. Puede ser tan baja como 5% o tan alta como el nivel de saturación. Si el biogás se produce en rellenos sanitarios, su contenido de O<sub>2</sub> puede ser lo suficientemente alto para convertir al gas en explosivo. La variación de los anteriores parámetros de un día a otro y de una estación a otra, puede ser de hasta 50%. Otras características indeseables son los contenidos mensurables de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>. Estas características disminuyen el valor calórico del biogás.

El biogás se puede mejorar a través de uno o más de muchos procedimientos, los cuales son relativamente caros y requieren equipo especial. Los procedimientos pueden ser tan simples como la deshidratación o tan extensos como la remoción de H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>. La deshidratación puede elevar el valor calórico alrededor de 10% del valor original. El valor calórico se lleva hasta 5340 a 6230kcal/m<sup>3</sup> mediante deshidratación acompañada de la remoción de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>.

Los métodos de deshidratación incluyen el uso de flujo gravitacional en línea, filtrado, solventes especiales (polietilén glicol), tamices moleculares, calentamiento, enfriamiento de aire y enfriamiento de refrigerante. De los muchos métodos, el uso de tamices moleculares tiene las dos ventajas, es relativamente barato y tiene un alto grado de eficiencia. Debido a las cargas polares altamente localizadas, que caracterizan a los tamices moleculares, los compuestos polares o polarizables son fuertemente adsorbidos por los tamices moleculares. De hecho, su capacidad de adsorción es mucho mayor que la de otros adsorbentes.

Debido a la inusual higroscopicidad de los glicoles, su excelente estabilidad térmica y química, bajas presiones de vapor y disponibilidad a un costo moderado, el sistema de trietilén glicol (TEG) es ampliamente usado para deshidratación de gases. Conforme el gas ingresa al sistema, es comprimido y los contaminantes del bulto son removidos en un tambor de eliminación. Luego de la compresión y el enfriamiento para eliminar el bulto del agua, el gas se introduce en una torre de TEG de adsorción / separación. Los líquidos libres en la corriente de gas se retiran en la parte más baja de la torre (sección de separación) conforme la corriente asciende a la parte superior o sección de adsorción de la torre. En la sección de adsorción, la corriente de gas tiene contacto con el TEG en las delgadas burbujas que se forman en las charolas (platos).

Al acoplar el sistema de deshidratación por TEG con un sistema de arrastre de carbonato de potasio caliente, se pueden lograr simultáneamente la deshidratación y la remoción de bióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno.

Si sólo se necesita retirar el sulfuro de hidrógeno, se puede lograr fácilmente haciendo pasar el gas a través de un purificador seco de gas que contenga una "esponja de hierro" hecha de óxido férrico mezclado con aserrín; 1bu (33980cm<sup>3</sup>) de esponja de hierro es suficiente para retirar alrededor de 8lb (3.6kg) de azufre. La "esponja" se regenera mediante exposición al aire. De esta forma, el sulfuro férrico formado durante la operación se convierte en óxido férrico y azufre elemental.

El gas mejorado se puede usar para generar electricidad, o se puede inyectar a una línea de transmisión de servicio público. Con la generación eléctrica *in-situ*, el gas puede ser alimentado a un motor de combustión interna o quemado para manejar una turbina de gas.

El gas debe comprimirse a alrededor de 5psig (0.34atm) para poderlo usar en un motor de combustión interna (motor diesel). Si se usa una turbina de gas, la presión debe aumentarse a 150psig (10.2atm).

Debido a los costos y la complejidad del equipo y la operación involucrados, no se recomienda mejorar el biogás a la calidad de tubería en los países en vías de desarrollo. La excepción sería si los desechos de un área metropolitana altamente desarrollada se depositaran en un relleno sanitario. El procedimiento práctico en casi todos los casos sería quemar el gas directamente en el sitio de generación y emplear la energía calorífica en algún uso inmediato.

### **Residuos**

**Sobrenadante:** El sobrenadante es una suspensión muy concentrada de partículas sólidas de dimensiones coloidales, de células bacterianas y de sólidos disueltos. El material inerte del sobrenadante, biológicamente es altamente inestable. Consecuentemente, el sobrenadante no se puede desechar en el ambiente circundante sin tratamiento, sin producir un impacto seriamente desfavorable.

Durante la operación, una porción sustancial del sobrenadante se recircula al digestor. En una operación de dos etapas, el sobrenadante se regresa al primer digestor en serie. La recirculación al digestor es muy útil debido a la magnitud de las poblaciones microbianas suspendidas en el sobrenadante, y a la apreciable concentración de nutrientes no utilizados. El sobrenadante que no se recircula puede esparcirse en el terreno junto con los lodos.

**Lodos:** El contenido de sólidos en los lodos inmediatamente después de ser descargado de un digestor del tipo de estiércol disuelto es algo bajo – generalmente dentro de un rango de alrededor de 5 a 10%. Puede aplicarse directamente al suelo o puede deshidratarse antes. De acuerdo con las naciones en vías de desarrollo, el método más adecuado de deshidratación es a través de drenado y evaporación sobre una cama de arena. Un lodo apropiadamente digerido esparcido sobre una cama de arena bien drenada, se deshidrata hasta un contenido de sólidos de 15 a 20% en una o dos semanas de días soleados y secos. Durante la estación de lluvias las camas deben cubrirse de la lluvia.

La naturaleza del lodo se ve muy influida por la de los desechos alimentados al digestor. En general, el lodo se asemeja externamente al producto que se formaría si los desechos se hubiesen compostado aeróbicamente. El lodo muestra una fuerte semejanza al producto del compostaje aeróbico. A excepción de su ligeramente mayor contenido de nitrógeno, los lodos también se asemejan al producto del compostaje con respecto a las características químicas. Sin embargo, se aconseja someter los lodos a un proceso de compostaje antes de aplicarlo al terreno, especialmente si se incluyó excremento humano en los desechos crudos. El resultado de estas semejanzas es que el lodo se puede usar en la agricultura de la misma forma que se usaría el producto de un proceso de compostaje. Sin embargo, se aplican ciertas restricciones de salud pública al uso de los lodos.

### **Diferentes Tecnologías**

Existen tres métodos principales para obtener biogás a partir de desechos, a saber: Recuperación del biogás producido en rellenos sanitarios, sistemas anaeróbicos de tratamiento de aguas residuales y plantas de biogás (digestores anaeróbicos de materia orgánica). Sin embargo, a últimas fechas hay, por lo menos, una empresa que además está extrayendo el biogás que se produce en el drenaje, con un sistema de extracción desarrollado por ellos mismos<sup>25</sup>. A continuación se presenta una descripción de cada uno de ellos.

#### **⊕ Recuperación del biogás de Rellenos Sanitarios:**

Desde hace ya mucho tiempo, se ha sabido que se forman paquetes de biogás en los desechos enterrados a los pocos meses de que el relleno se ha establecido.

<sup>25</sup> <http://www.bsdcv.com/english/ingenier.html>

De hecho, la generación de biogás, particularmente la fracción de metano, se ha identificado desde hace mucho tiempo como uno de los problemas asociados de los rellenos, especialmente de los rellenos sanitarios. Otro de los problemas es que el biogás generado produce malos olores debido, principalmente, al sulfuro de hidrógeno y a los mercaptanos contenidos en él, además puede ocasionar explosiones e incendios debido a su alta inflamabilidad, por lo que es conveniente canalizar las emisiones de dicho gas y proceder a su combustión o utilización, para disminuir los riesgos de contaminación, explosión e incendio. Un relleno sanitario es un sistema de conversión o estabilización de la basura en el que existe la generación de biogás y lixiviados durante el proceso de conversión; este biogás y los lixiviados deben capturarse y controlarse para evitar la contaminación del suelo, del agua y del aire.

Es menos probable que el biogás se escape de un relleno sanitario porque el encierro de los desechos que se están decomponiendo es más completo que en los rellenos simples. El origen del metano es la fermentación anaeróbica (biogasificación) de la fracción orgánica de los desechos enterrados.

En un relleno, las diferencias con respecto a la biogasificación convencional se orientan más hacia la naturaleza de las respuestas ambientales, que al proceso en sí. Por ejemplo, a diferencia de la biogasificación convencional, los desechos no se sujetan a procesos preparatorios diseñados para facilitar la digestión, ni se retira el material inorgánico. No se hace ningún esfuerzo serio para optimizar las condiciones ambientales. La importancia de estas diferencias es que en un relleno, la tasa de biogasificación es más lenta y el tamaño de la fracción de masa orgánica eventualmente convertida en metano, es menor que en la biogasificación convencional. Consecuentemente, los métodos para estimar la producción de gas en un digestor convencional, sólo son parcialmente adecuados para predecir la producción de metano en un relleno.

Generalmente, la cantidad de metano obtenida de un relleno es mucho menor que el volumen teórico predicho con los métodos y modelos existentes. La inclusión específica del contenido de gas y su eventual recolección en el diseño del relleno, dará como resultado un incremento en la producción de gas.

### ***Volumen y composición del biogás***

La biodegradación inicial, es decir, inmediatamente después de que son enterrados los desechos, hasta cierto grado es aeróbica debido al oxígeno contenido en el aire atrapado en, y con, los desperdicios enterrados. La duración de esta etapa puede ser tan breve como unos cuantos días, o tan larga como varias semanas. Dado que la compactación y cubrimiento de los desechos excluye el reabastecimiento del aire atrapado, el oxígeno se consume gradualmente y, eventualmente, la biodegradación se vuelve anaeróbica.

La transición de la descomposición aeróbica a la anaeróbica y la resultante producción de metano en la última, tiene lugar en una serie de fases. La primer fase es la fase aeróbica; su duración es el tiempo requerido para agotar el oxígeno atrapado. El gas generado que predomina durante esta fase es bióxido de carbono. La segunda fase es la transición de aerobiosis a anaerobiosis. Se caracteriza por la extinción de los aerobios obligados y el cambio al modo anaeróbico por medio de los aerobios facultativos. Durante la transición se producen principalmente  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2$ ; este último se produce a un menor grado. La tercer fase se caracteriza por la aparición gradual de metano ( $\text{CH}_4$ ). En la cuarta (última) fase, la producción de  $\text{CH}_4$  se vuelve constante; la composición de los gases en esta fase (fase anaeróbica) es del orden de 40 a 50%  $\text{CH}_4$ , 30 a 40%  $\text{CO}_2$ , 10 a 20%  $\text{N}_2$ , 1%  $\text{O}_2$  y trazas de sulfuros y ácidos orgánicos volatilizados. Los datos de la tabla A indican la composición del gas producido en un relleno típico. Como se indica en la tabla B, el gas también puede contener trazas de compuestos orgánicos volátiles que se pudieran haber desechado con los desperdicios.

Tabla A. Composición típica del gas de rellenos.<sup>15</sup>

Componente	Porcentaje del componente (base volumen seco)
Metano	47.5
Bióxido de carbono	47.0
Nitrógeno	3.7
Oxígeno	0.8
Hidrocarburos parafínicos	0.1
Hidrocarburos aromáticos y cíclicos	0.2
Hidrógeno	0.1
Sulfuro de hidrógeno	0.01
Monóxido de carbono	0.1
Compuestos en trazas <sup>1</sup>	0.5

<sup>1</sup> Los compuestos en traza incluyen dióxido de azufre, benceno, tolueno, cloruro de metileno, percloroetileno y sulfuro de carbonilo, en concentraciones de hasta 50ppm.

Tabla B. Compuestos Orgánicos en trazas en el gas crudo de rellenos; Relleno Mountain View, 1980.<sup>16</sup>

Componente	Concentración (mg/m <sup>3</sup> )
1,2-dicloroetileno	5.2
Tricloroetileno	10.4
Metil isobutil cetona	5.1
Clorobenceno	0.4
Tolueno	4.0
Tetracloroetileno	4.5
Etil benceno	4.0
Xileno	2.3

La velocidad y el volumen de la producción de gas son función de los desechos confinados y de las condiciones prevalecientes en el relleno. Entre los factores que afectan la velocidad se encuentran la temperatura, el pH y el contenido de humedad.

Las temperaturas imperantes generalmente están comprendidas entre 25° y 40°C, estas temperaturas pueden existir sin ningún problema, independientemente de las existentes en el exterior del relleno. En tanto que el pH debe ubicarse entre valores de 6.8 y 7.2, pues a valores de pH inferiores a 6.5 existe una acumulación excesiva de ácidos orgánicos, dando por resultado la caída aún mayor del pH, que puede conducir a la interrupción de la producción de biogás durante meses o años. La humedad es esencial para el metabolismo celular de las bacterias responsables del proceso, así como del transporte de los nutrientes dentro del relleno. El contenido de humedad del relleno depende de la cantidad inicial de humedad de los residuos, del grado de infiltración de agua de lluvia y de las posibles fuentes subterráneas y, en mucho menor escala, del total de agua producida durante el proceso.

La cantidad de desechos enterrados y la edad del relleno, son de los factores que afectan el volumen de la producción de gas. La amplia variación de velocidades y volúmenes de producción de una región a otra se debe a la correspondiente variación de desechos y condiciones.<sup>16-21</sup> Aunque la producción de gas puede continuar disminuyendo gradualmente durante 50 años, la mayor parte se alcanza en alrededor de 20 años luego de la clausura y su mayor actividad se da durante los primeros 5 años.

La basura depositada en los rellenos sanitarios en los países en desarrollo tiende a estabilizarse en un periodo de 10 a 15 años, ya que el alto contenido de material de rápida biodegradación se equilibra aceleradamente, en tanto que los rellenos con alto contenido de papel y cartón tardan 20 años o más.

Entre los muchos modelos desarrollados para predecir las velocidades y volúmenes de gas de rellenos se encuentra el relativamente riguroso enfoque estequiométrico; en el modelo, los desechos biodegradables convertidos a biogás se dividen en dos clases, basados en su facilidad para degradarse.

Estas clases son (1) la fracción fácilmente biodegradable (desperdicios de alimentos, basura de jardinería, etc.); y (2) la fracción menos fácilmente biodegradable (papel, textiles, etc.). Sin embargo, este modelo y otros deben reconocerse solamente como indicadores aproximados de las tendencias esperadas de producción de gas.

La mayoría de los modelos requieren mediciones reales de la producción de gas con el fin de determinar los valores para las constantes de los modelos; también se consideran las variables (condiciones) mencionadas anteriormente.

Entre las variables que especialmente afectan la exactitud de los modelos de predicción se encuentran: (1) el volumen de gas que se escapa del relleno; y (2) el porcentaje de carbono en los desechos del relleno que escapa la ruta de fermentación de metano y se convierte en parte del protoplasma microbiano.

### *Recolección del biogás*

Si se planea la recuperación de biogás para un relleno nuevo, deben integrarse ciertas características al diseño del relleno. Algunas de ellas son distintivas del diseño moderno de rellenos – particularmente aquellas características relacionadas con el efectivo aislamiento del relleno de los ambientes tierra, agua y aire.

Las características específicas de la recuperación de biogás son las que se usan para controlar el movimiento del gas para facilitar su recolección. Esto se logra mediante la instalación de una combinación de pozos estratégicamente espaciados y áreas de alta permeabilidad a través de las cuales el gas se canaliza a los puntos de recolección. Esto involucra la instalación de tubos de ventilación subterráneos y una capa de grava entre la tubería y los desperdicios, o zanjas rellenas de grava. Se recomienda instalar entre 1 y 1.5 pozos por hectárea de superficie del relleno para tener una eficiente recuperación del biogás. El gas es retirado (extraído) del relleno mediante un sistema de tuberías o colectores para transportar el gas y un ventilador para extraer el gas del relleno hacia los colectores<sup>15,17,21</sup>.

El adecuado funcionamiento del sistema de recolección de gas se asegura a través de la operación de los ventiladores para producir un vacío parcial en los colectores y el sistema de recolección, y así jalar al biogás del relleno. Esto se hace a pesar de que algo del gas fluiría naturalmente hacia los pozos de recolección debido a la ligeramente elevada presión interna del relleno. Sin embargo, la velocidad de flujo sería demasiado baja para asegurar el adecuado desempeño de la recolección. Además, los ventiladores no sólo incrementan el flujo de gas del relleno, sino que también amplían el área efectiva del relleno a la que da servicio cada pozo de gas.

Los ventiladores se pueden ajustar, ya sea para jalar el gas del relleno y descargarlo a presión atmosférica para su dispersión, combustión en llama o simple combustión, o para comprimir el gas a mayores presiones para su distribución o procesamiento ulterior.

También se puede recuperar gas de rellenos que no habían sido diseñados para recolección de biogás. Esto se hace taladrando cierto número de perforaciones en el relleno en los puntos de recolección de gas seleccionados. Las perforaciones deben tener de 60 a 90cm (2 a 3ft) de diámetro, y su profundidad debe ser del 50 al 90% de la de los desechos enterrados. Las perforaciones se adecuan de la misma manera que los pozos de recolección que se usan en los rellenos diseñados para recuperación de gas.

Los pozos de recolección se empacan con grava y se equipan con cubiertas que se extienden a la profundidad total del relleno. Las cubiertas se perforan en la sección expuesta al contenido del relleno; deben tener conexiones telescópicas entre los segmentos de tuberías, de tal forma que las conexiones entre los segmentos de tuberías se mantengan a pesar de los hundimientos importantes y no uniformes del relleno.

Los pozos se construyen asentando grava progresivamente alrededor del tubo de recolección de gas. La grava asentada (o un sustituto semejante) funciona como zona de recolección altamente permeable, a través de la cual el gas fluye hacia adentro del tubo de recolección para su retiro del pozo. El área de grava se cubre con un sello a prueba de gas con tierra asentada encima para formar una barrera contra la entrada de

aire externo al pozo. La entrada de aire a un pozo (o a cualquier parte del relleno) diluye el gas recolectado y por lo tanto, disminuye su valor calórico. Además el aire complica la mejora del biogás. Con respecto a la dilución, se incrementa la concentración de  $N_2$  en el gas recolectado, disminuyendo así la calidad del gas. El contenido de oxígeno del aire entrante inhibe la actividad de los microorganismos formadores de metano y puede elevar la relación metano a oxígeno a un nivel explosivo.

El arreglo de los pozos de recolección lo determinan: a) sus respectivas capacidades; b) las características de la cubierta de tierra (suelo); y c) las disposiciones para dirigir el movimiento del gas en el relleno. Las dimensiones del área de relleno afectada por un pozo es función de la velocidad de bombeo.

Es importante que el gas no se extraiga a una velocidad suficientemente grande como para jalar aire a través de la cubierta y hacia adentro del relleno, especialmente si el material de la cubierta es relativamente poroso.

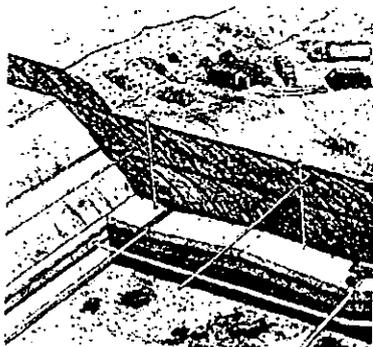
El biogás debe ser mejorado antes de ponerlo en uso. Aún si sólo se usa para calentamiento de espacios y cocina, se requiere un módico acondicionamiento. La mejora requerida es mucho más extensa si el gas se va a usar como combustible para un motor de combustión interna o se va a inyectar a líneas existentes de transmisión.

### *Implicaciones ambientales*

En nuestro país, dentro de 10 ó 15 años, prevalecerán como métodos de disposición final de basura los rellenos sanitarios, por lo que existe la primer condición para que la generación de energía a partir de la basura sea posible. Si prevalecen los rellenos sanitarios será necesario, por cuestiones ambientales, recolectar y destruir por combustión directa los gases (biogás) emitidos por la basura depositada en ellos; la inversión para estos fines se tendrá que realizar con o sin aprovechamiento energético, por lo que existe una segunda condición para su aprovechamiento como energético. En los casos en que se efectúe el aprovechamiento energético, éste estará garantizado y será económicamente viable.

Desde el punto de vista ambiental, el metano, que tiene la capacidad de absorber 21 veces más calor que el bióxido de carbono ( $CO_2$ ) y sitúa al biogás como un importante contribuyente al efecto invernadero; equivale a menos de la quinta parte del provocado por el  $CO_2$  emitido por el parque vehicular particular nacional; es igual al  $CO_2$  emitido por el transporte urbano nacional y es prácticamente igual al mismo  $CO_2$  emitido por la industria nacional del cemento. De ahí la magnitud e importancia de mitigar estos efectos y una razón más para hacerlo es aprovechar la energía de dichas emisiones.

Hipotéticamente, al aprovechar el biogás para la generación de electricidad se estarán desplazando y ahorrando hidrocarburos y evitando emisiones a la atmósfera del orden de seis millones de barriles de petróleo y 11.5 millones de toneladas de  $CO_2$  anualmente<sup>30-42</sup>.



La figura anterior ilustra un relleno sanitario típico de basura urbana. Como se observa, existen tuberías horizontales y verticales que permiten recolectar gases y lixiviados para que los gases puedan emplearse

como combustible y los lixiviados puedan tratarse; con ambos casos se evita la inminente y evidente contaminación ambiental.

### ⊕ **Sistemas Anaeróbicos de Tratamiento de Aguas:**

Los sistemas de tratamiento de aguas se dividen en físicos, físico-químicos y biológicos. A esta última división pertenecen los sistemas anaeróbicos. Existen tres tipos principales de procesos anaeróbicos de tratamiento de aguas: primera generación (tanques Imhoff y fosas sépticas); segunda generación (UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket), que son los más utilizados y, tercera generación (lechos fluidizados).

En general, los sistemas anaeróbicos de tratamiento de aguas, funcionan de la misma manera que los biodigestores antes mencionados: sus tres pasos son hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis. De hecho, una de las muchas soluciones técnicas es que las aguas negras por separado pueden tratarse anaeróticamente en plantas de biogás. El tratamiento anaeróbico presenta muchas ventajas, especialmente para biodesechos húmedos, y se ha vuelto más económico en los últimos años.

El concepto tradicional de saneamiento y manejo de desechos de los países industriales trabaja con la tecnología "fin de la tubería". Los problemas agudos (no los de largo plazo) se resuelven en lugar de evitarse con los sistemas adecuados. Esta situación se ha reconocido en el tratamiento de desechos, dando como resultado tecnologías para recolección y tratamiento por separado. En el campo del tratamiento de aguas residuales, la discusión apenas ha comenzado<sup>23</sup>. Las primeras instalaciones para el consumo de agua y nutrientes WC y sistemas de alcantarillado fueron criticados por mucha gente, pero los sistemas alternativos no han sido suficientemente confiables<sup>24</sup>. El uso imprudente del agua, los nutrientes fósiles y la energía detuvieron el desarrollo de sistemas con control en el origen.

En términos generales los sistemas de tratamiento de aguas residuales se pueden distinguir en dos tipos: los sistemas que emplean procesos fisicoquímicos y los que se sustentan en procesos biológicos. Los procesos biológicos se distinguen a su vez en procesos aerobios y procesos anaerobios, dependiendo de si requieren para su operación del suministro de aire o no.

A raíz de la crisis energética en la década de los setenta, los sistemas anaerobios se han estudiado con mayor intensidad, lo que ha dado por resultado reactores de gran velocidad de reacción que contienen poblaciones densas de microorganismos de gran actividad. Estos desarrollos permiten tener capacidades de tratamiento similares a los sistemas aerobios a costos menores tanto de operación como de mantenimiento, ya que no requieren energía para aeración y generan de cinco a seis veces menos lodos residuales. Al comparar los sistemas aeróbicos y los anaeróbicos, se puede observar que las diferencias entre unos sistemas y otros sugieren la conveniencia de aplicarlos en forma conjunta, en lugar de antagonizarlos como se ha pretendido durante mucho tiempo.

Parámetro	Tratamiento Anaeróbico	Tratamiento Aeróbico
Requerimientos de energía	Bajos	Altos
Grado de tratamiento	Moderado (60-90%)	Alto (95%)
Producción de lodos	Baja	Alta
Estabilidad del proceso (a compuestos tóxicos y sobrecargas)	Baja a moderada	Moderada a alta
Tiempo para arranque	2 a 4 meses	2 a 4 semanas
Requerimientos de nutrientes	Bajos	Alto para ciertos desechos industriales
Olor	Problemas potenciales	Menores posibilidades
Requerimientos de alcalinidad	Alto para ciertos desechos industriales	Bajos
Producción de biogás	Si	No
Costos de inversión	USD \$30/cápita	USD \$50/cápita
Costos de operación	USD \$0.4/cápita	USD \$0.8-1/cápita

La unión o combinación de estos sistemas en forma apropiada da por resultado la obtención de un tratamiento adecuado y más económico para un fin determinado, y en especial, para el tratamiento de aguas residuales municipales o de albañales.

Enseguida se presenta el funcionamiento de una planta piloto que combina ambos sistemas. Originalmente la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del IIE era una planta de lodos activados, empleando aireación difundida (desarrollo aeróbico). El soplador instalado en la planta para proporcionar el aire requerido por los lodos activados, está acoplado a un motor de 10hp que operaba continuamente las 24 horas del día; actualmente opera en forma intermitente (sólo durante el día). El objetivo de las modificaciones efectuadas a la planta fueron para tratar, inicialmente por medio de un proceso anaerobio, las aguas residuales del IIE y depurarlas con el proceso aeróbico ya existente.

Los parámetros de diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales del IIE son:

- Personas servidas: 1200.
- Volumen a tratar: 180m<sup>3</sup>/12h.
- Carga orgánica: 70kg/d demanda bioquímica de oxígeno (DBO)-5.
- Eficiencia del tratamiento: 90% remoción DBO y sólidos suspendidos totales (SST).

La modificación efectuada en la planta consistió en construir un tanque de 7 x 1 x 3.6m, dando un volumen aproximado de 25m<sup>3</sup> para crear un compartimiento separado del proceso aerobio; en este tanque se instaló un captador de gas de fibra de vidrio, una caja reguladora de flujo y tubos de distribución de la alimentación del agua en el fondo del compartimiento. En la parte superior se instaló un colector de agua tratada, el cual desemboca en el tanque de aireación junto con los lodos de retorno del proceso aeróbico.

La planta piloto comenzó a funcionar en Julio de 1993; y la eficiencia del proceso de entonces a julio de 1994 fue la siguiente:

Parámetro (mg/l)	Agua residual de entrada	Efluente reactor anaerobio	Eficiencia reactor anaerobio %	Efluente final	Eficiencia total
DQO	356	136	60	45	87
DBO	105	32	69	-	-
SST	462	-	-	12	97

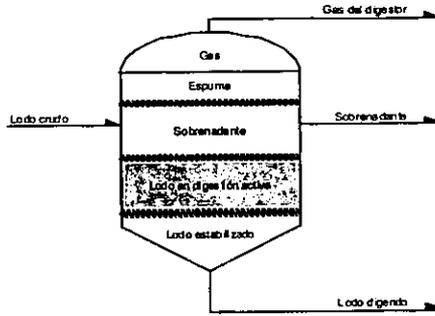
DQO= Demanda química de oxígeno; DBO= Demanda bioquímica de oxígeno; SST= Sólidos suspendidos totales

Tanto los ensayos de laboratorio como la operación de la planta, muestran claramente los beneficios de tratar por medios anaerobios estas aguas residuales, ya que alcanzan en el laboratorio depuraciones del orden del 75% en términos de DQO a tiempos de residencia de 3.2 a 5 horas y temperatura ambiente. La operación del reactor anaerobio instalado en la planta de tratamiento de aguas residuales del IIE ha permitido constatar los resultados de laboratorio y las dificultades de escala de estos sistemas, permitiendo corregir y optimizar su funcionamiento.

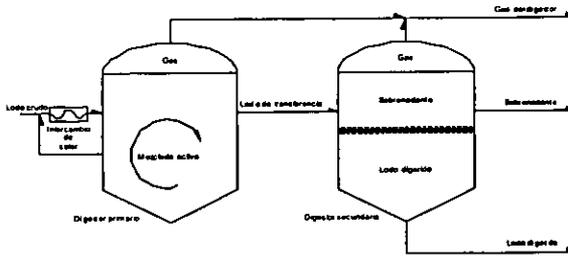
La combinación de procesos anaerobios y aerobios para el tratamiento de aguas residuales del tipo municipal tiene gran oportunidad de ser empleada a gran escala, ya que el enorme consumo de energía y producción de lodos residuales resultantes de los procesos aerobios empleados tradicionalmente, pueden reducirse de un 60% a un 70%, teniendo gran impacto sobre todo en un marco de preservación ecológica y energética como los que deben imperar en este tiempo.

### **Biodigestores Anaeróbicos:**

Las características y funcionamiento de este tipo de plantas han sido descritos a lo largo de este trabajo, particularmente en el capítulo "Producción"; sin embargo, enseguida se presentan algunas ilustraciones de este tipo de plantas.



Capas que se forman en los digestores



Digestión en dos etapas

## Tipos de plantas

Existen muchos tipos de plantas para obtener biogás a partir de desechos; por ejemplo, en Nepal se investigaron y se probaron varios diseños de plantas tales como: el diseño de tambor de acero flotante, el diseño de domo de concreto fijo, el diseño de túnel prefabricado, el biodigestor de bolsa plástica, contenedores de gas hechos de ferrocemento, domo mezcla de ladrillos, domo de barro; sin embargo, el diseño de domo fijo es el único diseño reconocido y el más popular en Nepal.

Prácticamente en todos los países donde la tecnología del biogás ha tenido cierto éxito, se han desarrollado diseños particulares de plantas de biogás en concordancia con sus propias características culturales, climáticas, tecnológicas, etc., pero todos ellos se pueden generalizar en tres tipos principales:

### Apariencia física de los tres tipos principales de plantas de Biogás

Una primera revisión de la apariencia física de los diferentes tipos de plantas de biogás describe los tres tipos principales de plantas simples de biogás: plantas de globo, plantas de domo fijo y plantas de tambor flotante.

#### ⊕ Plantas de Globo

Este tipo de plantas tiene en la parte superior un digestor de bolsa en el cual se almacena el gas, la entrada y la salida se encuentran en la misma superficie de la bolsa. Sus ventajas son bajo costo, fácil transportación, poca sofisticación de construcción, altas temperaturas de digestión, fácil limpieza, mantenimiento y vaciado.

Sus desventajas son su corto tiempo de vida, alta susceptibilidad a ser dañado, baja generación de empleo y por lo tanto limitado potencial de autoayuda.

## Plantas de Domo Fijo

Las plantas de domo fijo consisten en un recipiente fijo e inmóvil para gas, que se coloca en la parte superior del digestor. Cuando comienza la producción de gas, la mezcla se desplaza hacia el tanque de compensación. La presión del gas aumenta con el aumento de volumen del gas almacenado y con la diferencia de altura entre el nivel de la mezcla en el digestor y el nivel de la mezcla en el tanque de compensación.

Ventajas: costos de construcción relativamente bajos, larga vida útil. La construcción subterránea ahorra espacio y protege al digestor de cambios de temperatura; además su construcción implica la creación de fuentes de empleo.

Las principales desventajas son los frecuentes problemas con la permeabilidad para gases del recipiente de ladrillos para el gas (una pequeña fractura en el recipiente superior puede causar altas pérdidas de biogás). Por lo tanto, las plantas de domo fijo, sólo son recomendables cuando la construcción puede ser supervisada por técnicos experimentados de biogás. La presión del gas fluctúa dependiendo sustancialmente del volumen del gas almacenado.

## Plantas de Tambor Flotante

Las plantas de tambor flotante consisten en un digestor subterráneo y un recipiente móvil para gas. El recipiente para gas flota, ya sea directamente sobre la mezcla de fermentación o en una chaqueta de agua. El gas se recolecta en el tambor de gas, que se levanta o baja, de acuerdo con la cantidad de gas almacenado.

Sus ventajas son su operación simple y fácil de entender: el volumen almacenado de gas es visible directamente. La presión de gas es constante, determinada por el peso del recipiente de gas. La construcción es relativamente fácil; los errores en la construcción no llevan a problemas mayores en la operación y la producción de gas.

Sus desventajas son los altos costos de los materiales para el tambor de acero, la susceptibilidad a corrosión de las partes de acero, por lo que la vida útil de la planta es más corta; además se tienen costos fijos de mantenimiento para pintar el tambor.

## **Capítulo 4**

# **PROBLEMÁTICA Y SOLUCIONES**

## Basura en México

El acelerado crecimiento poblacional y los patrones de producción y consumo han traído como consecuencia una serie de problemas a escala mundial, tanto por la falta de control ambiental en los procesos industriales, como por las instalaciones inadecuadas o insuficientes para el manejo y tratamiento de los residuos generados.

El sistema de recolección es la parte importante en el manejo de los residuos y en algunas ocasiones representa hasta 80% de los costos totales que el municipio destina para su gestión. En las ciudades de la república mexicana se recolecta alrededor de 70% de dichos residuos, abandonando el restante en calles, lotes baldíos, basureros clandestinos o tirándolo en cauces de ríos, arroyos y canales.

Por basura podemos entender todos los residuos o desechos generados por la actividad humana, sin embargo, esta definición es muy amplia, por lo que hemos decidido acotar al término. Los residuos se clasifican en municipales, industriales y especiales. La categoría que analizaremos es la de residuos sólidos municipales (RSM)<sup>1</sup>, aquí se contabiliza la basura generada por los hogares y ciertos desechos generados en comercios e industrias pequeñas, de igual forma, se incluyen los residuos de mercados y jardines.

Los residuos sólidos municipales (RSM) los generan tanto hogares como el sector público, pequeñas industrias (especialmente del ramo alimenticio) y comercios. Su disposición final es la última etapa del sistema de aseo urbano de cualquier ciudad y está íntimamente relacionada con la preservación del ambiente, así como con la salud de la población, por lo que su control y tratamiento debe ser mediante un sistema adecuado que minimice los impactos negativos hacia los ecosistemas.

Se presentan estadísticas acerca de las tendencias en nuestro país referentes al manejo y disposición de los RSM; éstos representan una categoría de análisis para cuantificar y conocer las características de la basura producida en las ciudades.

GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES POR COMPOSICIÓN, 1992-1998 (Miles de toneladas)							
Tipo de basura	1992 <sup>1</sup>	1993	1994	1995	1996	1997 <sup>2</sup>	1998
Papel, cartón, productos de papel	3 075.5	3 952.2	4 146.8	4 292.7	4 496.7	4 118.6	4 298.5
Textiles	439.4	418.5	439.1	454.6	476.2	436.2	455.2
Plásticos	878.7	1 230.3	1 290.9	1 336.3	1 399.8	1 282.1	1 338.1
Vidrios	1 318.1	1 657.3	1 738.9	1 800.1	1 885.6	1 727.1	1 802.5
Metales	659.0	814.6	854.7	884.8	926.8	848.9	886.0
Basura de comida, jardines y materiales similares (orgánicos)	11 423.1	14 718.9	15 443.6	15 987.0	16 746.7	15 338.8	16 008.5
Otros (residuos finos, hule, pañal desechable, etc.)	4 173.8	5 297.7	5 558.5	5 754.1	6 027.5	5 520.8	5 761.8
<b>Total</b>	<b>21 967.5</b>	<b>28 089.5</b>	<b>29 472.4</b>	<b>30 509.6</b>	<b>31 959.4</b>	<b>29 272.4</b>	<b>30 550.5</b>

<sup>1</sup> Cifras estimadas de acuerdo con los porcentajes de composición de los años posteriores con base en el total reportado para 1992 por la Dirección General de Infraestructura y Equipamiento, Sedesol.

<sup>2</sup> A partir de 1997 las cifras se ajustan con base en estudios de generación per cápita llevados a cabo en pequeñas comunidades, donde se ha encontrado que dicha generación es del orden de 200 a 350g, cantidades inferiores a las reportadas para los años anteriores al año de referencia.

Nota: las sumas pueden no coincidir con los totales debido al redondeo de las cifras. La composición se refiere al conjunto de materiales identificados como residuos sólidos, categorizados en grupos y tipo de residuos.

Fuente: Sedesol, Subsecretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda, 1999. Página electrónica del INEGI.

Dentro de los residuos sólidos municipales podemos encontrar los siguientes desechos: algodón, cartón, cuero, envases de cartón, hule, hueso, lata, toza y cerámica, papel, material ferroso, plástico, residuos de jardinería, residuos alimenticios, trapo, toallas sanitarias, vidrio, etc.. SEDESOL, México 1993

DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES, 1992-1998 (Miles de toneladas)							
Método	1992	1993	1994	1995	1996	1997 <sup>1</sup>	1998
Recolección <sup>2</sup>	15 377.278	19 662.678	20 630.704	21357.003	22 371.328	22 539.763	25 854.888
Disposición final							
Rellenos de tierra controlado	4 641.810	4 935.180	5 058.559	5 952.000	8 573.000	10 269.990	15 877.140
Rellenos de tierra no controlado	2 710.130	2 833.313	2 915.438	2555.000	2 606.000	1 657.480	1 007.490
Tiraderos a cielo abierto	14 465.689	20 129.258	21 297.212	21 796.067	20 564.031	17 125.870	13 458.960
Reciclaje	149.910	191.788	201.230	206.553	216.369	219.080	206.914
<b>Total de RSM generados</b>	<b>21 967.525</b>	<b>28 089.539</b>	<b>29 472.439</b>	<b>30 509.620</b>	<b>31 959.400</b>	<b>29 272.420</b>	<b>30 550.504</b>

<sup>1</sup> A partir de 1997 las cifras se ajustan con base en estudios de generación per cápita llevados a cabo en pequeñas comunidades, donde se ha encontrado que dicha generación es del orden de 200 a 350g, cantidades inferiores a las reportadas para los años anteriores al año de referencia.

<sup>2</sup> Las cifras reportadas para los años 92, 93, 94, 95 y 96 corresponden al 70%, para 1997 al 77% y para 1998 al 84.63% del volumen total generado respectivamente, estimadas con base en información proporcionada por la Dirección General de Infraestructura y Equipamiento, Sedesol.

Nota: La disposición se refiere al depósito permanente de los residuos en un sitio en condiciones adecuadas para evitar daños a los ecosistemas, en este caso los rellenos de tierra controlados. Las sumas pueden no coincidir con los totales debido al redondeo de las cifras.

Fuente: Sedesol, Manual Técnico-Administrativo para el Servicio de Limpia Municipal, Sedesol, México, 1995. Sedesol, Subsecretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda, 1999; Página electrónica del INEGI.

Se considera que la mejor solución en México para la gestión ambiental de residuos sólidos es su disposición en rellenos sanitarios, pero muy pocas ciudades cuentan con tales instalaciones o las que las poseen no necesariamente operan adecuadamente<sup>41</sup>. Para 1994, cuatro ciudades se encontraban en etapa de construcción de rellenos sanitarios y 31 ciudades más tenían proyectos ejecutivos para la construcción de rellenos. Estas últimas abarcaban centros urbanos que aglutinaban desde 18 334 habitantes en el estado de Veracruz, hasta 943 041 ciudadanos en el caso extremo de León, Guanajuato. Las 31 ciudades con este proyecto sumaban cerca de 7.5 millones de personas.

### Basura en México DF

De acuerdo con el informe preliminar del Censo 2000, del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), la población total del DF es de 8,591,309 personas, entre hombres y mujeres.

Según el INEGI, el Distrito Federal genera diariamente más de 12 mil toneladas de residuos sólidos; de las cuales, el 48% proviene de los desechos domiciliarios, en tanto que los establecimientos públicos y privados emitieron el 52% restante.

El Distrito Federal genera el 14.5% de los residuos sólidos en el país; la Zona Metropolitana del Valle de México prácticamente contribuye a la tercera parte de la generación total de basura en nuestro país, esto debido a las grandes concentraciones de población, las actividades económicas y la falta de acciones concretas para solucionar los problemas de manejo y reducción de la basura.

De la producción diaria de residuos sólidos en el DF sólo se recicla el 30%, confinando el resto en basureros e incluso en terrenos baldíos. La mayor parte de la basura que es confinada permanece en estos basureros, pues sólo un pequeño porcentaje es reciclado mediante procesos de selección y transporte por parte de los pepenadores.

La generación de basura ha aumentado considerablemente a lo largo de este siglo. Gran parte de este crecimiento se debe al incremento de la actividad económica; el consumo y la producción de bienes han aumentado notablemente en las últimas décadas. En 1950 el volumen de generación de basura per cápita era 0.37 kilogramos diarios. En 1990, el promedio saltó a un kilogramo. Actualmente se calcula que los habitantes y actividades económicas del DF arrojan 1.1 kilogramos de basura al día.

La composición de la basura también ha cambiado considerablemente, en 1950 el 5% correspondía a desechos no biodegradables, actualmente la mitad de la basura corresponde a este tipo de desechos. Esto implica que la actividad industrial que genera bienes de consumo, así como que la composición de estos bienes se ha visto modificada debido a los avances tecnológicos y al aprovechamiento de otros recursos, pues debido a las técnicas de mercadeo que se preocupan más por el empaque que por el producto y a las crecientes tendencias consumistas, el consumo y la producción de bienes han aumentado notablemente en las últimas décadas.

## Distrito Federal y Zona Conurbada: Generación de Residuos Sólidos, 1994



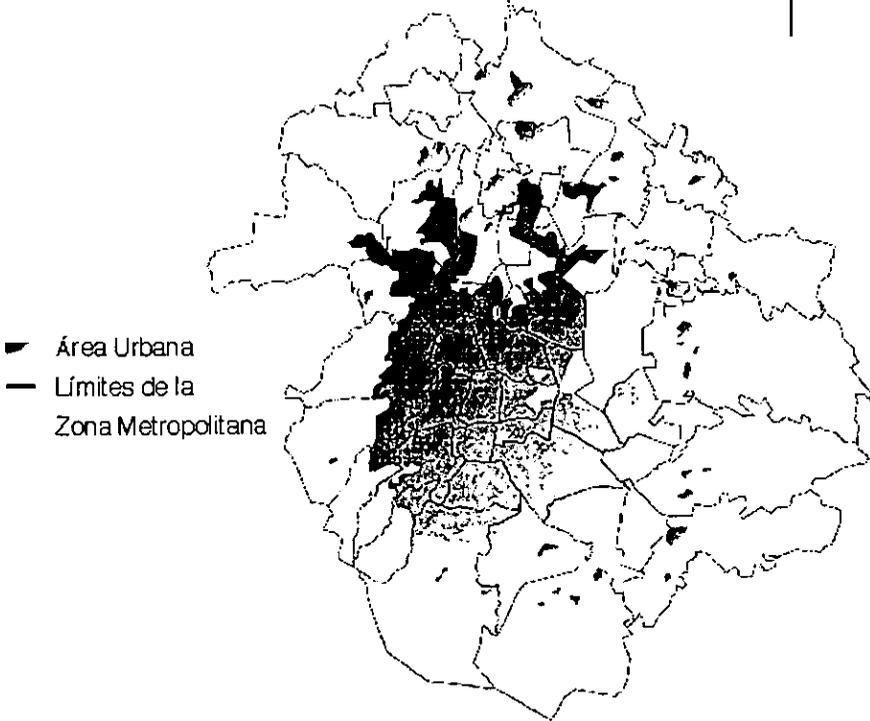
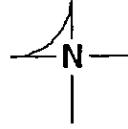
### 1/ Localización de los establecimientos industriales generadores de residuos sólidos.

De acuerdo con lo publicado por el INEGI (México 1999), los municipios conurbanos son: Acolman (Azcapotzalco), Atenco (Tláhuac), Atizapán de Zaragoza (Xochimilco), Chalco, Chiautla, Chicoloapan, Chiconcuac, Chimalhuacán, Coacalco de Berriozábal, Cuautitlán, Cuautitlán Izcalli, Ecatepec, Huixquilucan, Ixtapaluca, Jaltenco, Melchor Ocampo, Naucalpan de Juárez, Nextlalpan, Nezahualcóyotl, Nicolás Romero, Papalotla, La Paz, Tecámac, Teoloyucan, Teotihuacan, Tepetlaoxtoc, Tepozotlán, Texcoco, Tezoyuca, Tlalnepantla de Baz, Tultepec, Tultitlán, Valle de Chalco Solidaridad y Zumpango.

Actualmente, para producir bienes se utilizan combinaciones de materiales que anteriormente no se utilizaban, las composiciones químicas de los productos se han alterado y las combinaciones se han multiplicado, así observamos que un producto comercial utiliza cientos de productos para su elaboración.

De las 12 mil toneladas de basura generada, el 59% es industrialmente reciclable pues el otro 41 por ciento es materia orgánica; esto implica que casi el 60% de la basura se podría reciclar, y el resto, que corresponde a materia orgánica, se podría utilizar para llevar a cabo compostas que generan grandes beneficios a las actividades agrícolas o para la formación del biogás como fuente alternativa de combustibles para la generación de energía eléctrica y otras funciones que ya se presentaron en capítulos anteriores. Se calcula que durante el año 2000 se habrán generado 25 mil toneladas diarias de basura en la Zona Metropolitana, de las cuales 54 por ciento corresponderán al Distrito Federal. Esto representará una producción diaria de 13,500 toneladas. Según las expectativas esta cantidad tenderá a aumentar con el crecimiento económico.

**Ciudad de México; Conformación del Area Urbana  
y de la Zona Metropolitana, 1995**



La basura que genera la Ciudad de México requiere de un manejo apropiado para evitar riesgos en la salud y un mayor deterioro ambiental. Debido a la magnitud de los desechos generados por los millones de habitantes es necesaria una asignación considerable de recursos por parte de la jefatura de gobierno para encauzar esta problemática. El reciclaje no ha sido una opción adoptada seriamente por el gobierno capitalino, sólo existen dos plantas separadoras de sólidos en la ciudad de México, San Juan de Aragón y Bordo Poniente. Por otro lado, los llamados "pepenadores", aún cuando también contribuyen a la separación y el reciclaje de la basura, están perfectamente organizados bajo las órdenes de líderes con fuertes tendencias políticas, por lo que los procesos de reciclaje se han visto minados debido a los ingresos percibidos por estos grupos. Sin contemplar los graves riesgos de salud que corre su gente, ni los enormes beneficios que todos obtendríamos del reciclaje de una mayor proporción de la basura generada, estos grupos de recolectores de basura se han opuesto en numerosas ocasiones a institucionalizar el sistema de reciclaje de basura, y no se han adaptado a un proceso de reciclaje a gran escala por temor a perder sus ingresos. Además el grupo de pepenadores ha logrado guardar un gran monopolio de la basura, a tal grado que es imposible la entrada de toda persona ajena a los tiraderos. Los vínculos políticos que tienen estos grupos los han ayudado a mantener este monopolio. Consecuentemente, los procesos de reciclaje no han tenido el éxito que deberían.

La diputada representante de la Comisión de Desarrollo Sustentable o Ecología en la Cámara de Diputados del Estado de México considera que no ha existido una planeación coherente y eficaz en cuanto al manejo de la basura de la Zona Metropolitana del Valle de México. "No ha existido una clara coordinación entre el Estado de México y el Distrito Federal en cuanto al manejo de basura." Señala la diputada local. La diputada recalcó que espera que exista un amplio diálogo entre las autoridades del Distrito Federal y el gobierno del Estado de México para la solución de varios problemas ambientales.

Según datos del Departamento del Distrito Federal, cerca de 20 mil trabajadores, entre barrenderos, choferes, y ayudantes, están comisionados a las tareas de recolección y barrido en una extensión de 17 mil kilómetros, con el auxilio de dos mil vehículos recolectores. Para llevar a cabo la recolección, tratamiento y almacenamiento de basura en el DF existen 13 estaciones de transferencia, tres sitios de disposición final, una instalación de recuperación y compostaje y una planta de incineración. La basura es recolectada por los cerca de 2,000 vehículos que se reparten en toda la ciudad, de ahí esta basura es llevada a los 13 centros de transferencia, posteriormente grandes tráileres la transportan hacia los centros de disposición final, que son rellenos sanitarios o tiraderos a cielo abierto. Actualmente, aproximadamente el 35% de la basura es depositada en los rellenos sanitarios y alrededor del 30% de la basura se deposita a cielo abierto.

Es importante destacar la falta de una cultura de aprovechamiento de la basura, la cual traería como beneficios, no sólo evitar que se sigan usando terrenos enormes como tiraderos con la consecuente contaminación de aire, aguas y suelos, sino que además se mejoren tanto las condiciones de trabajo de los propios pepenadores como sus ingresos. Esta cultura debe empezar en casa, pues es ahí donde se puede evitar más fácilmente que los diferentes tipos aprovechables de basura se mezclen.

Actualmente la mayor parte de los desechos, se desperdicia, principalmente por la falta de una sana cultura de la basura, lo cual a su vez, ocasiona que se desperdicie una posible fuente de ingresos para la población.

## ***La Basura en la Central de Abasto del DF<sup>26</sup>***

### **Breve historia de la Central de Abasto**

La Central de Abasto, como actualmente la conocemos, inició su construcción en 1981, cuando también quedó formalizado el contrato de Fideicomiso para la Construcción y Operación de la Central de Abasto del Distrito Federal, mediante la escritura pública No. 11, de fecha 7 de julio, pasada ante la fe del Notario Público 125 del Distrito Federal; La Central quedó diseñada como una figura hexagonal ligeramente deformada cuyo eje central mide 2,250 metros; en los extremos del eje se localizan las entradas y salidas.

El proyecto arquitectónico de la Central de Abasto, fue concebido por el Arq. Abraham Zabłudowski. Durante el tiempo que se realizó la construcción de la Central de Abasto, funcionó el Comité Técnico de Construcción, el cual entregaría las instalaciones al Comité Técnico y de Distribución de Fondos. El día 22 de noviembre de 1982 inició operaciones la Central de Abasto, instalada en la Delegación Iztapalapa del Distrito Federal.

### **Producción de basura**

El depósito de Comida Central de la Ciudad de México (Central de Abasto) es el mercado más grande en el mundo y recibe 24,000 toneladas de productos alimenticios diariamente, un 40% de la cosecha nacional mexicana. Se estima que los movimientos diarios dejan entre 100 y 800 toneladas de desechos de materia orgánica por día, principalmente material orgánico del cual se usan alrededor de 100 toneladas como una fuente de forraje que alimenta a 2500 cabezas de ganado de las lecherías de establos urbanos en el este de la Ciudad de México. Una gama amplia de productos se usa como alimento para las vacas, de lo siguiente: brócoli, coliflor, lechuga, zanahoria, sal, calabaza, col, nabo, rábano y remolacha. A su vez, el excremento de los establos de la lechería es por semana alejado y usado completamente para la producción de abono para las cosecha en áreas peri-urbanas. La cosecha más significativa es el nopal crecido en campos terraplenados en Milpa Alta, en el sur-este de la ciudad. De hecho, según lo publicado en la página electrónica del INEGI, la

<sup>26</sup> <http://www.ceda.df.gob.mx>

producción de basura de la Delegación Iztapalapa cubre el mayor porcentaje (20.61%) de la producción total de basura del DF. La Central de Abastos, el centro comercial más grande; cubre unas 328 hectáreas y opera 365 días del año. Consiste en 2000 almacenes con la capacidad de almacenar 155,000 toneladas y recibe 24,000 toneladas diarias de productos orgánicos.

## **Soluciones**

La solución al problema de la basura es sencilla: reducir, reciclar y reutilizar. Los actuales sistemas económicos y políticos nos impiden alcanzar estos objetivos: la tendencia general de los productores de bienes de consumo y de servicios es incrementar su producción al menor costo posible, por otro lado, los subproductos descargados al medio ambiente no son tomados en cuenta seriamente, a menos que conlleven un beneficio económico, no serán prioridades para los industriales y comerciantes. El reciclaje sería de gran utilidad una vez resueltos los problemas antes expuestos. Sin embargo, la producción de biogás, es una de las opciones más viables, pues este sistema de utilización de basura además de generar beneficios económicos y ambientales, es una fuente alterna y renovable de combustible.

### **Las tres R's**

Reducir: Un creciente número de ambientalistas o ecologistas utilizan la llamada fórmula de las tres "R's" para buscar una salida a la problemática. Según el ecologista Arturo Buenrostro, especialista en basura, la mejor manera de evitar la generación de basura es a través de su reducción, pues existen muchos elementos que son innecesarios en la vida cotidiana. La cultura actual del país nos impide alcanzar una vida más sana mediante el aprovechamiento de los residuos que diariamente se generan. Según el ambientalista, el cual pertenece a la organización no gubernamental llamada Bio, debe existir una educación que nos permita hacer un uso más racional de los recursos. "Sin desearlo, hemos ido perjudicando el medio ambiente y nuestra calidad de vida con nuestras demandas irracionales, formas de consumo y malos hábitos." El reducir no implica detener la máquina insaciable del progreso, se pueden producir cosas en menor escala y de mayor calidad, la tecnología es una buena herramienta para lograr este objetivo. Tal es el caso de la reciente industria japonesa, la cual debido al poco espacio nacional y a las perspectivas mundiales se ha dedicado a producir artículos con dimensiones pequeñas y que utilizan menos recursos, generando menos basura. Por lo tanto, a través de la tecnología se puede buscar una producción más eficiente, de mayor calidad, con menor utilización de recursos naturales, de menor tamaño y que genere menos desechos, así como el desarrollo de nuevas tecnologías. La moda es un factor fundamental para implementar un cambio de esa magnitud, la educación es una pieza clave para producir un cambio positivo para que tanto los productores como los consumidores adquieran una visión consciente de la problemática.

Reciclar: El reciclaje está surgiendo como una alternativa a la generación de desechos. En varias regiones del mundo el reciclaje se está adoptando como una forma de vida. A través de programas educativos y de incentivos fiscales y ambientales muchas ciudades en el mundo ya separan su basura. En el Distrito Federal son pocos los que reciclan la basura: sólo se recicla el 30%. El gobierno capitalino debería emprender una acción para adoptar el reciclaje en la mayoría de las colonias del Distrito Federal. Esto se puede hacer a través de grandes campañas publicitarias y educativas. A través de medios de comunicación, carteles en lugares públicos e instruyendo en las instituciones de educación, es posible influir positivamente en la población para que lleve a cabo esta medida. Los recolectores de basura pudieran tener unidades con varias separaciones donde se podrían depositar los diferentes tipos de basura. Lo esencial para separar sería el papel, vidrio, plástico, metal y materiales tóxicos. La basura orgánica que contribuye con casi la mitad de la generación de la basura en el Distrito Federal podría utilizarse para hacer compostas o producir biogás. En el caso de existir un área verde en el hogar o en un lugar cercano se puede utilizar la

composta como abono o recurrir a la instalación de una pequeña planta productora de biogás, ya sea para la generación de energía eléctrica, como combustible o para la generación de otros compuestos, como alcoholes; proporcionando grandes beneficios a la comunidad, como se hace en muchos países del mundo: Alemania, E.U.A. y China, entre otros.

Además de esta solución práctica se propone un plan gradual de reciclaje en toda la ciudad, empezando por colonias, barrios, unidades habitacionales, privadas y vecindades. El presidente de la Comisión de Ecología en la ALDF, señala que se conocen varios programas que están reduciendo su basura de manera seccional. Este es un claro ejemplo de las alternativas viables con remuneración.

En el Instituto Nacional de Recicladores (INARE) existen actualmente 7 mil empleos generados por el sector del reciclaje, en el país existen 72 mil empleos que provienen de esa actividad. Estos sólo reciclan un pequeño porcentaje de la basura generada, si al reciclaje se le otorgara una mayor proporción de los residuos sólidos, entonces los empleos producto de dicha actividad aumentarían notablemente. Estos empleos serían más salubres para los pepenadores, además con el reciclaje se evita un gran deterioro ambiental y se genera una ganancia. De acuerdo con el INARE, entre mayor grado de separación se haya logrado, la basura adquiere más valor. Existe un número considerable de plantas de reciclaje, pero no son suficientes para poner en marcha un proyecto a gran escala.

Reutilizar: No todo lo que se usa se debe de desechar. Existen numerosos productos que podrían reutilizarse, pues además de producir un impacto favorable al medio ambiente los productos reutilizables pueden reducir costos y por tanto incentivar su producción. Algunos productos como detergentes o líquidos pueden reutilizar sus envases de plástico. Al acabarse el contenido de los envases estos pueden ser rellenados; tal es el caso de los botes de agua. Generalmente los productores utilizan los envases para la mercadotecnia por lo que les es difícil vender un producto que no está en un envase perfectamente diseñado y con excelente presentación. Los precios pueden bajar si la utilización de los envases disminuye.

Existen Estados, en su mayoría occidentales, que utilizan el etiquetado ambiental o eco-labelling las autoridades nacionales han implementado un programa en el cual todos los productos comerciales deben de tener una etiqueta en la cual se describa el proceso de elaboración del producto y si éste es ambientalmente amigable o perjudicial. De esta manera la gente adquiere mayor conciencia y se incentiva la compra de productos ambientales.

La problemática de la basura es un fenómeno que concierne a todos. Si calculamos que el habitante promedio de la zona conurbana de esta ciudad produce al año 368 kilogramos de basura y que vivimos alrededor de 19 millones de mexicanos en la ZMVM, la problemática se vuelve más seria. Este problema se incrementa con el creciente número de tiraderos clandestinos a cielo abierto que traen problemas y riesgos a la salud de los habitantes cercanos a estos. Se calcula que el 5% de la basura está depositada en estos basureros, esto implica una prevalencia masiva de insectos, ratas y malos olores. Además existen elementos tóxicos que pueden traer consecuencias graves; tal es el caso de algunos residuos farmacéuticos, solventes, baterías, químicos y pinturas que deben de ser aislados, estos al encontrarse a cielo abierto pueden ocasionar problemas al hombre, pero sobre todo a la naturaleza a través de la filtración al subsuelo o mantos fráticos.

### **Gestión Ambiental**

Si bien el interés de México por la solución de sus problemas ambientales nacionales se remonta a 1971, cuando fue decretada la primera *Ley federal para prevenir y controlar la contaminación ambiental*, es hasta fechas recientes que surge un marco institucional legal y para la gestión ambiental del Distrito Federal y más globalmente sobre la ZMCM.

En la primera mitad de los setenta, la política ambiental se centró más en "prevenir y controlar" los efectos que en las causas y se orientó esencialmente a las tareas de conservación de los recursos naturales y de

saneamiento ambiental en el Distrito Federal. Posteriormente y hasta principios de los ochenta se incorporaron al enfoque anterior los factores de causalidad, así como aspectos de restauración y normatividad. En los años siguientes de la misma década la política ambiental comienza a vincular las causas económicas y sociales con los fenómenos ambientales, además de considerar los factores directos (cabe destacar dos hechos para todo el período previo: (a) la calidad del aire fue el tema privilegiado de la gestión ambiental y (b) el ámbito de acción de ésta fue únicamente el Distrito Federal). Y por último, desde finales de los ochenta a la actualidad – en el contexto de la *Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente* de 1988 -, se adopta un enfoque integral desde la óptica del desarrollo sustentable, esto es, asociando la problemática ecológico-ambiental al desarrollo económico y social, adoptando como ámbito de acción a la zona metropolitana (es decir, no sólo al Distrito Federal sino también al área conurbana). En esta última etapa es cuando surgen en todas las entidades federativas del país leyes locales y reglamentos de protección al ambiente, así como entes administrativos que se abocan a la aplicación y seguimiento de la normatividad ecológica y al desarrollo de programas y proyectos de tipo ambiental. En el caso del Distrito Federal y la Zona Conurbana se han creado:

- Comisión para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en la Zona Metropolitana del Valle de México (8 de enero 1992), misma que desapareció en 1996.
- Comisión Ambiental Metropolitana (establecida mediante el Convenio de Coordinación del 17 de septiembre 1996 para reemplazar a la comisión anterior). Esta Comisión está destinada a definir, coordinar y dar seguimiento a las políticas, programas, proyectos y acciones en materia de protección al ambiente y preservación y restauración del equilibrio ecológico en la ZMCM.
- *Ley ambiental del Distrito Federal* (1° de julio 1996), que "tiene por objeto regular la protección del ambiente, así como la prevención y control de la contaminación, la restauración y conservación ecológica del Distrito Federal".
- *Ley de desarrollo urbano del Distrito Federal* (23 de diciembre 1995), que persigue, entre otros aspectos: fijar las normas básicas para planear la fundación, desarrollo, mejoramiento, crecimiento y conservación de los centros de población; determinar los usos del suelo, su clasificación y zonificación; establecer las normas y principios básicos para el desarrollo urbano.
- *Ley de protección al ambiente para el desarrollo sustentable del Estado de México* (febrero, 1998) con la que se deroga la anterior Ley de protección al ambiente del Estado de México.

### Conciencia pública y política

La popularización de la tecnología del Biogás debe ir de mano en mano con la construcción de plantas en el campo. Sin la conciencia pública sobre la tecnología del biogás, sus beneficios y desventajas, no habrá sustento suficiente para diseminar la tecnología del biogás a nivel base. Al mismo tiempo, la conciencia dentro del gobierno es esencial. Dado que los impactos y aspectos de la tecnología del biogás involucran tantas instituciones gubernamentales (por ejemplo, agricultura, ambiente, energía, economía), es necesario identificar e incluir a todos los departamentos de gobierno responsables del proceso de diseminación y surgimiento de conciencia.

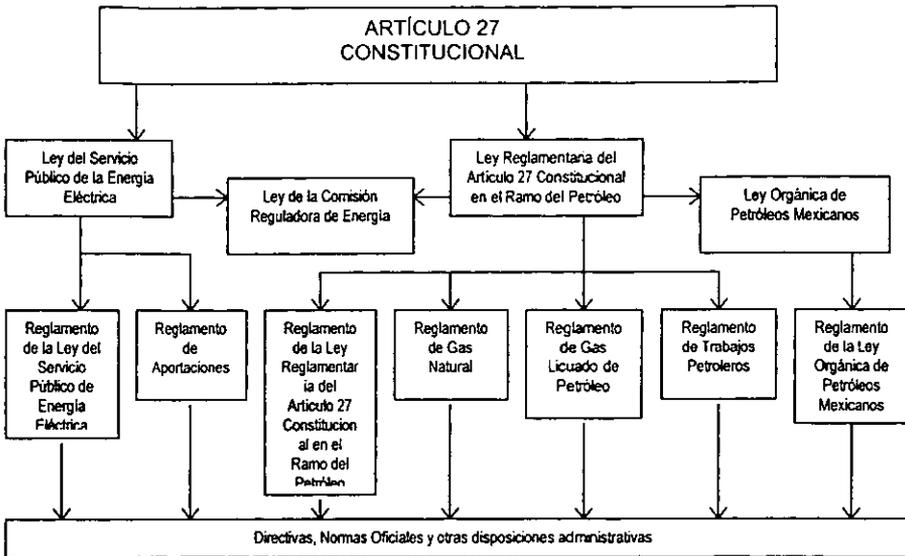
### **Marco legal e Institucional del Sector Energético<sup>43</sup>**

La estructura del sector energético nacional responde a lo dispuesto por los artículos 25, 27 y 28 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. El mandato constitucional establece, en primer lugar, que corresponde exclusivamente a la Nación el dominio directo del petróleo y de todos los carburos de hidrógeno sólidos, líquidos o gaseosos. En segundo lugar, la Nación dispone de la facultad exclusiva para generar, conducir, transformar, distribuir y abastecer energía eléctrica que tenga por objeto la prestación de servicio público, así como el aprovechamiento de los combustibles nucleares para la generación de energía nuclear y la regulación de sus aplicaciones para otros propósitos. En tercer lugar, el texto constitucional marca una diferencia entre las áreas estratégicas, aquellas funciones exclusivas del Estado que no

constituyen monopolio, y las actividades de carácter prioritario para el desarrollo, actividades donde el Estado puede participar por sí mismo o en conjunto con los sectores privado y social, manteniendo la rectoría y otorgando concesiones o permisos. Los ejemplos de las primeras áreas en el sector energético son el petróleo y los demás hidrocarburos, la petroquímica básica, los minerales radioactivos, la electricidad y la generación de energía nuclear. Finalmente, la Constitución dicta que el Estado contará con los organismos y empresas que requiera para el eficaz manejo tanto de las áreas estratégicas, como de las actividades de carácter prioritario.

A partir de lo dispuesto en el artículo 27 constitucional, y en atención a lo establecido en los artículos 25 y 28, se derivan las leyes secundarias, reglamentos, directivas y normas oficiales que regulan la actividad dentro del sector energético mexicano. En la siguiente figura se ilustra el marco jurídico consecuente con los subsectores eléctrico y de hidrocarburos.

### Marco Jurídico del Sector Eléctrico y de Hidrocarburos



#### A. Papel del sector público

1) **Secretaría de Energía (SE):** En atención al texto constitucional, la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal deposita en la Secretaría de Energía el ejercicio de los derechos de la Nación en materia energética y la conducción de la política energética nacional. En su labor, la SE promueve la participación de los particulares en los términos de las disposiciones legales aplicables y, en su carácter de coordinadora del sector energético, conduce la actividad de las entidades paraestatales, en las que preside sus Consejos de Administración y establece, junto con las entidades y la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) la propuesta de presupuesto que se presenta al Congreso de la Unión. Asimismo, propone la política de tarifas y precios de combustibles que son finalmente aprobadas por la SHCP.

La política energética de México está encaminada a construir un sector cada vez más dinámico y fuerte, que impulse el crecimiento económico sostenido del país y permita a las empresas mexicanas operar con éxito en una economía cada vez más competitiva y globalizada.

El papel que desempeña la Secretaría de Energía, como coordinadora sectorial, es de suma importancia ya que permite:

- i. **Asegurar la coherencia de la política energética nacional:** Los organismos del sector, en particular PEMEX, Comisión Federal de Electricidad y Luz y Fuerza del Centro, tienen intereses y objetivos propios que deben ser conciliados dentro de una misma política energética coherente.
- ii. **Planificar de manera metódica el desarrollo del sector:** La Secretaría de Energía cumple una función central al garantizar que la información que se produzca y procese por las empresas del sector sea compatible y uniforme, utilizando los mismos métodos y supuestos, de tal forma que pueda ser de utilidad para la planeación de todo el sector.
- iii. **Optimizar el uso de las reservas energéticas de la nación a largo plazo:** La Secretaría de Energía tiene la misión de proteger y asegurar que los intereses de la nación sobre sus recursos naturales prevalezcan sobre cualquier otro. En ausencia de un organismo coordinador que hiciera cumplir las normas aplicables, las empresas del sector podrían optar por dar prioridad a sus intereses de corto plazo y desempeño empresarial, pudiendo llegar a comprometer el potencial energético del país, y por ende el de la economía nacional en el largo plazo.
- iv. **Aplicar un marco regulatorio transparente y predecible que facilite condiciones de competencia y de rentabilidad en el sector, así como límites claros a la actuación de las autoridades:** El marco jurídico y regulatorio que requiere el sector energético debe satisfacer las siguientes condiciones:
  - + Garantizar la rectoría del Estado en el sector, la cual se debe traducir en una planeación integral y coordinación eficiente entre los distintos participantes, públicos y privados.
  - + Brindar seguridad jurídica a las inversiones del sector privado a través de una clara definición de sus derechos de propiedad y la garantía de la aplicación de reglas iguales para todos los participantes.
  - + Promover la apertura al sector privado en las áreas donde sea técnicamente posible y deseable en términos de mayor eficiencia económica y liberación de recursos públicos.

La Secretaría de Energía, en su papel de coordinadora sectorial, es la institución que puede aplicar un marco regulatorio como el descrito y garantizar la interrelación sana de las autoridades con las entidades y el sector privado.

**2) Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) y Secretaría de Contraloría y Desarrollo Administrativo (SECODAM):** La SHCP y la SECODAM participan en tres niveles dentro del sector energético. En primer lugar, coordinan la formulación del presupuesto y los programas de las entidades del sector; en segundo término, supervisan la ejecución de proyectos y actividades autorizadas por el Congreso de la Unión; y finalmente, evalúan resultados administrativos a través de informes y de la cuenta pública. La SHCP tiene además las siguientes facultades: (1) tener presencia en los órganos de gobierno y en los comités técnicos de las entidades paraestatales; (2) emitir lineamientos generales de operación de las entidades paraestatales y supervisar su observancia; (3) elaborar la política de endeudamiento del sector y autorizar la suscripción de créditos externos; (4) autorizar las operaciones en que se haga uso del crédito público; (5) establecer y revisar los precios y tarifas de los bienes y servicios de las entidades; (6) vigilar el cumplimiento de las obligaciones en materia de planeación nacional, así como de programación, presupuestación, contabilidad y evaluación; y (7) establecer el régimen fiscal de las paraestatales.

**3) Comisión Reguladora de Energía (CRE):** La Ley de la Comisión Reguladora de Energía, expedida en 1995, transformó a la CRE de un órgano puramente consultivo en materia de electricidad (como lo estableció su decreto de creación de 1993) a un órgano desconcentrado, dotado con autonomía técnica y operativa, encargado de la regulación de las industrias eléctrica, de gas natural y las actividades de gas LP llevadas a cabo por ducto. Asimismo, dicho ordenamiento amplió las facultades de la Comisión y concentró en ella atribuciones que antes se encontraban dispersas en otras dependencias. Entre las más importantes se encuentran: el otorgamiento de permisos para Productores Independientes de Energía, la aprobación de convenios o modelos de contratos de adhesión en materia de regulación, la aprobación de la metodología para determinar las contraprestaciones por la compra de excedentes de energía a cogeneradores y autoabastecedores, y la inspección y vigilancia de las disposiciones en materia de regulación.

**4) Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CONASENUSA):** La CONASENUSA es un órgano desconcentrado de la SE responsable de asesorar y vigilar el cumplimiento de las normas en materia nuclear, radiológica, física, de salvaguardias y administrativas en las instalaciones en las que se realicen actividades con tecnología altamente especializada, que involucren el uso de materiales y combustibles nucleares y radiactivos. Asimismo, vigila el confinamiento de materiales radioactivos. Para cumplir con sus objetivos, la CONASENUSA realiza actividades de inspección, auditoría, verificación y reconocimiento, y lleva el seguimiento de las deficiencias que detecta, con la facultad de dictar sanciones administrativas.

**5) Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE):** La CONAE fue creada por Acuerdo Presidencial en 1989, y mediante Decreto Presidencial, el 20 de septiembre de 1999 se constituyó como órgano desconcentrado de la SE. Funge como órgano técnico de consulta de las dependencias y entidades de la administración pública federal y, cuando así lo soliciten, de los gobiernos de las entidades federativas, de los municipios y los particulares, en materia de ahorro y uso eficiente de energía. También participa en el aprovechamiento de energías renovables.

**6) Instituto Mexicano del Petróleo (IMP):** El IMP es un organismo descentralizado con personalidad jurídica y patrimonio propio. Su objeto es la investigación, el desarrollo tecnológico y la prestación de servicios técnicos, así como el desarrollo de los recursos humanos al servicio de las industrias petrolera, petroquímica y química.

**7) Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE):** El IIE fue creado como un organismo público descentralizado de carácter científico y tecnológico, con personalidad jurídica y patrimonio propio. Tiene como objeto promover y apoyar la innovación tecnológica en el sector eléctrico, así como de sus proveedores y usuarios, mediante la investigación aplicada, el desarrollo tecnológico y servicios técnicos especializados.

**8) Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ):** El ININ es un organismo público descentralizado con personalidad jurídica y patrimonio propio. Su objeto es la investigación y desarrollo de las ciencias y tecnologías nucleares. Promueve los usos pacíficos de la energía nuclear y difunde los avances alcanzados para vincularlos al desarrollo económico, social, científico y tecnológico del país.

## **B. El sector paraestatal energético**

**1) Petróleos Mexicanos (PEMEX):** PEMEX es una empresa pública, con personalidad jurídica y patrimonio propio, que tiene por objeto ejercer la conducción central y la dirección estratégica de todas las actividades que abarca la industria petrolera en los términos de la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo. En julio de 1992 entró en vigor la Ley Orgánica de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios, a partir de la cual se constituyeron los cuatro organismos descentralizados de carácter técnico, industrial y comercial, coordinados por un corporativo, que se describen a continuación:

- + **PEMEX - Exploración y Producción** es el organismo encargado de la exploración y explotación de los yacimientos de petróleo y gas natural, así como de su transporte, almacenamiento en terminales y comercialización;
- + **PEMEX - Refinación** lleva a cabo los procesos industriales de la refinación; elabora productos petrolíferos y derivados del petróleo que sean susceptibles de servir como materias primas industriales básicas. Asimismo, almacena, transporta, distribuye y comercializa los productos derivados mencionados;
- + **PEMEX - Gas y Petroquímica Básica** realiza el procesamiento del gas natural y sus líquidos, así como el transporte, comercialización y almacenamiento de los productos obtenidos. Por medio del endulzamiento, recuperación de licuables y fraccionamiento se obtiene gas natural seco, etano, propano, butano, gasolinas naturales y azufre; y
- + **PEMEX - Petroquímica** realiza procesos industriales petroquímicos - cuyos productos no forman parte de la industria petroquímica básica, así como su almacenamiento, distribución y comercialización.

**2) Comisión Federal de Electricidad (CFE):** La CFE es una empresa pública, con personalidad jurídica y patrimonio propio, creada el 20 de enero de 1934. Su objeto es organizar y dirigir el sistema nacional de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, basando su operación en principios técnicos y económicos, sin propósito de lucro. CFE genera el 98% de la electricidad nacional, además de transmitir y distribuir el 91%. Al interior de CFE existe un organismo denominado Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), el cual tiene a su cargo el despacho de la energía eléctrica. Esta función consiste en controlar y dirigir los flujos de energía eléctrica entre las centrales de generación y los centros de consumo.

**3) Luz y Fuerza del Centro (LFC):** LFC se creó el 9 de febrero de 1994 por Decreto Presidencial. Su objeto es la prestación del servicio público de energía eléctrica, principalmente en materia de distribución, en la región central del país, que abarca el Distrito Federal y parte de los Estados de México, Morelos, Puebla e Hidalgo. Para cumplir este fin cuenta con personalidad jurídica y patrimonio propio. Es principalmente una empresa distribuidora de energía.

### **C. Papel del sector privado**

**1) Transporte, almacenamiento y distribución de gas natural:** La reforma de 1995 a la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo abrió la posibilidad de que el sector privado construyera, operara y tuviera en propiedad sistemas de transporte, distribución y almacenamiento de gas natural, actividades previamente reservadas a Petróleos Mexicanos. Asimismo, permitió que el sector privado realizara actividades de importación, exportación y comercialización del combustible.

**2) PIE's, cogeneración, autoabastecimiento, pequeña producción, importación y exportación:** La reforma a la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE) de 1992 permite la participación del sector privado en la generación de electricidad en las siguientes modalidades, mismas que no constituyen un servicio público:

- + **Producción Independiente de Energía Eléctrica (PIE).**<sup>27</sup> Producción de energía eléctrica destinada a la venta a CFE, quedando ésta obligada a adquirirla en los términos y condiciones que se convengan. A partir de 1998 toda nueva central de generación se ha construido bajo este esquema.
- + **Cogeneración.** Generación de energía eléctrica producida simultáneamente con vapor u otro tipo de energía térmica secundaria para ser usada en un proceso industrial, o bien generación de energía eléctrica a partir de calor residual de los procesos industriales;
- + **Autoabastecimiento.** Producción de energía eléctrica destinada a la satisfacción de necesidades propias de las personas físicas o morales que la producen;
- + **Pequeña Producción.** Generación de una capacidad menor a 30 MW destinada en su totalidad a la venta a CFE;
- + **Importación de energía eléctrica** destinada exclusivamente al abastecimiento para usos propios; y
- + **Exportación de energía eléctrica** derivada de cogeneración, producción independiente y pequeña producción. Tanto la importación, como la exportación de energía eléctrica son actividades que también puede llevar a cabo CFE.

**3) Petroquímica no básica:** En 1996, se modificó la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo, esta Ley define claramente cuales son los petroquímicos básicos y los no básicos, aun cuando esta división es artificial y única en el mundo, pues no existe un criterio técnico general que la fundamente. La reforma permitió al sector privado invertir hasta en un 100 por ciento en nuevas plantas productoras de petroquímicos no básicos. En el mismo proceso legislativo, el Congreso de la Unión recomendó que el Estado mexicano conservara el control de las subsidiarias de PEMEX - Petroquímica, permitiendo al sector privado participar hasta de un 49 por ciento del capital social de las empresas existentes. Dichas empresas fueron desincorporadas del régimen del dominio público de la Federación.

---

<sup>27</sup> Para efectos prácticos, se emplean los términos *Producción Independiente de Energía, PIE, o IPP* por sus siglas en inglés (*Independent Power Producer*) de manera indistinta para referirse a este tipo de proyectos.

4) **Gas LP:** Si bien la industria de gas LP goza desde 1950 de un marco regulatorio que permite la participación privada en las tareas de distribución, a lo largo de 1999 se llevaron a cabo acciones legislativas a fin de establecer una nueva organización en esta industria. En junio de dicho año se expidió el Reglamento de Gas Licuado de Petróleo que divide a la industria en los siguientes cuatro segmentos: venta de primera mano, transporte, almacenamiento y distribución. De conformidad con el nuevo marco legal, Pemex concentrará sus recursos en la venta de primera mano, el transporte por ductos y la operación de sus plantas de suministro, al tiempo que el sector privado, nacional y extranjero, podrá participar en el transporte por ductos u otros medios y el almacenamiento. Finalmente, será capacidad exclusiva del sector privado nacional participar en la distribución de este hidrocarburo.

5) **Como contratistas y desarrolladores:** El sector privado participa en el sector energético como contratista para la realización de obras de infraestructura, vale la pena mencionar el esquema utilizado para construir una planta de nitrógeno en Cantarell donde las empresas participantes firman un contrato a largo plazo para suministrar nitrógeno a PEMEX, figura similar a los PIE's de electricidad. El sector privado también presta servicios diversos a las distintas empresas del sector y su participación se lleva a cabo de conformidad con la Ley de Adquisiciones, Arrendamientos y Servicios del Sector Público, así como con los ordenamientos jurídicos correspondientes. La SECODAM supervisa dicha participación conforme lo marca la ley.

### **Actividades del sector privado**

a) **Acciones realizadas:** Ante la escasez de los recursos presupuestales, en 1992 se adecuó la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE) para incorporar una mayor participación privada en la generación de electricidad. Entre los esquemas de inversión abiertos a la inversión privada se tienen los de cogeneración, autoabastecimiento y producción independiente. Asimismo, los particulares pueden participar en las actividades de exportación e importación de electricidad para usos propios.

A través de estos esquemas se incrementa la capacidad instalada en el Sistema Eléctrico Nacional. En el caso de los proyectos de producción independiente, la electricidad generada se destina en su totalidad a la Comisión Federal de Electricidad, para la prestación del servicio público de energía eléctrica. Por su parte, los proyectos privados para autoconsumo (cogeneración y autoabastecimiento), permiten a CFE liberar parte de su capacidad para la prestación del servicio público.

b) **Permisos otorgados:** De 1994 a junio de 2000, se otorgaron 169 permisos bajo las modalidades previstas por la LSPEE, de los cuales 162 se encuentran vigentes, con una capacidad total de 11,173.9 MW.

#### **Permisos Otorgados 1994-2000**

<b>Modalidad</b>	<b>Número de permisos</b>	<b>Capacidad (MW)</b>	<b>Energía (GWh/año)</b>	<b>Inversión (millones de dólares)</b>
<b>Autoabastecimiento</b>	115	4,710.6	25,774.1	3,487.0
<b>Cogeneración</b>	31	2,104.3	12,381.1	1,085.3
<b>Producción Independiente</b>	9	4,091.2	27,758.0	1,997.6
<b>Exportación</b>	1	257.6	2,119.1	116.0
<b>Importación</b>	6	10.2	57.4	2.6
<b>Total</b>	<b>162</b>	<b>11,173.9</b>	<b>65,970.6</b>	<b>6,688.5</b>

Fuente: Comisión Reguladora de Energía

Si se excluye de este total los permisos correspondientes a plantas de PEMEX (1,733 MW), así como a los proyectos de producción independiente (4,091 MW), se observa que los permisos otorgados para proyectos privados nuevos alcanzan 4,774 MW. Sin embargo, de éstos sólo se encuentran en operación 35 plantas, con una capacidad total de 329 MW.

c) **Problemática:** A pesar de los avances alcanzados en materia de apertura y fomento a la inversión privada en generación, la participación privada no se ha detonado como se esperaba debido principalmente a los siguientes factores:

- + **Límite de compra de capacidad (20 MW).** De acuerdo con el marco legal vigente, la CFE tiene la posibilidad de comprar capacidad y energía proveniente de proyectos privados --sin licitación-- hasta por un límite máximo de 20 MW. En la práctica, CFE sólo paga una fracción de sus costos variables por la energía recibida, lo que no resulta atractivo a los inversionistas privados.
- + **Inexistencia de un mercado de electricidad.** Debido a que la LSPEE no permite la compraventa de electricidad entre particulares, los proyectos de cogeneración y autoabastecimiento no pueden comercializar libremente sus excedentes eléctricos. Esta situación, aunada al hecho de que las tecnologías actuales determinan ciertos tamaños óptimos de turbinas, obliga a los desarrolladores a agregar cargas para minimizar los excedentes. Sin embargo, esta tarea resulta sumamente intensiva en tiempo y no siempre realizable técnicamente. Con el establecimiento de un mercado eléctrico se abriría la opción de vender la electricidad que no consuma el proyecto a precios competitivos.
- + **Falta de información sobre costos de generación de CFE.** Adicionalmente, los inversionistas carecen de información específica sobre la determinación de los costos marginales regionales de generación de la CFE, elemento fundamental para la decisión de inversión.

d) **Potencial de cogeneración e hidroelectricidad:** Se estima que el potencial de cogeneración del sector industrial fluctúa entre los 5,200 y 9,750 MW. Por su parte, el elevado nivel de consumo de vapor empleado en los procesos de PEMEX podría dar lugar a un potencial aproximado de cogeneración de hasta 10,000 MW de capacidad en esta empresa, con lo que se podrían aprovechar economías de escala en la producción conjunta de energía térmica y electricidad. La cogeneración en PEMEX Refinación, PEMEX Gas y Petroquímica Básica y PEMEX Petroquímica, permitiría a estas empresas obtener elevados índices de ahorro energético, reducir significativamente sus costos de operación y mejorar sus procesos de operación con un mínimo impacto ambiental. Asimismo, existe un potencial hidroeléctrico identificado de 43,000 MW, que ofrece grandes oportunidades a la inversión privada, a través de esquemas de autoabastecimiento.

### ***Política ambiental***

Uno de los principales objetivos de la política energética nacional es aprovechar al máximo la riqueza en recursos energéticos con que cuenta el país, utilizando un criterio de desarrollo sustentable. Esto implica controlar y reducir al mínimo posible el impacto sobre el ambiente de las distintas actividades y procesos resultado de la operación de los subsectores eléctrico y de hidrocarburos, la cual ha sido descrita en las dos secciones previas.

Por lo anterior, se ha desarrollado una política ambiental que enmarca las actividades operativas del sector energético mexicano, y que plantea mecanismos encaminados a garantizar el consumo racional de los recursos naturales y el equilibrio ambiental en el largo plazo.

1) **Energía, sustentabilidad y medio ambiente:** Como se ha mencionado, la energía es esencial para impulsar el desarrollo económico y social del país y mejorar el nivel de vida de su población. Sin embargo, el proceso de generación de energía puede volverse insostenible de no cuidarse su impacto ambiental. Esto es motivo de creciente preocupación en el ámbito mundial, debido a la interrelación que existe entre los ecosistemas de todo el planeta. En particular, la quema de combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural implica emisiones de gases hacia la atmósfera, como el CO<sub>2</sub>, que tienen un efecto invernadero y presumiblemente el fenómeno de cambio climático. El Gobierno Federal está comprometido a llevar a cabo la política de energía con base en los principios de desarrollo sustentable. Las tres principales estrategias en este sentido son:

- + El monitoreo y control constantes del impacto ambiental generado por el sector energético;
- + Una política de ahorro y uso eficiente de la energía, y
- + Una promoción del uso de fuentes de energía alternativas (i.e. energía solar y eólica).

En este sentido, es necesario establecer esquemas más eficientes para producir, transportar, distribuir y consumir energía, así como aplicar tecnologías que permitan controlar la emisión a la atmósfera de sustancias contaminantes y gases efecto invernadero. Por otro lado, se debe fomentar la expansión de fuentes de energía renovables que contribuyan a un desarrollo más sustentable y racionalizar el uso de la energía que se genera actualmente.

México, por convicción propia y como parte de la concertación internacional sobre el tema ambiental, ha tomado una serie de medidas que conducirán en el mediano plazo a la operación de un sistema energético moderno y eficaz entre las que destacan:

- + Programa de mejoramiento de la calidad de los combustibles fósiles mediante la reconfiguración y modernización del sistema nacional de refinerías.
- + Ampliación del espectro de oferta de combustibles automotrices para incluir productos como el gas natural comprimido, cuyo impacto ambiental es menor al de las gasolinas. En el caso del gas LP, existe evidencia de que los motores de vehículos adaptados de fábrica a la carburación con este combustible, tienen emisiones comparables a las de motores a gasolina.
- + Programa de ampliación y modernización del sector eléctrico basado principalmente en la utilización de gas natural para la generación eléctrica.
- + Fomento al uso doméstico e industrial del gas natural mediante la ampliación concesionada de las redes de distribución en los principales centros de consumo.
- + Establecimiento de normas ambientales obligatorias que limitan la emisión de contaminantes a la atmósfera y las especificaciones mínimas de combustibles fósiles líquidos y gaseosos.
- + Fijación de normas específicas para incrementar la eficiencia de motores industriales y aparatos electrodomésticos.
- + Establecimiento de políticas de ahorro y uso eficiente de energía y creación de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía. Cabe destacar la importancia en este rubro de la instrumentación del Horario de Verano.
- + Desarrollo de instrumentos para la optimización integral de las políticas de energía, economía y medio ambiente y la cuantificación del impacto de políticas energéticas en la actividad económica y en el nivel de emisión de gases efecto invernadero.
- + Fomento a la utilización de sistemas de energía renovable en generación de electricidad y en comunidades aisladas, como antecedente para una utilización más generalizada de este tipo de energía.
- + Promoción del uso de sistemas de cogeneración para incrementar la eficiencia de utilización de combustibles en la industria.

**c) Cumplimiento de Normas Ecológicas:** En materia de Normas Ecológicas, PEMEX ha tenido un desempeño satisfactorio cumpliendo con las siguientes: NOM-052 y NOM-053 relativas a residuos peligrosos, NOM-001 sobre calidad de aguas residuales, NOM-015 sobre perforación de pozos petroleros, NOM-085 sobre contaminación atmosférica-fuentes fijas, NOM-075 relativa a compuestos orgánicos volátiles y con la calidad de las gasolinas especificada en la NOM-086. La PROFEPA le ha otorgado diversos certificados de industria limpia a las filiales de PEMEX.

Por su parte la Comisión Federal de Electricidad y Luz y Fuerza del Centro han cumplido con la NOM-052, NOM-053, NOM-085, NOM-001, NOM-043 relativas a la emisión de partículas sólidas, y la NOM-113 y NOM-114 relativas a subestaciones eléctricas y líneas de transmisión y subtransmisión eléctrica. Asimismo, la CFE cuenta con siete certificaciones ISO-14001 para algunas centrales termoeléctricas y una hidroeléctrica.

**3) Política ambiental en el ámbito internacional:** En 1992 se celebró la Convención Marco sobre Cambio Climático. Los países signatarios de esta Convención fueron divididos en tres grupos en función de su capacidad para cumplir con los acuerdos de la misma. El primer grupo, llamado Anexo I, está constituido por países miembros de la OCDE y aquellos en transición a economías de mercado (ex países de la Unión Soviética y de Europa del Este); En el segundo grupo, Anexo II, están los países del Anexo I que deberán prestar ayuda económica y tecnológica a países con menores recursos. El tercer grupo, Países No Incluidos en Anexo I, se compone de aquellos países en vías de desarrollo cuyo compromiso se reduce a realizar y

publicar inventarios de emisiones. Los países industrializados acordaron reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero, GEI (Países Anexo 1). Los países en vías de desarrollo sólo se obligaron a realizar inventarios de los GEI, así como estudios de vulnerabilidad y mitigación (Países No Incluidos en Anexo 1).

En 1997 se definió un protocolo con compromisos legales de reducción de emisiones y mecanismos flexibles para facilitar su cumplimiento, denominado Protocolo de Kyoto, en el que se establece que los países desarrollados deberán reducir emisiones a un nivel absoluto inferior al de 1990 (5.2% en promedio) para el año 2012. Los países en vías de desarrollo no tienen compromisos cuantitativos de reducción de emisiones, de acuerdo con la Regla de Oro de la Convención relativa a compromisos comunes pero diferenciados.

México, como País No Incluido en Anexo I, no tiene compromisos que cumplir con metas preestablecidas de emisiones al ambiente, sin embargo, ha instrumentado estrategias de mitigación de acuerdo a sus posibilidades tecnológicas y económicas. México se clasifica en 14º lugar entre los países con mayores emisiones de gases de efecto invernadero a escala mundial. En 1990, contribuyó aproximadamente con 2% de las emisiones globales, produciendo 4.1 toneladas de bióxido de carbono per cápita. México se encuentra en una situación delicada, debido a que es el único miembro de la OCDE que no es parte del Anexo 1 de la Convención.

El Gobierno Federal integró en 1997 un Comité Intersecretarial coordinado por la SEMARNAP a la luz de las obligaciones asumidas en el marco de la Convención y elaboró una propuesta de estrategia nacional de Acción Climática, integrando acciones de mitigación iniciadas o previstas en los diversos programas sectoriales para disminuir el ritmo de crecimiento de emisiones netas de gases, sin limitar o comprometer el proceso de desarrollo nacional. Con fecha 28 de abril de 2000, la Cámara de Senadores aprobó, mediante dictamen, el Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático del 11 de diciembre de 1997. Con ello, México busca estar en condiciones de beneficiarse de las oportunidades derivadas de los mecanismos establecidos por el Protocolo de Kyoto (v. gr., la instrumentación conjunta de políticas entre países del Anexo 1 y la creación de un mercado internacional de certificados de reducción de emisiones y mecanismos de desarrollo limpio). Estos mecanismos serán discutidos en reuniones próximas a celebrarse en Lyon, Francia, en septiembre de 2000 y en La Haya, Holanda, en noviembre de 2000.

La Secretaría de Energía ha adoptado como posición que las actividades conjuntas en materia ambiental, sean estas bilaterales o multilaterales, se traten únicamente en los foros creados para tal efecto (v. gr., Convención Marco de Cambio Climático). Esto con el fin de mantener las negociaciones en un solo frente y evitar el desgaste que significaría negociar posiciones en todos los foros internacionales.

## **Capítulo 5**

### **PROPUESTA DEL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA DE BIOGÁS EN EL DISTRITO FEDERAL**

## ***Desarrollo del Proyecto***

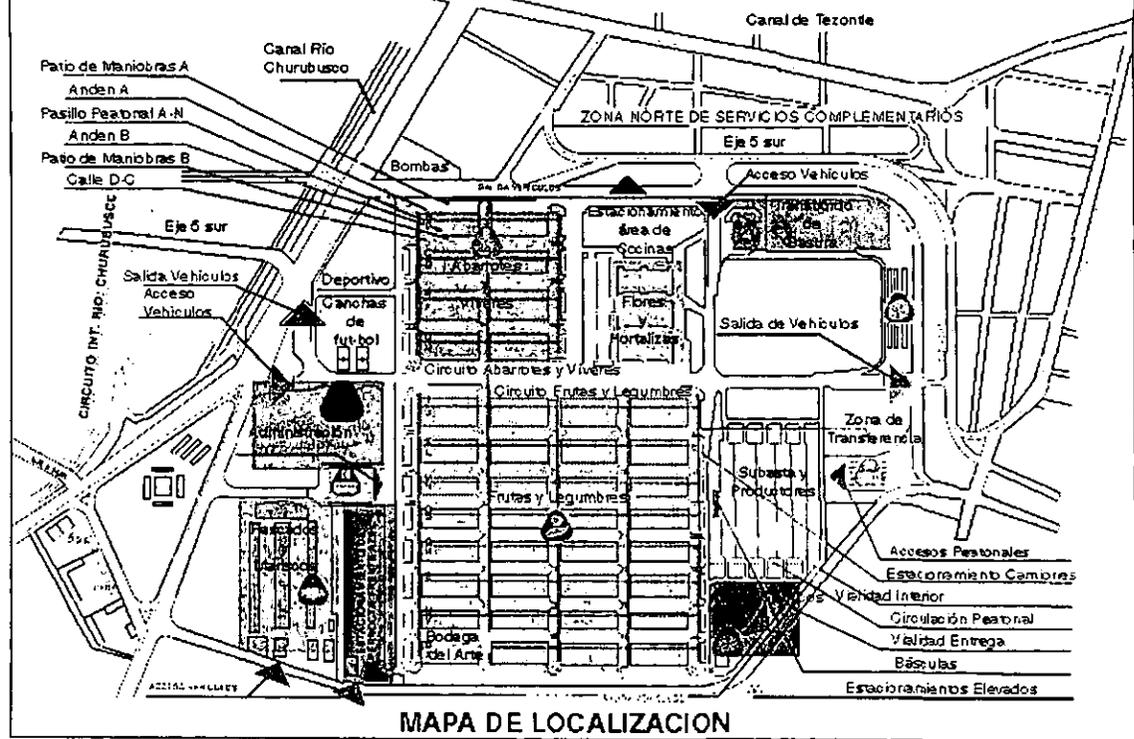
Para poder realizar la ingeniería conceptual de una planta de biogás primero se deben de tener claros los conceptos básicos, que ya se explicaron en los capítulos anteriores, además de saber qué aplicación se le dará al biogás.

Los siguientes factores a considerar con los que se cuenta son la ubicación de la planta, así como el tipo de sustrato y sus constituyentes, las facilidades para obtenerlo y su transportación hacia la alimentación del digestor, en este caso, dado que no se cuenta con un estudio sobre los constituyentes y las características específicas de la basura en México, se adaptaron los datos de los Estados Unidos<sup>44</sup> sin embargo, es necesario elaborar un estudio previo sobre este punto para obtener un diseño más preciso de la planta de biogás.

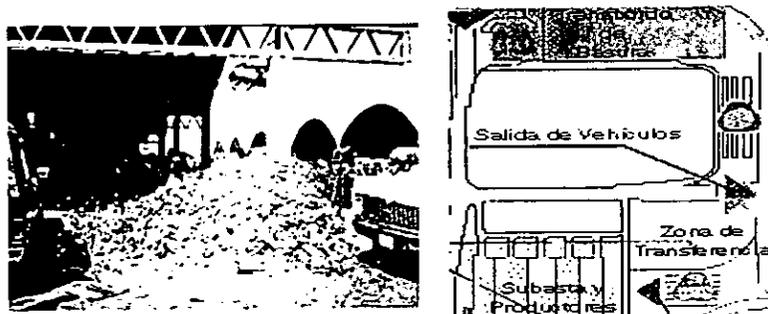
## ***Localización***

Dicha planta se ubicará en la Central de Abastos del Distrito Federal la cual ofrece una capacidad de alimentación al digestor de hasta 800ton/día de material orgánico teniendo como sustrato principal desperdicios de verduras, frutas, papel, cartón, y carne, entre otros. En cuanto al uso ya se ha mencionado que se aplicará la obtención de biogás para la generación de energía eléctrica.

# FIDEICOMISO CENTRAL DE ABASTO CIUDAD DE MEXICO



Dentro de la Central de Abasto el área dónde se podría ubicar la planta de biogás, como se muestra en la siguiente figura, es al lado de la zona de trasbordo de basura pues aquí la alimentación del sustrato es cercana y se cuenta con un área al aire libre lo suficientemente amplia que por su ubicación permitiría evitar un desastre de gran magnitud aunque, ya que se trata de un estacionamiento, se recomienda aislar la zona para reducir el riesgo de accidentes (se sugiere la construcción de un cerco).



La construcción, en su aspecto legal, no debe de representar ningún problema aunque de cualquier manera es necesario que se revisen los reglamentos de Protección Civil, así como los correspondientes al resto de los organismos responsables de este tipo de proyectos al tratarse de la producción de un gas combustible.

### Condiciones

En los capítulos anteriores se plantearon las condiciones óptimas de operación para la producción del biogás en la Central de Abastos del Distrito Federal, ubicada en la delegación Iztapalapa; pero las condiciones y facilidades reales son las siguientes:

Sede: Iztapalapa, Latitud Norte 19, Longitud Oeste 21, Altitud 2,240 msnm (metros sobre nivel del mar), Grados 99, Minutos 06.

FUENTE: INEGI. Carta Topográfica, 1:50 000.

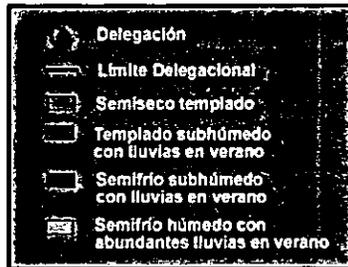
#### Clima:

El Distrito Federal cuenta con cuatro tipos de clima:

- ⊕ **Templado subhúmedo (C(w))**: ocupa más de la mitad de la superficie, con lluvias en verano, se caracteriza por presentar una temperatura media anual que varía de 12° a 18° C, su grado de humedad es intermedio y tiene una temporada lluviosa en verano, la precipitación total anual se encuentra en un rango de menos de 600 mm en el noroeste a menos de 1500 mm en la porción occidental.
- ⊕ **Semifrío subhúmedo (C(E)(w))**: se localiza hacia el sur y suroeste del Distrito Federal, con lluvias en verano; su grado de humedad es alto y tiene una temporada lluviosa en verano; mantiene temperaturas anuales entre 5° y 12° C y su precipitación total anual se encuentra en un rango de 1200 a menos de 1500 mm.
- ⊕ **Semifrío húmedo (C(E)(m))**: se localiza hacia el sureste del Distrito Federal, con abundantes lluvias en verano; se considera la región más húmeda de la capital. En esta zona se presentan temperaturas medias anuales entre los 5° y los 12° C y una precipitación total anual en un rango mayor a 1200mm al año.
- ⊕ **Semiseco templado (BS1k)**: localizado hacia la zona noreste y tiene como límite el Vaso de Texcoco, ocupando solo 10% del territorio, con lluvias en verano, temperaturas medias anuales entre 12° y 13° C, y una precipitación total anual menor de 600 mm.

MEXICO

MEXICO



MEXICO

MEXICO

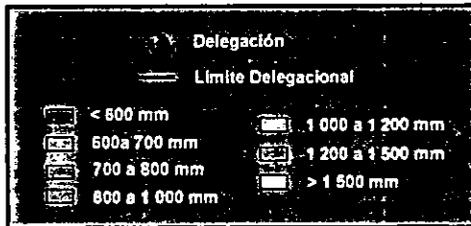
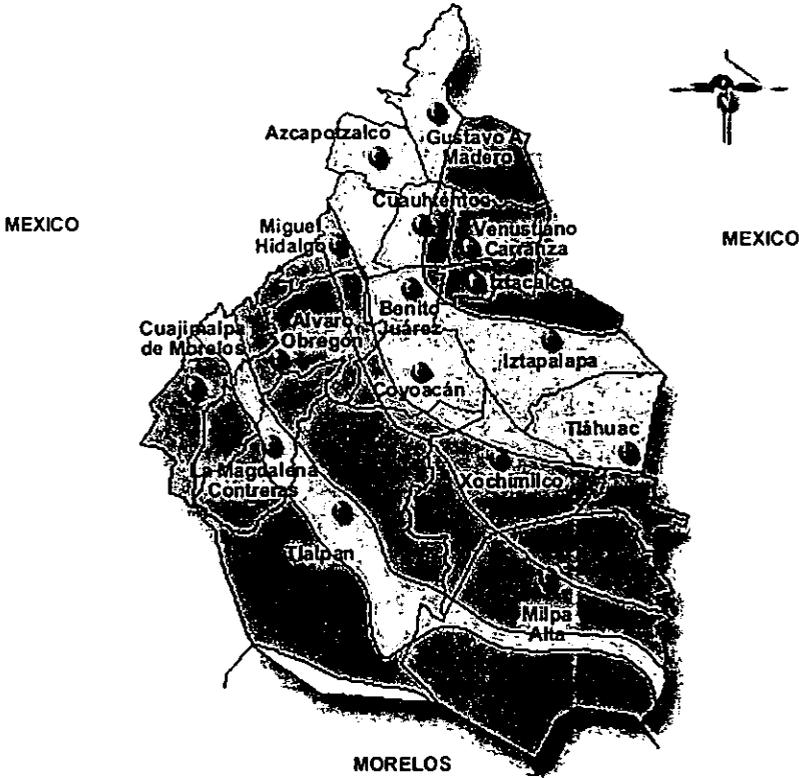


### ISOTERMAS

Las llamadas isotermas, son líneas que unen puntos que tienen igual temperatura media anual, se muestran a manera de curvas con valores en grados centígrados. Las isotermas menores, presentes en el mapa del Distrito Federal, son las de 8° y 10°C, ambas ubicadas en la porción sur y oeste, dentro de las Sierras Volcánicas, incluyendo al cerro La Cruz del Marqués, mejor conocido como El Ajusco. La temperatura se

incrementa en el centro del territorio, mientras que la isoterma mayor representada es la de 16°C, presente al norte del Distrito Federal, dentro del área urbana de la Ciudad de México.

### Precipitación media anual



## ISOYETAS

Las isoyetas son conocidas como las líneas que delimitan zonas con igual registro de precipitación, reportadas en milímetros. En el Distrito Federal, el rango que se tiene para los valores de isoyetas abarca menores de 600 a mayores de 1 500 mm, que lo ubican como una de las entidades con características de precipitación moderada. En el mapa se aprecia un patrón de distribución ascendente para las isoyetas de nordeste a suroeste, lo que coincide de manera general con las partes bajas y más elevadas del territorio, respectivamente, asimismo con los climas, siendo las características del clima semiseco para las zonas más urbanizadas y templado subhúmedo para las partes de mayor elevación.

### Selección de Tecnología

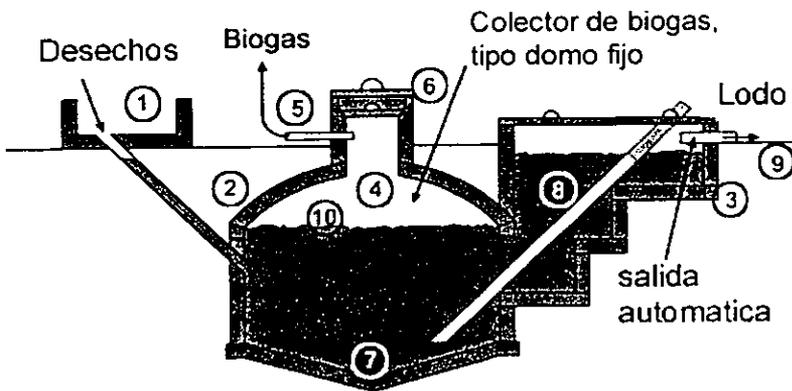
Existen muchos diseños y formas para calcular una planta de biogás; el presente trabajo abarcará sólo la ingeniería básica ya que, tratándose de la ingeniería de detalle, es recomendable que la realice un especialista debido a la presión combinada que se generaría en el digestor.

La digestión anaerobia en alta concentración es un proceso biológico en el cual se produce una fermentación con contenido de sólidos, es una tecnología relativamente nueva, y su aplicación para la recuperación de energía a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos todavía no se ha desarrollado completamente. Dos ventajas que tiene el proceso de digestión anaerobia de sólidos en alta concentración son: menores requisitos de agua y una tasa más alta de producción de gas por unidad de volumen del tamaño del bioreactor. Otra gran diferencia es que, al final del proceso, se requiere menos esfuerzo para deshidratar y evacuar los fangos digeridos.

La mayor parte de la tecnología que se utilizará es la proporcionada por la compañía ISAT (Investigation Search Advanced Technology) debido a que tiene gran difusión en el ámbito mundial y a su fácil manejo.

De tal forma que se utilizará un digestor del tipo domo fijo pues es el adecuado para el manejo de una gran cantidad de desechos orgánicos, además de ser de uno de los más económicos y uno de los más usados en el ámbito mundial gracias a su gran tiempo de vida útil, su bajo costo de construcción, debido principalmente a que carece de partes móviles como el que presenta el de techo flotante y para propósitos de ubicación, este tipo de digestores se encuentran enterrados para evitar cambios bruscos de temperatura durante las noches, sin olvidar su protección contra daños que puedan ocurrir por algún golpe u otro tipo de incidentes.

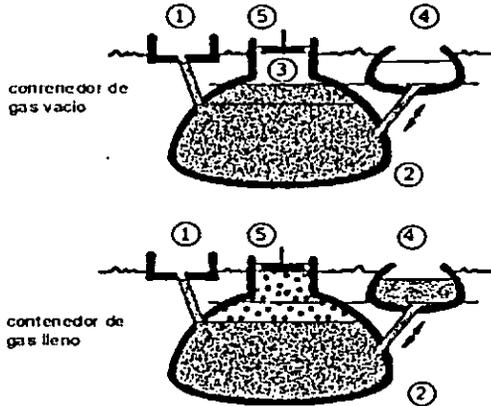
Esta clase de digestores consta principalmente de los elementos que se presentan en la siguiente figura:



Planta tipo domo fijo: 1. Tanque de mezclado con tubo interno y trampa de arena. 2. Digestor 3. Tanque de compensación y de remoción. 4. Colector de gas. 5. Tubería de gas. 6. Compuerta de acceso, con sello hermético. 7.

Zona de acumulación de lodos espesos. 8. Tubería de salida. 9. Nivelador de referencia. 10. Espuma, destruida por la variación de nivel.

Una planta tipo domo fijo consta de un digestor en forma de domo con un rígido contenedor de gas inamovible y un foso de desplazamiento también llamado "tanque de compensación". El gas es almacenado en la parte superior del digestor. Cuando la producción de gas comienza el lodo es desplazado al tanque de compensación. La presión del gas aumenta conforme el volumen del gas acumulado aumenta.

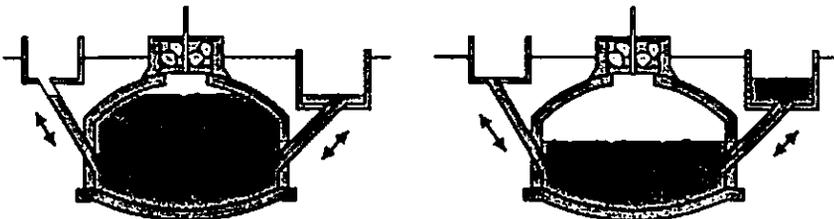


Funciones básicas de una planta tipo domo flotante, 1 Foso de mezclado, 2 Digestor, 3 Contenedor de gas, 4 Foso de desplazamiento, 5 Tubería de gas.

La estructura del digestor generalmente es de mampostería, cemento o ferrocemento. Los parámetros para seleccionar el material deben de ser:

- ⊕ Estabilidad (ante la presión de gas y líquido)
- ⊕ Bajo costo
- ⊕ Viabilidad en la adquisición y transporte del material

El contenedor de gas puede ser lo mismo que la parte superior del digestor hemisférico (diseño de CARMATEC) o el cono superior de un digestor cilíndrico (planta de domo fijo china). En una planta de tipo domo fijo la recolección de gas en la parte superior del domo desplaza un volumen correspondiente del lodo digerido como se muestra en la siguiente figura.



### Unidad de separación

Una vez obtenidos los gases del digestor, se tiene que separar el metano de los otros gases para esto se puede contar con diferentes procesos como la separación por membranas o una absorción, en este caso se

decidió utilizar una unidad de torre empacada de anillos Raschig de cerámica de 2 pulgadas debido a su bajo costo en comparación con un sistema de membranas además de que ésta opera con agua como corriente líquida que se encargara de absorber el CO<sub>2</sub> generado en la producción del biogás, pues por la cantidad que se forma del mismo presenta un considerable aumento de volumen y un problema para su almacenamiento.

### Generación de energía eléctrica

Se optó por el uso de una caldera y una turbina de vapor para la generación de energía eléctrica, ya que las turbinas de gas tienen una eficiencia muy baja con respecto a la turbina de vapor además, debido a la composición del biogás, se tendrían que realizar algunos cambios a los componentes de la turbina de gas para poder trabajar con el mismo.

### Dimensionamiento

Aunque el proceso de digestión anaeróbica de sólidos en alta concentración no se ha desarrollado completamente, en la tabla siguiente se resumen algunas consideraciones importantes para el diseño:

Componente de residuos	Observaciones
Tamaño del material	Los residuos que se van a digerir deben triturarse hasta un tamaño que no interfiera en el funcionamiento eficaz de los mecanismos de alimentación y descarga.
Equipamiento de mezclado	El equipamiento de mezclado dependerá del tipo de reactor que se vaya a utilizar.
Porcentaje de residuos sólidos mezclado con fangos	Depende de las características de los fangos
Tiempo de retención	Utilizar de 20 a 30 días para el diseño o basar el diseño en resultados de estudios piloto
Destrucción de sólidos volátiles biodegradables (SVD)	Varía aproximadamente desde el 90 al 98% según el tiempo bruto de retención y la tasa de carga de SVB.
Sólidos totales destruidos	Varía según el contenido de lignina de las alimentaciones
Producción de gas	De 0.625 a 1.0 m <sup>3</sup> /Kg de sólidos volátiles biodegradables destruidos. (CH <sub>4</sub> = 50%; CO <sub>2</sub> = 50%)

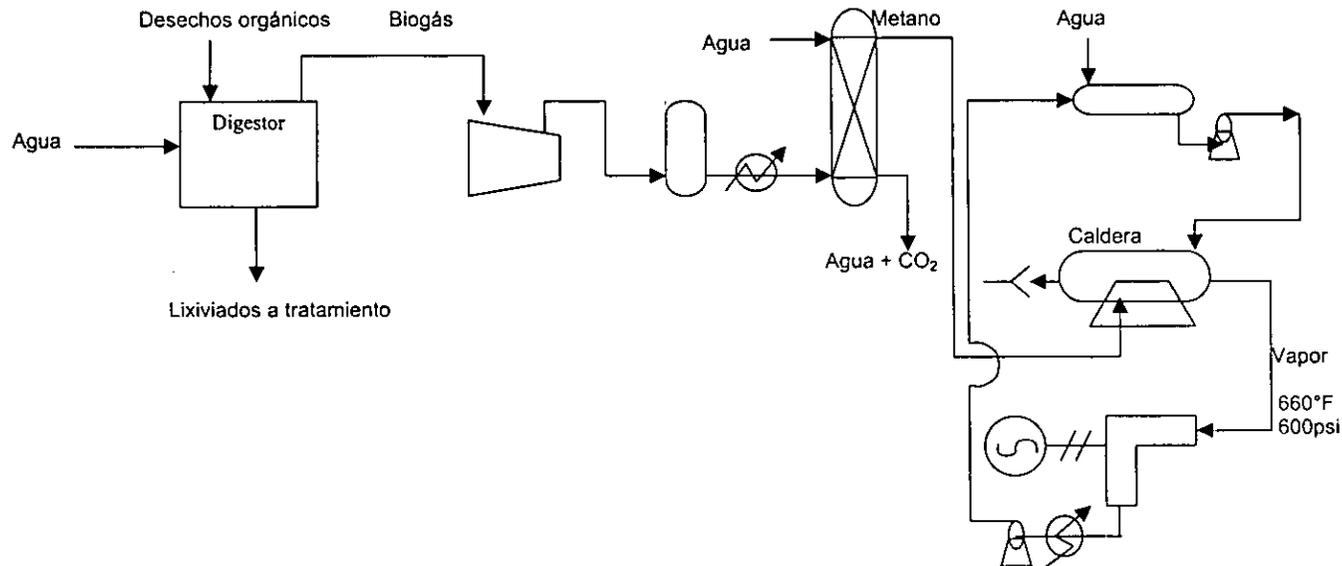
Para el diseño y la operación del colector del gas deben considerarse los siguientes aspectos de seguridad:

- ⊕ Se debe de proveer un sobreflujo dentro y fuera del tanque de compensación para evitar un sobrellenado de la planta.
- ⊕ La salida del gas se debe de localizar cerca de 10 cm más alto que el nivel de sobreflujo para evitar la ruptura de la tubería del gas.
- ⊕ La presión de gas de 1m WC o más puede desarrollarse dentro del espacio que ocupa el gas. Consecuentemente, la planta debe de cubrirse con la suficiente tierra que pueda proveer la contrapresión adecuada.
- ⊕ Ha de tenerse un especial cuidado en la puerta por donde se bajará al interior del digestor, la cual debe poder soportar hasta 100kg o más. El método más seguro es cerrar con grapas.

Para evitar rupturas en el contenedor de gas es recomendable la siguiente medida estructural:

- ⊕ Un especialista debe diseñar el colector de gas teniendo especial cuidado en el cuello del colector del gas que es la parte donde se une con el digestor.

Las condiciones de alimentación en la Central de Abasto, como ya se mencionó, constan de 100 a 800 Ton de basura orgánica al día. Anteriormente se explicaron los diferentes pasos para la formación del biogás y su consecuente proceso para la generación de energía eléctrica. A continuación se presenta un pequeño diagrama de flujo para ejemplificar el proceso:



Para iniciar el diseño del digestor se requiere conocer la calidad y tipo de biomasa, así como la temperatura del lugar en el que se ubicará. El volumen del digestor (Vd) se determinará con base en el tiempo de retención (Rt) y a la cantidad de sustrato (Sd) con el que será alimentado diariamente. Para calcular este volumen se utiliza la siguiente fórmula:

$$Vd = Sd \times Rt [=] m^3$$

La cantidad del sustrato quedará determinada con base en el peso específico de los desechos orgánicos (ver apéndice: tabla de peso específico)  
 Peso específico = 910lb/yd<sup>3</sup> = 0.595Ton/m<sup>3</sup>.

Por lo tanto la cantidad de sustrato es:

$$Sd = 800Ton \times \left[ \frac{1m^3}{0.595Ton} \right] = 1344.3m^3$$

El tiempo de retención se determina en función de la temperatura, por lo tanto, se puede asumir que para un digestor que no sea calentado la temperatura será de 1 ó 2K alrededor de la temperatura del sustrato. Para una planta de producción de biogás simple el tiempo de retención será aproximadamente de 40 días; pero la práctica ha demostrado que el tiempo de retención real es de 60 a 80 días, e inclusive hasta 100 <sup>4</sup>, para este caso se tomarán 80 días como el tiempo de retención necesario para la formación del biogás.

$$Sd = 1344.3m^3/d \times 80d = 107544m^3$$

#### Cálculo de la producción de biogás

Para determinar la cantidad teórica de biogás que se puede producir es necesario tener conocimiento de los distintos aspectos del sustrato. Lo primero a conocer es la composición que presente el sustrato, es decir, la cantidad en por ciento en peso de sus distintos componentes (ver apéndice: tabla de composición física RSU)

Componentes	% en peso	Cantidad en la Central de Abasto en toneladas (800, Ton de desechos orgánicos)
Residuos de comida mezclados	9	72
Papel	34	272
Cartón	6	48
Plástico	7	56
Madera	2	16
Productos agrícolas mezclados	42	336

La biodegradabilidad, es decir, el tiempo que tardan los diferentes tipos de desechos orgánicos en descomponerse, se puede dividir en dos: 1) aquellos materiales que se descomponen rápidamente (que va de un lapso de entre 20 días y 5 años); y 2) aquellos materiales que se descomponen lentamente (cuyo lapso puede durar hasta 50 años o más). Los componentes que son de descomposición lenta y los plásticos, por el tiempo que tardan en biodegradarse, pueden considerarse como no biodegradables y por lo tanto ser excluidos en los cálculos para obtener la cantidad teórica de biogás producido. El siguiente paso consiste en construir una tabla de cálculos para la distribución de los elementos (C, H, O, N y S) que contienen los distintos constituyentes de los desechos orgánicos.

Tipo de residuos	Peso Húmedo (Ton)	Peso Seco (Ton)	Composición%, Ton					Cenizas
			C	H	O	N	S	
Residuos de comida mezclados	72	21.6	10.37	1.38	8.12	0.56	0.086	1.08
Papel	272	255.7	110.96	14.83	113.27	0.77	0.511	15.34
Cartón	48	45.6	19.61	2.69	20.43	0.14	0.091	2.28
Agrícolas Mezclados	336	168	81.48	10.42	66.36	2.35	0.336	7.06
Total	728	490.9	222.42	29.32	208.18	3.84	1.024	25.76

El contenido de humedad será de: 237.1 Ton (728 Ton - 490.9 Ton)

- Ver apéndice (tabla de peso específico)
- Ver apéndice (tabla de análisis elemental de material combustible)

Enseguida se calcula la composición molar de los elementos, despreciando la ceniza.

	C	H	O	N	S
Kg/Kmol	12.01	1.01	16	14.01	32.06
Kmoles rápidamente descomponibles	18519.6	29027.9	13011.04	272.48	31.97

Como siguiente paso se determina una fórmula química aproximada, también conocida como fórmula mínima. Además de construir una tabla de cálculos para determinar las relaciones normalizadas mol.

Relación mol (azufre = 1)	
Componente	Rápidamente descomponible
C	579.3
H	908
O	407
N	8.5
S	1

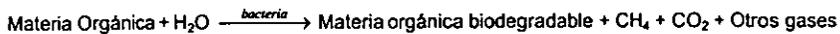
Por lo tanto la fórmula química con azufre es:



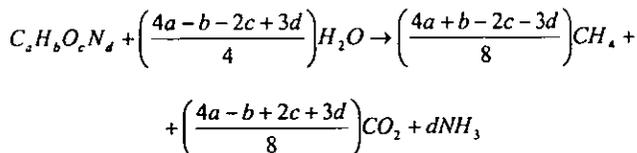
Redondeando queda:



La reacción química generalizada para la descomposición anaerobia de residuos sólidos puede escribirse de la forma siguiente:

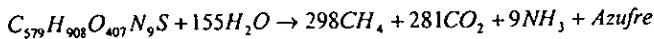


El volumen de los gases emitidos durante la descomposición anaerobia puede estimarse de varias maneras. Por ejemplo, si los constituyentes orgánicos individuales de los residuos sólidos (con la excepción de plásticos) se representan en una forma generalizada con la fórmula  $C_a H_b O_c N_d$ , entonces es posible estimar el volumen total del gas utilizando la siguiente ecuación:



Por lo tanto la estimación del volumen de los gases que se derivarían de la descomposición de los residuos orgánicos quedaría de la siguiente forma:

a) La ecuación resultante será:



b) Para determinar el volumen de metano y dióxido de carbono producido se requieren los pesos específicos del metano, del dióxido de carbono y del amoníaco que son 0.717Kg/m<sup>3</sup>, 1.978Kg/m<sup>3</sup> y 0.771Kg/m<sup>3</sup>, respectivamente, así como los pesos moleculares de cada compuesto que contienen en la fórmula mínima, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Compuesto	Pesos moleculares
C <sub>579</sub> H <sub>908</sub> O <sub>497</sub> N <sub>9</sub> S	14537.3
H <sub>2</sub> O	2793.5
CH <sub>4</sub>	4786.1
CO <sub>2</sub>	12370.5
NH <sub>3</sub>	145.2

De esta manera los volúmenes de los gases quedan de la siguiente forma:

$$CH_4 = \frac{(4786.1 \text{ kg/kmoles})(490900 \text{ Kg})}{(14537.3 \text{ kg/kmoles})(0.717 \text{ Kg/m}^3)} = 225398.5 \text{ m}^3$$

$$CO_2 = \frac{(12370.5 \text{ kg/kmoles})(490900 \text{ Kg})}{(14537.3 \text{ kg/kmoles})(1.978 \text{ Kg/m}^3)} = 211180 \text{ m}^3$$

$$NH_3 = \frac{(145.2 \text{ kg/kmoles})(409900 \text{ Kg})}{(14537.3 \text{ kg/kmoles})(0.771 \text{ Kg/m}^3)} = 6360.6 \text{ m}^3$$

\*Nota: Los valores de generación del gas calculados representan la cantidad máxima de gas que podría producirse bajo condiciones óptimas a partir de la destrucción de los sólidos volátiles biodegradables (SVB) de la fracción orgánica de los residuos sólidos de la Central de Abastos. El rango de los constituyentes orgánicos individuales varía aproximadamente de 0.62 a 1.06m<sup>3</sup>/Kg SVB destruidos. Las cantidades reales de gas generado serán menores porque no toda la materia orgánica biodegradable estaría disponible para la descomposición.

Entonces la composición porcentual de la mezcla de gases es la siguiente:

$$\text{Metano} = \frac{225398.5}{225398.5 + 211180 + 6360.6} = 50.9\%$$

$$CO_2 = \frac{211180}{225398.5 + 211180 + 6360.6} = 47.7\%$$

$$NH_3 = \frac{6360.6}{225398.5 + 211180 + 6360.6} = 1.4\%$$

Para determinar la cantidad teórica total de gas generado por unidad en peso seco de la materia orgánica destruida se hace lo siguiente:

$$\text{Vol./Kg} = \frac{225398.5m^3 + 211180m^3 + 6360.6m^3}{490900Kg} = 0.90m^3/Kg$$

Como se mencionó antes el tiempo de retención es muy importante para el diseño y éste es de 80 días si se alimentan 800ton/día, la carga neta en el digestor al final de esos 80 días será de 64000 ton de residuos orgánicos que, en base seca corresponden a 45032 ton.

Por lo tanto el volumen de biogás producido será de 3242304 m<sup>3</sup> de los cuales 1650332.73 m<sup>3</sup> corresponden al metano.

Además del colector del gas es indispensable instalar un sistema depurador para purificar y recuperar el metano de los demás gases, esta separación puede llevarse a cabo por métodos como la absorción física, o mediante separación por membrana. En las absorciones físicas, un componente se absorbe de manera preferencial utilizando un disolvente adecuado. La separación por membrana implica el uso de una membrana semipermeable; se han desarrollado membranas semipermeables que dejan pasar el dióxido de carbono, el ácido sulfhídrico y el agua, mientras se retiene el metano.

El biogás será llevado a un tanque de balance para garantizar una alimentación continua a la unidad separadora para poder llevar a cabo esta función se requiere de un compresor.

Para iniciar el diseño del compresor se debe de conocer la relación Cp y Cv esta relación se conoce generalmente como K así como la eficiencia politrópica del compresor que generalmente es entre 70% y 80% para este caso se tomara 75%.

$$\left(\frac{n}{n-1}\right) = \eta_p * \left(\frac{K}{K-1}\right)$$

$$\left(\frac{n}{n-1}\right) = 0.75 * \left(\frac{1.31}{1.31-1}\right) = 3.17$$

El siguiente paso será conocer la temperatura de salida del compresor

$$T_2 = T_1 * r_c^{\frac{n-1}{n}}$$

Donde:

T<sub>1</sub> = Temperatura de entrada = temperatura del digestor = 519°R

r<sub>c</sub> = relación de compresión = 2

por lo tanto T<sub>2</sub> = 646 °R

La eficiencia adiabática del compresor quedará definida como:

$$\eta_{ad} = \frac{T_1 * \left[ r_c^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right]}{T_2 - T_1}$$

quedando la eficiencia adiabática = 73%

La cabeza adiabática del compresor se define como:

$$H_{ad} = \frac{1544}{PM_{prom}} * \left( \frac{K}{K-1} \right) * \left[ r_c^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right] * Z_a$$

Donde:

$Z_a$  = factor de compresibilidad aprox. 1

$PM_{prom}$  = Peso molecular promedio del biogás = 29.845

$H_{ad}$  [=] ft\*lb<sub>zsa</sub>/lb

Para conocer los HP del compresor solo se utilizan las siguientes fórmulas:

$$HP_g = \frac{W * H_{ad}}{33000 * \eta_{ad}}$$

$$BHP = \frac{HP_g}{\eta_m}$$

Donde :

W = Flujo másico [lb/min.]

$H_{ad}$  = Cabeza adiabática [ft]

$\eta_{ad}$  = Eficiencia adiabática

$\eta_m$  = Eficiencia mecánica del compresor = 0.9

Los BHP del compresor es de 106 caballos de fuerza.

El compresor, como ya se explicó, llevara el biogás a un tanque de balance que servirá para garantizar una alimentación continua a la unidad de separación donde se eliminará el CO<sub>2</sub>

Como se trata de un gas y las condiciones del mismo implican que el tanque de balance será vertical de tapas tori-esféricas, será diseñado para un tiempo de retención de 60 min con un factor de L/D de 3 pues mientras más se acerque a este valor, será mejor<sup>45</sup> el volumen que contendrá este tanque quedará definido como:

$$V = \frac{(\bar{W} * t_r) * R * T}{P}$$

Donde:

$\bar{W}$  = flujo molar [mol/min.]

$t_r$  = tiempo de retención [min.]

R = constante de los gases [psi\*m<sup>3</sup>/mol\*\*R]

T = temperatura [°R]

Con un tiempo de retención de 60 minutos, la temperatura de salida del compresor y una relación L/D = 3 las dimensiones del tanque quedan:

$$L = 2.4 \text{ metros}$$

$$D = 0.7 \text{ metros}$$

Antes de que el gas entre a la torre de separación, se debe de llevar a una temperatura adecuada o de operación de la torre para poder lograr la mayor separación del CO<sub>2</sub>. Esto se puede llevar acabo mediante el uso de un intercambiador de calor; debido al flujo de calor que existe y al flujo másico se empleará un intercambiador de tubos y coraza.

Una vez que el gas lleva una temperatura de 75°F para poder calcular la torre se necesitan los datos del CO<sub>2</sub> al equilibrio (ver apéndice: tabla de presión de vapor) para construir la curva de equilibrio (ver apéndice: curva de equilibrio), sabiendo que:

$$y_a = \frac{P_a}{P} * x_a$$

y que:

$$y_a = \frac{Y_a}{1 + Y_a} \quad \text{y} \quad x_a = \frac{X_a}{1 + X_a}$$

La curva entonces queda definida como:

$$\frac{Y_a}{1 + Y_a} = 61.2 * \frac{X_a}{1 + X_a}$$

Y	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
X	0	1.48E-3	2.7E-3	3.7E-3	4.7E-3	5.5E-3	6.2E-3	6.8E-3	7.3E-3

Estos valores se encuentran en la gráfica curva de operación en el apéndice.

Antes de completar el balance de masa, será necesario determinar la velocidad mínima de flujo del líquido. Si se quiere quitar el 90% del CO<sub>2</sub> que se encuentra en el gas, la concentración del gas que sale de la torre será  $y_2 = 0.048$  y la concentración del líquido que entra será  $x_2 = 0.0$ . Es posible escribir la ecuación de la línea de operación en términos de corrientes libres de soluto,

$$V' * \left[ \frac{y_2}{1 - y_2} - \frac{y_1}{1 - y_1} \right] = L' * \left[ \frac{x_2}{1 - x_2} - \frac{x_1}{1 - x_1} \right]$$

Ahora  $y_1 = 0.48$ ,  $y_2 = 0.048$ ,  $x_2 = 0$ , de manera que el flujo mínimo de líquido corresponderá a una línea que pasa por  $(x_2, y_2)$  y  $(x_1', y_1)$  pues la línea de equilibrio es cóncava a la línea de operación. De la curva de equilibrio en el apéndice,  $x_1' = 0.0052$ . También

$$V_1 = \frac{54490(\text{lb/h})}{[(0.48) * (44)] + [(0.52) * (16)]} = 1850.9(\text{mol/h})$$

$$V_1' = V_1 * (1 - y_1) = 1850.9 * (0.52) = 962.5(\text{lbmol/h}) \quad \text{con } 10\% \text{ de } \text{CO}_2$$

En consecuencia, la velocidad mínima del agua es:

$$962.5 * \left[ \frac{0.048}{0.952} - \frac{0.48}{0.52} \right] = L' * \left[ 0 - \frac{0.0052}{0.9948} \right]$$

$L' = 160680.6$  (lbmol/h) agua libre de CO<sub>2</sub>.

Tomando una velocidad del agua de diseño de  $2L_{\text{min}}$

$L' = 2 * 160680.6 = 321361.2$  (lbmol/h)

Ahora puede usarse la velocidad de flujo de diseño de  $L' = 321361.2$  lbmol/h en la ecuación de la línea de operación, para determinar la composición del líquido de salida.

$$962.5 * \left[ \frac{0.048}{0.952} - \frac{0.48}{0.52} \right] = 321361.2 * \left[ 0 - \frac{x_1}{1 - x_1} \right]$$

$$x_1 = 0.0026$$

Ahora se establecen todas las composiciones y velocidades de flujo finales.

$x_1 = 0.0026$	$y_1 = 0.48$
$x_2 = 0.0$	$y_2 = 0.048$
$L' = 321361.2 \text{ lbmol/h}$	$V' = 962.5 \text{ lbmol/h}$

Ahora es posible evaluar la línea de operación completa.

$$962.5 * \left[ \frac{y}{1-y} - \frac{0.48}{0.52} \right] = 321361.2 * \left[ \frac{x}{1-x} - \frac{0.0026}{0.9974} \right]$$

Considerando que  $(1-x)$  es aproximadamente igual a 1, la línea de operación resulta:

y	0.5	0.48	0.3	0.2	0.1	0.05	0
x	2.84E-3	1.85E-3	1.14E-3	6.02E-4	1.86E-4	1.13E-5	-1.58E-4

Estos datos se grafican en la curva de operación en el apéndice.

Las velocidades totales de flujo se determinan de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} V_1 &= 54490.6 \text{ lb/h} = 1850.9 \text{ lbmol/h} \\ \text{CO}_2 \text{ entrante} &= (1850.9) * (0.48) * (44) = 39091.1 \text{ lb/h} \\ \text{CO}_2 \text{ saliente} &= (0.048/0.952) * (962.5) * (44) = 2135.2 \text{ lb/h} \end{aligned}$$

En consecuencia, el  $\text{CO}_2$  absorbido por el agua será  $39091.2 - 2135.2 = 36956 \text{ lb/h}$ .

$$\begin{aligned} \text{Agua que entra} &= 321361.2 * (18) = 5784501.7 \text{ lb/h} \\ \text{Líquido total que sale} &= 5784501.7 + 36956 = 5821457.7 \end{aligned}$$

Para poder obtener las velocidades totales se requiere calcular el siguiente factor de la gráfica de velocidades de inundación (apéndice).

$$\frac{G_L}{G_V} \sqrt{\frac{\rho_V}{\rho_L}} = \frac{5784501.7}{54490.6} \sqrt{\frac{8.36E-2(\text{lb}/\text{ft}^3)}{62.3(\text{lb}/\text{ft}^3)}} = 3.89$$

De la figura curva de inundación (apéndice) con una inundación del 50% obtenemos que:

$$\frac{G_V^2 * F * (\mu_L)^{0.2}}{g_c * \rho_V * \rho_L} * \left( \frac{\rho_w}{\rho_L} \right) = 0.059$$

Donde:

$G_V$  = masa velocidad en la fase gaseosa,  $[\text{lb/h ft}^2]$

F = factor de empaque

$\mu_L$  = viscosidad del líquido

$g_c$  = aceleración de la gravedad,  $[\text{ft/h}^2]$

$\rho_V$  = densidad del gas  $[\text{lb/ft}^3]$

$\rho_L$  = densidad del líquido,  $[\text{lb/ft}^3]$

De la tabla empaques (apéndice) con anillos Raschig de 1", F = 155. Dado que  $\rho_w = \rho_L$ , se tiene que:

$$\frac{G_V^2 (155) (1.0)^{0.2}}{4.17E8 * 62.3 * 8.36E-2} = 0.059$$

$$G_V = 909.2 \text{ lb/h ft}^2$$

Utilizando una velocidad de inundación del 50%,

$$G_v = 454.6 \text{ lb/h ft}^2$$

Dado que el flujo de gas es mayor en el fondo de la torre, se debe basar el área en esta velocidad de flujo, o sea

$$S = \frac{V}{G_v} = \frac{54490.6}{454.6} = 119.9 \text{ ft}^2$$

Por lo tanto el diámetro de la torre es:

$$D = \sqrt{\frac{4(119.9)}{\pi}} = 12.35 \text{ ft}$$

En consecuencia,

$$G_L = \frac{(321361.2)(18)}{119.9} = 48260.2 (\text{lb} / \text{hft}^2)$$

Una vez que se han calculado las velocidades de masa de las dos fases, es posible determinar las alturas de las unidades de transferencia.

Para poder calcular las alturas de transferencia para el CO<sub>2</sub> que se encuentra a 75°F y 1atm de presión se deben de conocer los coeficientes individuales de transferencia de masa en la fase gaseosa (k<sub>G</sub>) y en la fase líquida (k<sub>L</sub>), así como el área superficial del empaque mojado (a<sub>w</sub>) que corresponden a las siguientes fórmulas:

Fase líquida:

$$k_L \left( \frac{\rho_L}{\mu_L g_c} \right)^{1/3} = 0.0051 \left( \frac{G_L}{a_w \mu_L} \right)^{2/3} \left( \frac{\mu_L}{\rho_L D_L} \right)^{-1/2} (a_v D_p)^{0.4}$$

Fase gaseosa:

$$\frac{k_G RT}{a_v D_v} = C_1 \left( \frac{G_v}{a_v \mu_v} \right)^{0.7} \left( \frac{\mu_v}{\rho_v D_v} \right)^{1/3} (a_v D_p)^{-2.0}$$

La expresión para a<sub>w</sub>, la superficie mojada del empaque es:

$$\frac{a_w}{a_v} = 1 - \exp \left[ -1.45 \left( \frac{\sigma_c}{\sigma} \right)^{0.75} \left( \frac{G_L}{\mu_L a_v} \right)^{0.1} \left( \frac{G_L^2 a_v}{\rho_L^2 g_c} \right)^{-0.05} \left( \frac{G_L^2}{\rho_L \sigma a_v} \right)^{0.2} \right]$$

Donde:

a<sub>v</sub> = área superficial por unidad de volumen de empaque, [ft<sup>2</sup>/ft<sup>3</sup>] apéndice (empaques)

a<sub>w</sub> = área superficial del empaque mojado, [ft<sup>2</sup>/ft<sup>3</sup>]

C<sub>1</sub> = Constante adimensional. C<sub>1</sub> = 5.23 para empaques mayores de 1/2 pulgada; C<sub>1</sub> = 2.0 para empaques menores a 1/2 pulgada.

D<sub>L</sub> = Coeficiente de difusión de la fase líquida, [ft<sup>2</sup>/h]

D<sub>p</sub> = Tamaño nominal del empaque, [ft]

D<sub>v</sub> = Coeficiente de difusión de la fase gaseosa, [ft<sup>2</sup>/h]

g<sub>c</sub> = aceleración de la gravedad, 4.17x10<sup>8</sup> ft/h<sup>2</sup>

**ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA**

$G_L$  = Masa velocidad de la fase líquida, [lb/h ft<sup>2</sup>]

$G_V$  = Masa velocidad de la fase gaseosa, [lb/hft<sup>2</sup>]

$k_G$  = Coeficiente individual de transferencia de masa de la fase gaseosa, [lbmol/h ft<sup>2</sup>atm]

$k_L$  = Coeficiente individual de transferencia de masa de la fase líquida, [lbmol/h\*ft<sup>2</sup> (lbmol/ft<sup>3</sup>)]

$\mu_L$  = Viscosidad del líquido, [lb/ft\*h]

$\mu_V$  = Viscosidad del gas, [lb/ft\*h]

$\rho_L$  = Densidad del líquido, [lb/ft<sup>3</sup>]

$\rho_V$  = Densidad del gas, [lb/ft<sup>3</sup>]

$\sigma$  = Tensión superficial del líquido, [lb/h<sup>2</sup>]

$\sigma_C$  = Tensión superficial crítica del material de empaque, [lb/h<sup>2</sup>]<sup>46</sup>

por lo tanto los coeficientes individuales de la fase líquida y gaseosa quedan como:

$$k_G = 5.23 \left( \frac{454.6}{58 * 3.63E-2} \right)^{0.7} \left( \frac{3.63E-2}{8.36E-2 * 0.535} \right)^{1/3} \left( \frac{58 * 0.535}{0.73 * 534.7} \right) (58 * 8.33E-2)^{-2.0}$$

$$k_G = 0.715 \text{ lbmol/h*ft}^2\text{*atm.}$$

Antes de poder determinar el valor de  $k_L$  es necesario evaluar la superficie mojada:

$$\frac{a_w}{58} = 1 - \exp \left[ -1.45 \left( \frac{1742886}{2027000} \right)^{0.75} \left( \frac{48260.2}{58 * 2.42} \right)^{0.1} \left( \frac{48260.2^2 * 58}{4.17E8 * 62.3^2} \right)^{-0.05} \left( \frac{48260.2^2}{62.3 * 2027000 * 58} \right)^{0.2} \right]$$

$$a_w = 50.83 \text{ ft}^2\text{/ft}^3$$

Entonces es posible resolver para  $k_L$

$$k_L = 0.0051 \left( \frac{48260.2}{50.83 * 2.42} \right)^{2/3} \left( \frac{2.42}{62.3 * 7.6E-5} \right)^{-1/2} (58 * 8.33E-2)^{0.4} \left( \frac{2.42 * 4.17E8}{62.3} \right)^{1/3}$$

$$k_L = 5.74 \text{ lbmol/h ft}^2\text{(lbmol/ft}^3\text{)}$$

Para encontrar las alturas de unidades de transferencia se siguen las siguientes expresiones:

$$H_G = \frac{G_V / PM_G}{k_G a_w P} = \frac{454.6 / 29.8}{0.715 * 50.83 * 1} = 0.42 \text{ ft}$$

Donde:

$PM_G$  = Peso molecular del gas = 29.8 lb/lbmol

$P$  = Presión = 1 atmósfera

$$H_L = \frac{G_L}{k_L a_w \rho_L} = \frac{48260.2}{5.74 * 50.83 * 62.3} = 2.65 \text{ ft}$$

Utilizando un método simplificado de cálculo para la  $H_{OG}$  se tiene que ajustando la curva de equilibrio mediante una ecuación de mínimos cuadrados obtenemos que la curva de equilibrio se puede definir como:

$$y = 90.4x - 2.4x10^{-2}$$

Esta ecuación establece que  $m = 90.4$  en la expresión  $y = mx + b$  para el intervalo de datos de la torre que se está considerando. Por lo tanto, es posible usarlo para calcular  $H_{OG}$

$$H_{OG} = H_G + \frac{mV}{L} \quad H_L = H_G + \frac{mG_r}{G_L} H_L$$

$$H_{OG} = 0.42 + \frac{90.4 * 454.6}{48260.2} (2.65) = 2.68 \text{ ft}$$

El  $N_{OG}$  quedará definido como:

$$N_{OG} = \left[ \frac{y_2 - y_1}{(y_2^* - y_2) - (y_1^* - y_1)} \right] = \frac{0.048 - 0.48}{\ln \frac{0 - 0.048}{0.07 - 0.48}} = 2.56$$

La altura de la sección empacada es entonces:

$$Z = H_{OG} N_{OG}$$

$$Z = 2.68 * 2.56 = 6.86 \text{ ft}$$

La altura total de la torre queda definida bajo el siguiente esquema:

- ⊕ Espaciamiento entre el domo y el eliminador de niebla = 1ft
  - ⊕ Espesor del eliminador de niebla = 6 in.
  - ⊕ Espaciamiento entre el eliminador de niebla y el plato distribuidor = 1ft
  - ⊕ Distanciamiento entre el plato distribuidor y la cama empacada = 6 in.
- Por lo tanto, la altura total de la torre será de 12.86ft = 13ft.

El metano una vez que se le ha eliminado una gran cantidad de  $CO_2$  es llevado a una unidad de cogeneración de energía eléctrica, es decir, se usa como combustible en una caldera, la cual generará vapor que será llevado a una turbina que accionará un generador para la producción de energía eléctrica. Para iniciar el diseño del sistema de cogeneración el primer paso es el diseño de la caldera y el cálculo de la cantidad de vapor generado, debido a que en la unidad de separación se eliminó el 90% de  $CO_2$  se calcula la nueva composición del gas y el flujo másico del mismo:

Componentes	Composición del gas*
$NH_3$	1.43%
$CO_2$	4.80%
$CH_4$	93.77%

Flujo másico = 16706.9lb/h

Por lo tanto el flujo de metano será 15666lb/h

La cantidad de vapor generada será:

$$Q_{\text{metano}} = W_{\text{metano}} * P.C_{\text{metano}}$$

Donde:

$Q_{\text{metano}}$  = Calor generado por el metano, [BTU/h]

$W_{\text{metano}}$  = Flujo másico de metano, [lb/h]

$P.C_{\text{metano}}$  = Poder calorífico del metano, [BTU/lb] = 23861 BTU/lb <sup>47</sup>

$$Q_{\text{metano}} = 15666 * 23861 = 373806900.2 \text{ (BTU / h)}$$

$$Q_{\text{vapor}} = Q_{\text{metano}} \left( \frac{\eta_{\text{caldera}}}{100} \right)$$

Donde:

$Q_{\text{vapor}}$  = Calor del vapor, [BTU/h]

$\eta_{\text{caldera}}$  = Eficiencia de la caldera = aproximadamente 80%

$$Q_{\text{vapor}} = 373806900.2 \left( \frac{80}{100} \right) = 299045520.2 \text{ (BTU / h)}$$

El flujo de vapor se definirá como:

$$W_{\text{vapor}} = \frac{Q_{\text{vapor}}}{\Delta H}$$

Donde el  $\Delta H$  es el cambio de entalpía que sufre el líquido.

Para poder evaluar el  $\Delta H$  se deben de conocer las condiciones de temperatura y presión del vapor y del líquido y estas son:

	Temperatura °F	Presión psia	Entalpía BTU/lb
Líquido	60.8	14.7	28.06
Vapor	550	400	1280

$$W_{\text{vapor}} = \frac{299045520.2}{1280 - 28.06} = 238865.7 \text{ lb / h}$$

El siguiente equipo en el sistema de cogeneración será la turbina, los BHP requeridos por la turbina se calculan de la siguiente forma:

$$BHP = \frac{(W_{\text{vapor}})(\Delta H)(\eta_p)}{2544}$$

Donde:

$W_{\text{vapor}}$  = Flujo másico de vapor, lb/h

$\Delta H$  = cambio de entalpía, BTU/lb

$\eta_p$  = Eficiencia politrópica de la turbina, de un 70 a 80 %

Una vez más hay que calcular las entalpías para la entrada y salida de la turbina esto se puede hacer con la gráfica del apéndice (Moliere):

	Entrada	Salida
Temperatura	550°F	
Presión	400psi	5inHg
Entalpía	1280BTU/lb	940BTU/lb

$$BHP = \frac{(238865.7)(1280 - 940)(0.75)}{2544} = 23943 \text{ Hp} = 17854.3 \text{ kW}$$

## **Capítulo 6**

# **ANÁLISIS ECONÓMICO**

En este capítulo se llevará a cabo una estimación de costos de diseño preliminar, puesto que esta basada únicamente en la información de que se dispone antes del diseño real de los equipos de la planta generadora de biogás.

El método que se utilizará para esta estimación preliminar de costos será el propuesto por K. M. Guthrie<sup>48</sup>, junto con su respectivo escalamiento al año.

Lo primero en evaluarse será el costo para cada uno de los equipos utilizados iniciando por el digestor:

### Digestor

Para una alimentación de 800 ton de residuos sólidos de tipo orgánico, tenemos que:

Volumen del digestor (m <sup>3</sup> )	Relación L/D	Longitud (m)	Diámetro (m)	Costo base (dólares) 1968
26890.7	1	34.50627882	40.59562214	250000
	0.7	34.50627882	57.99374591	390000
	0.5	34.50627882	81.19124428	490000
	0.3	34.50627882	135.3187405	720000

Una vez que se tiene el costo base el precio del equipo se lleva al año actual

$$C_{actual} = C_{base} (F_p) (F_m) \left( \frac{\text{índice}_{\text{año actual}}}{\text{índice}_{\text{año del costo base}}} \right)$$

Donde:

$C_{actual}$  = Costo actual, dólares

$C_{base}$  = Costo base, dólares

$F_p$  = Factor de presión

$F_m$  = Factor del material

Índice año actual = Índice para el equipo en el año al que se quiera hacer el cálculo

Índice año del costo base = Índice para el equipo en el año al que se tenga el costo base, en este caso 1968.

Costo base (dólares) 1968	Índice 68	Índice actual	Factor de presión	Factor de material	Costo actual (dólares)
250000	109.4	380.1	1.05	1.62	1,477,491.088
390000	109.4	380.1	1.05	1.62	2,304,886.097
490000	109.4	380.1	1.05	1.62	2,895,882.532
720000	109.4	380.1	1.05	1.62	4,255,174.333

y se calculan los costos de instalación, así como los costos indirectos que conlleva el equipo.

$$C_{instalación} = \text{DirectM \& L} + (C_{actual} - C_{base})$$

$$\text{DirectM \& L} = (\text{Factor de costos directos}) (C_{actual})$$

Costo actual	Factor de costos directos	Direct M&L	Instalación
1,477,491.088	2.22	555000	1782491.088
2,304,886.097	2.22	865800	2780686.097
2,895,882.532	2.2	1078000	3483882.532
4,255,174.333	2.19	1576800	5111974.333

El último paso para conocer el costo total del equipo será el "bare module cost" (BMC) y tomando una contingencia de 10% para el costo del equipo se obtiene el costo total del equipo:

$$C_{Total} = [(BMC) * (\text{contingencia})] + BMC$$

$$BMC = BareModule(CSbasis) + (C_{actual} - C_{Base})$$

$$BareModule(CSbasis) = BareModuleFactor * C_{Base}$$

Costo actual:	Bare module factor	Bare module (CS basis)	Bare module cost	Contingencia:	Total del tanque
1,477,491.088	3.06	765000	1992491.088	10%	2,191,740.20
2,304,886.097	3.06	1193400	3108286.097	10%	3,419,114.71
2,895,882.532	3.01	1474900	3880782.532	10%	4,268,860.79
4,255,174.333	2.99	2152800	5687974.333	10%	6,256,771.77

El costo más bajo lo presenta el digestor con una UD = 1 así que es el que se usará, por lo tanto el costo total del digestor será de 2,191,740 dólares.

Los demás equipos siguen la misma metodología de cálculo, por lo que a continuación se muestran sus costos:

#### Compresor

Relación de compresión	BHP	Índice anterior para compresores	Índice actual para compresores	Costo base en 1968	Costo actual
2	848.162015	115.3	651.4	140000	790,945.4
3	1437.424543	115.3	651.4	180000	1,016,929.75
4	1903.667011	115.3	651.4	250000	1,412,402.4
5	2295.610112	115.3	651.4	260000	1,468,898.5
6	2636.981556	115.3	651.4	300000	1,694,883
8	3217.202368	115.3	651.4	350000	1,977,363.4

Costo actual	Direct cost factor	Direct M&I (CS basis)	Field installation
790,945.4	2.16	302400	953345.3599
1,016,929.75	2.16	388800	1225729.748
1,412,402.4	2.16	540000	1702402.428
1,468,898.5	2.16	561600	1770498.526
1,694,883	2.16	648000	2042882.914
1,977,363.4	2.16	756000	2383363.4

Costo actual	Bare module factor	Bare module (CS basis)	Bare module cost	Contingencia:	Total
790,945.4	2.96	414,400.00	1,065,345.36	10%	1,171,880
1,016,929.75	2.93	527,400.00	1,364,329.75	10%	1,500,763
1,412,402.4	2.93	732,500.00	1,894,902.43	10%	2,084,393
1,468,898.5	2.93	761,800.00	1,970,698.53	10%	2,167,768.4
1,694,883	2.93	879,000.00	2,273,882.91	10%	2,501,271.2
1,977,363.4	2.93	1,025,500.00	2,652,863.40	10%	2,918,150

El compresor más económico que se obtiene de este estudio es el primero que nos da una relación de compresión de 2.

#### Tanque de balance

Debido a que el compresor que se utilizará será el de una rc = 2 el análisis económico se realizará sólo con los tanques que presenten esta relación.

Volumen del tanque m <sup>3</sup>	I/D	D m	L m	Costo base	Índice 68	Índice actual	Factor de presión	Factor de material	Costo actual
26.87	1	2.2	2.4	3500	109.4	380.1	1	1	12160.4
	2	1.1	2.4	2500	109.4	380.1	1	1	8686.0
	3	0.7	2.4	1500	109.4	380.1	1	1	5211.6
61.1	1	2.9	3.2	7400	109.4	380.1	1	1	25710.6
	2	1.4	3.2	3500	109.4	380.1	1	1	12160.4
	3	1.0	3.2	2500	109.4	380.1	1	1	8686.0
133.8	1	3.7	4.1	11000	109.4	380.1	1	1	38218.5
	2	1.9	4.1	5500	109.4	380.1	1	1	19109.2
	3	1.2	4.1	3500	109.4	380.1	1	1	12160.4
287.1	1	4.8	5.3	19000	109.4	380.1	1	1	66013.7
	2	2.4	5.3	10000	109.4	380.1	1	1	34744.1
	3	1.6	5.3	5800	109.4	380.1	1	1	20151.5
456.1	1	5.6	6.2	25000	109.4	380.1	1	1	86860.1
	2	2.8	6.2	14000	109.4	380.1	1	1	48641.7
	3	1.9	6.2	8000	109.4	380.1	1	1	27795.2
665.1	1	6.3	7.0	32000	109.4	380.1	1	1	111181
	2	3.2	7.0	15000	109.4	380.1	1	1	52116.1
	3	2.1	7.0	9000	109.4	380.1	1	1	31269.1

Costo actual	Factor de costos directos	M&L directo	instalación
12160.4	3.04	10640	19300.4205
8686.0	3.04	7600	13786.0146
5211.6	3.04	4560	8271.60878
25710.6	3.04	22496	40806.6033
12160.4	3.04	10640	19300.4205
8686.0	3.04	7600	13786.0146
38218.5	3.04	33440	60658.4644
19109.2	3.04	16720	30329.2322
12160.4	3.04	10640	19300.4205
66013.7	3.04	57760	104773.711
34744.1	3.04	30400	55144.0585
20151.5	3.04	17632	31983.5539
86860.1	3.04	76000	137860.146
48641.7	3.04	42560	77201.6819
27795.2	3.04	24320	44115.2468
111181	3.04	97280	176460.987
52116.1	3.04	45600	82716.0878
31269.1	3.04	27360	49629.6527

Costo actual	Bare module factor	Bare module (CS basis)	Bare module cost	Contingencia	Total del tanque
12160.4	4.34	15190	23850.42048	10%	26,235.5
8686.0	4.34	10850	17036.01463	10%	18,739.6
5211.6	4.34	6510	10221.60878	10%	11,243.8
25710.6	4.34	32116	50426.60329	10%	55,469.3
12160.4	4.34	15190	23850.42048	10%	26,235.5
8686.0	4.34	10850	17036.01463	10%	18,739.6
38218.5	4.34	47740	74958.46435	10%	82,454.3
19109.2	4.34	23870	37479.23218	10%	41,227.1
12160.4	4.34	15190	23850.42048	10%	26,235.5
66013.7	4.34	82460	129473.7112	10%	142,421.1
34744.1	4.34	43400	68144.0585	10%	74,958.5
20151.5	4.34	25172	39523.55393	10%	43,475.9
86860.1	4.34	108500	170360.1463	10%	187,396.2
48641.7	4.34	60760	95401.6819	10%	104,941.8
27795.2	4.34	34720	54515.2468	10%	59,966.8
111181	4.34	138880	218060.9872	10%	239,867.1
52116.1	4.34	65100	102216.0878	10%	112,437.7
31269.1	4.34	39060	61329.65265	10%	67,462.6

El tanque de balance más económico daría el de volumen de 26.87m<sup>3</sup> con un factor de L/D igual a 3 por lo tanto sus dimensiones de L y D son de 0.7m y 2.4m respectivamente.

#### Intercambiador de calor

Temperatura °F	Área de transferencia ft <sup>2</sup>	Índice 1968	Índice actual	fd	fp	fm	Costo base	Costo actual
186.2	4355.16561	109.4	380.1	0.85	1	1	22000	40700

Costo actual	Factor de costos directos	M&L directo	Instalación	Bare module factor	Bare module (CS basis)	Bare module cost	Contingencia	Total del cambiador
40700	2.34	51480	70180	3.29	72380	91080	10%	100188

#### Unidad de separación

Altura de la torre (ft)	Diámetro ft	Costo base	Índice '68	Índice actual	Factor de presión	Factor de material	Costo actual
12.86	12.4	80000	109.4	380.1	1	1	277952.5

Costo actual	Factor de costos directos	M&L directo	Instalación	Costo del empaque	Altura empacada (ft)	Costo total del empaque
277952.5	2.99	239200	437319.258	7	6.86	166.790075

Costo Actual	Bare module factor	Bare module (CS basis)	Bare module cost	Contingencia	Total de la torre
277952.5	4.06	324800	522752.468	10%	575027.7

**Caldera**

Cantidad de vapor lb/h	Costo unitario	Exponente	FL	Índice 68	Índice actual	Costo actual
238865.7	560	0.5	480	109.4	380.1	933920.3

Costo actual	factor M&L	M&L	Indirectos	Base module	Contingencia	Total
933920.3	1.5	1400880.4	532334.7	1933215.0	10%	2,126,536.5

**Unidad de cogeneración (turbina y generador)**

Potencia (HP)	KW	Cantidad de vapor lb/h	Costo total
23943	7144.563123	238865.6966	936,481.0

Por lo tanto el costo total de los equipos será:

Alimentación (ton)	800
Costo del digestor	2,191,740.20
Costo del compresor	1,171,879.90
Costo del tanque de retención	11,243.77
Costo del intercambiador	100,188.00
Costo de la torre empacada	575,027.71
Costo de la caldera	2,126,536.51
Costo de la turbina y el generador	936,481.01
Costo total de equipos	7,113,097.10

Para terminar la estimación inicial de la inversión requerida se utiliza el método de estimación por porcentaje del costo total de los equipos

Componentes	Costos*
Costo de los equipos	7,113,097.10
Instrumentación, 28%E	1,991,667.19
Tuberías, 31%E	2,205,060.10
Eléctricos, 10%E	711,309.71
Acondicionamiento del terreno, 10%E	711,309.71
Facilidades de servicios*	391,220.3
Terreno, 6%E	426,785.83
Total de los costos directos de la planta D	13,550,449.97
Ingeniería y supervisión, 32%E	2,276,191.1
Gastos de Construcción, 34%E	2,418,453.0
Total de costos directos e indirectos (D+I)	18,245,094.06
Contratista, 5%(D+I)	912,254.70
Contingencia, 10%(D+I)	1,824,509.41
Total de la inversión	20,981,858.16

\*Los costos de los servicios se calculan de la siguiente forma

Facilidades de servicios*	Rango%	Media%	Costo**
Abastecimiento de agua, bombeo y enfriamiento	0.4 - 3.7	1.8	128,035.7
Distribución de agua	0.1 - 2.0	0.9	64,017.9
Distribución eléctrica	0.4 - 2.1	1.0	71,130.9
Almacenamiento de residuos	0.4 - 1.8	1.1	78,244.1
Sistema de protección contra incendios	0.3 - 1.0	0.7	49,791.7
Total			391220.3

## Tiempo de retorno de la inversión

El tiempo de retorno de la inversión hecha se obtendrá de la siguiente forma:

$$TRI = \frac{CTI}{\left[ \left( \frac{kWh}{d} \right) \left( \frac{365d}{año} \right) \right] \left( \frac{\$}{kwh} \right) \left( \frac{1dolar}{9.5\$} \right)}$$

Donde:

CTI = Costo total de la inversión

KWh/d = kilowatt hora producidos al día

\$/kWh = Precio del kilowatt hora para la ciudad de México

Para el precio de los kilowatt hora se tomará el del horario base<sup>(CFE)</sup> que es de 0.3451\$/kWh, por lo tanto, el tiempo de retorno de la inversión será:

$$TRI = \frac{20981858.2}{\left[ (428428.5)(365) \right] (0.3451) \left( \frac{1}{9.5} \right)} = 3.7 \text{ años}$$

Para poder conocer a partir de qué cantidad de desechos sólidos que se alimenten al digestor la planta será rentable se tiene que realizar un estudio para las diferentes cantidades de desechos sólidos tipo orgánico y así obtener los precios de los equipos, ya que estos pueden variar su tamaño.

A continuación se muestra una tabla en la cual se compara el costo total de la inversión la cantidad de alimentación y el tiempo de recuperación de la inversión (TRI).

Cantidad alimentada (tón).	Costo de la inversión (dólares)	TRI (años)
800	20,981,858.16	3.7
700	20,213,653.50	4.1
600	17,168,144.58	4.0
500	15,099,439.72	4.3
400	13,155,283.76	4.6
300	11,783,006.37	5.5
200	9,285,740.63	6.5
100	6,046,907.08	8.5

Nota: En el presente trabajo se contempla una estimación de los costos del diseño preliminar puesto que la misma está basada únicamente en la información con la que se cuenta antes del diseño real del equipo de la planta y la ingeniería de detalle. Así mismo se mencionan las condiciones climáticas que se presentan en la zona y se hacen las sugerencias pertinentes para la mejor implementación y funcionalidad de la planta tomando en cuenta la seguridad de la misma y del personal que se ocupará de ella.

## **Capítulo 7**

### **CONCLUSIONES**

Este prediseño se elaboró con la intención de servir de ejemplo para demostrar la utilidad de esta tecnología como una alternativa para disminuir el problema de contaminación que provocan los desechos sólidos, en este caso los residuos sólidos municipales, en su fracción orgánica.

Además, esta tecnología también representa una vía alterna para la obtención de combustibles renovables, como el metano que pudiera ser utilizado en la Central de Abasto del Distrito Federal para el autoabastecimiento de las necesidades energéticas del lugar.

La eficiencia de esta tecnología en la resolución de problemas en materia del medio ambiente, especialmente su funcionalidad en este caso, será el medio de difusión más eficaz, para que en el corto o mediano plazo, se generalice la implantación de esta sencilla tecnología, al menos en todos los mercados del país, y probablemente, más adelante, en todos los hogares, contribuyendo así a la disminución del consumo de combustibles no renovables y al gran problema de disposición de desechos que afecta al país.

La generación de Biogás en el Distrito Federal a partir de desechos orgánicos representa una excelente alternativa de disminución de desechos, pues los esfuerzos irían dirigidos a los sitios de origen de estos desechos, como lo son los mercados, eliminando así muchos de los problemas que enfrentan los programas de reciclaje, pues al estarse obteniendo la materia prima antes de mezclarse con desechos inorgánicos, no se requeriría de un proceso previo de separación, además de que por ser desechos orgánicos, no representarían ninguna amenaza para los pepenadores.

De las experiencias en otros países se concluye que es indispensable contar con la presencia de expertos en la materia para que las cosas salgan bien. También es necesario crear un programa masivo de concienciación, un fuerte apoyo por parte del gobierno, que se traduzca en programas de financiamiento y por supuesto, un buen plan de promoción y disseminación, el cual no sólo hable de los beneficios ambientales que conlleva, sino que además enfatice los beneficios económicos de la tecnología del biogás. Una excelente medida es la tomada por el gobierno Danés: cobrar impuestos por la energía producida con combustibles fósiles y exentar de impuestos a las fuentes renovables de energía.

A pesar de que los aspectos científicos de la biogasificación se conocen muy bien y de que se han desarrollado y propuesto diseños de bajo costo, la biogasificación todavía tiene un largo camino que recorrer antes de que se reconozca como competitivo con el compostaje. La distancia es aún mayor con respecto a los RSM. En este momento, se podría decir que el estatus de la biogasificación está al nivel del compostaje en los 1970's. Aunque algunos digan lo contrario, la experiencia práctica con la biogasificación ha sido muy limitada. El problema es que la suficiente experiencia práctica es el prelude necesario para un progreso significativo. El futuro es más brillante porque la energía inevitablemente se volverá menos abundante y en consecuencia será más cara. Aunque la recuperación porcentual de energía de los desechos no pueda igualar a la de la incineración, los problemas ambientales y de costos son mucho menos y de menor intensidad.

El sector energético nacional ha sido y seguirá siendo pilar de nuestro desarrollo presente y futuro. Su expansión constante y modernización en algunas de sus partes, han permitido generar una oferta sólida y diversificada de energéticos, que además aporta importantes recursos públicos para la satisfacción de apremiantes necesidades sociales y de infraestructura. Por otro lado, está también la necesidad de hacer compatible la presencia de recursos financieros limitados con las relaciones de interdependencia productiva entre las diferentes industrias del sector. En este sentido, y a manera de ejemplo, sin una oferta confiable de gas natural será imposible la expansión de la industria eléctrica a partir de las modernas tecnología de generación de ciclo combinado, las cuales hacen uso intensivo de este combustible. Otra variable importante para la planeación del sector son las medidas que en materia de medio ambiente se han ido asumiendo, consecuencia de una visión que toma en cuenta el desarrollo sustentable del país. En algún momento las metas de expansión de la oferta de energía se verán limitadas por las metas de reducción en la emisión de contaminantes, por ello es preciso conciliar entre ambas a fin de permitirle al sector seguir cumpliendo su papel de proveedor de insumos indispensables para la competitividad y el desarrollo económico y social, pero en forma más limpia y eficiente.

Con todo lo anterior en mente, es evidente que la tecnología del Biogás sería de enorme utilidad en México. También es importante reconocer que:

El sector energético es fuente indispensable de insumos primarios para todas las actividades económicas. Su desarrollo es necesario también para llevar a cabo la mayor parte de las actividades sociales, desde la educación hasta el esparcimiento de la población. Por ello, aun cuando la política económica del país garantice finanzas públicas sanas, estabilidad en los mercados y una tasa sostenida

de crecimiento, el desarrollo económico y social del país quedarán comprometidos de no contar con insumos energéticos oportunos, en cantidades suficientes y suministrados bajo las mejores condiciones de calidad y costo. A pesar de las acciones emprendidas a la fecha para impulsarlo, hoy más que nunca el futuro del sector energético nacional está en juego. Por un lado, la evolución demográfica y económica del país se traducen en una demanda creciente de energía, y los requerimientos de inversión para hacerle frente son cada vez mayores. Por otro lado, en el ámbito internacional se vive una revolución en materia energética que no tiene precedente. El desarrollo tecnológico avanza a gran velocidad y provee muchas oportunidades para incrementar la eficiencia al interior de las distintas áreas que componen a la industria de la energía. Las nuevas tecnologías de información y el proceso continuo de globalización están eliminando barreras para la integración de empresas de distintas partes del mundo y abren cada vez más horizontes para la participación del sector privado en el sector.

Las empresas internacionales de energía se actualizan día a día y evolucionan para convertirse en proveedoras de servicios energéticos integrales. Es decir, pasan de ser meros suministradores de energéticos a ser organismos que se adaptan a los cambios en el mercado global y ofrecen a sus clientes opciones de servicio que van, desde la simple provisión de electricidad, hasta servicios de asesoría sobre como ahorrar energía o la creación de esquemas financieros para suavizar las fluctuaciones en el gasto por consumo energético.

Es evidente que la inversión que se tendría que realizar para arrancar como una posibilidad real la tecnología del Biogás en México, es grande, sin embargo, los beneficios también son muy grandes e importantes, por lo tanto, se justifica.

Es importante aprovechar el conocimiento de las experiencias que han tenido otros países en este sentido, para no cometer los mismos errores y, sobre todo, para consolidar a la tecnología del Biogás como un importante sector para la sociedad.

## **Capítulo 8**

### **BIBLIOGRAFÍA**

1. Diaz, L.F. "Energy Recovery through Biogasification of Municipal Solid Wastes and Utilization of Thermal Wastes from an Energy-Urban-Agro-Waste Complex." Doctoral Dissertation, University of California, Berkeley (1976).
2. Diaz, L.F. "Overview of Selected U.S. Methane Recovery Installations," in Proc. 1979 Biogas, Alcohol Seminar, Chicago, October 1979.
3. Pfeffer, J.T. and J.C. Liebman. "Biological Conversion of Organic Refuse to Methane" annual report, NSF/RANN/Se/GI-39191/75/2, Dept. C.E., University of Illinois, Urbana report, UIIU-ENG-75-2019, September 1975.
4. Jewell, W.J. "Future Trends in Digester Design," in *Proc. of the First Int. Symp. On Anaerobic Digestion*, Cardiff, Wales, Applied Science Publishers Ltd. London.
5. Kayhanian, M., L. Linderauer, S. Hardy, and G. Tchobanoglous, "Two-Stage Process Combines Anaerobic and Aerobic Phases," *BioCycle*, 32(3): 48-53 (March 1981).
6. Gotaas, H.B. *Composting – "Sanitary Disposal and Reclamation of Organic Wastes"*, WHO Monograph Series No. 31 (1956).
7. Golueke, C.G. "Composting Manure by Anaerobic Methods," *Compost Sci.*, 1(1): 44-45 (Spring 1960).
8. Golueke, C.G. *"Composting: A Study of the Process and It's Principles"* (Emmaus, PA: Rodale Press, 1972).
9. El-Hawagi, M.M., Ed. *"Biogas Technology, Transfer, and Disposal"* (New York: Elsevier, 1984).
10. Singh, R.B. *"Bio-Gas Plant Generating Methane from Organic Waste"* Gobar Gas Research Station, Ajitmal, Etawah, India.
11. Blobaum, R. "Biogas Production in China," in *Biogas and Alcohol Production* (Emmaus, PA: J.G. Press, 1980).
12. Babbitt, H.E. *"Sewerage and Sewage Treatment"*, 6<sup>th</sup> ed. (New York: John Wiley & Sons, 1947).
13. Babbitt, H.E., B.J. Leland, and F.B. Whitley, Jr. "The Biological Digestion of Garbage with Sewage Sludge," Bull. No. 287, Engineering Experiment Station, University of Illinois, Urbana, November (1936).
14. Fair G.M., J.C. Geyer, and D.A. Okun, *"Elements of Water Supply and Wastewater Disposal"*, 2<sup>nd</sup> ed. (New York: John Wiley & Sons, 1971).
15. Holmes, J. R. *"Practical Waste Management"* (New York: John Wiley & Sons, 1983).
16. Flynn, N.W., M. Guttman, J. Hahn, and J.R. Payne. *"Trace Chemical Characterization of Pollutants Occurring in the Production of Landfill Gas from the Shoreline Regional Park Sanitary Landfill, Mountain View, California"*, Prepared for the Pacific Gas and Electric Co., and the U.S. Department of Energy by Science Applications, Inc. (1981).
17. Ham, R.K. et al. "Recovery, Processing and Utilization of Gas from Sanitary Landfills," EPA-600/2-79-001, U.S. EPA, Cincinnati, OH (1979).
18. Zimmerman, R.E., G.R. Lytynshyn, and M.L. Wilkey. "Landfill Gas Recovery – A Technology Status Report". NTIS #DE84-01194, ANL/CNSV-TM-12 (August 1983).
19. Wilkey M.L., R.E. Zimmerman, and H.R. Isaacson. "Methane from Landfills: Preliminary Assessment Workbook", Argonne National Laboratory Report ANL/CNSU-31 (1982).
20. Diaz L.F., G.M. Savage, and C.G. Golueke. *"Resource Recovery from Municipal Solid Wastes"* (Boca Raton, FL: CRC Press, 1982).
21. Haxo, H.E. et al. "Lining of Waste Impoundment and Disposal Facilities," SW-870, U.S. EPA, Cincinnati, OH (1983).

22. Henze, Morgan, "Waste design for households with respect to water, organics and nutrients", *Water, Science & Technology*, Vol. 35, No. 9, pp. 113-120, 1997.
23. Harremoës, Paul, "Integrated water and waste management", *Water, Science & Technology*, Vol. 35, No. 9, pp. 11-20, 1997.
24. Secretaría de Desarrollo Social, "Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente 1991-1992". México 1993.
25. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, "Estadísticas del Medio Ambiente", México 1994.
26. Instituto Nacional de Recicladores INARE, "El Reciclaje en México", Marzo 1996, México.
27. Grupo Bio, "Programa Interno de Recuperación de Papel", México 1996.
28. Arvizu F., José Luis y Ana María Martínez L., "Aprovechamiento de residuos sólidos urbanos enterrados en rellenos para generación de electricidad", análisis de bibliografía, IIE/10/14/3128/I-01/P, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, marzo de 1991.
29. Arvizu F., José Luis y Ana María Martínez L., "Informe sobre biogás", IIE/10/14/3128/I-02/P, primera parte del Informe del Convenio de Ahorro y Uso Racional de la Energía Eléctrica, CFE, LyFC y DDF, abril de 1991.
30. Arvizu F., José Luis y Ana María Martínez L., "Pruebas de laboratorio de las muestras obtenidas por sondeo de los sitios de Santa Cruz Meyehualco y Santa Fe", IIE/10/14/3128/I-03/P, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, octubre de 1991.
31. Arvizu F., José Luis y Ana María Martínez L., "Planta piloto para la generación de electricidad con biogás del relleno de Santa Cruz Meyehualco", IIE/10/14/3128/I-04/P, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, noviembre de 1991.
32. Arvizu F., José Luis y Ana María Martínez L., "Evaluación de la factibilidad de generación eléctrica con el biogás generado en rellenos de desechos sólidos urbanos", IIE/10/14/3128/I-05/F, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, diciembre de 1991.
33. Arvizu F., José Luis, "Estudio de evaluación de las emisiones de biogás y caracterización de la potencia energética que se puede obtener del relleno Prados de la Montaña del Departamento del Distrito Federal", IIE/14/6100/SER003/95, Instituto de Investigaciones Eléctricas, para la Dirección de Cogeneración y Fuentes No Convencionales de Energía de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, Cuernavaca, enero de 1995.
34. Arvizu F., José Luis, "Waste", Preliminary National Inventory of Greenhouse Gas: Mexico, UNEP Project GF/4102-92-01 (PP/3011) UNEP/Semamap/US Country Studies Program, Septiembre de 1995.
35. Arvizu F., José Luis, "Experiencia de México con el uso de gas de rellenos", Seminario Europeo Latinoamericano sobre Aprovechamiento Energético de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) auspiciado por OLADE/UE, Quito, Ecuador, 29 y 30 de octubre de 1996.
36. Arvizu F., José Luis, Javier Siqueiros A., Carlos Ramos B. y Juan del Ángel B., "Ingeniería de los rellenos sanitarios de residuos sólidos municipales", IIE/01/14/10820/I-01/P, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, 1997.
37. Arvizu F., José Luis, "Impacto de los rellenos sanitarios con la emisión de gases tóxicos a la atmósfera", IIE/01/14/10820/I-04/P, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, 1997.
38. Forbes, Charles D. y Larry E. Ruiz, "Landfill gas-to-energy training workshop", presentado para el US Environmental Protection Agency, World Trade Center, México, 24 y 25 de septiembre de 1997.
39. Medrano V., Consolación y José Luis Arvizu F., "Estudio de mercado de los rellenos sanitarios", IIE/01/14/10820/I-03/P, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, 1997.
40. Rathje, William L., "Once and future landfills", *National Geographic*, mayo de 1991.

41. Secretaría de Energía (LUIS TÉLLEZ K., Secretario de Energía) "El sector energía en México, Análisis y prospectiva", Secretaría de Energía, México, 2000.
42. Tchobanoglous, George, Hilary Theisen, et al. "Gestión integral de residuos sólidos vol. I y II." Trad. de Juan Ignacio Tejero Monzón, José Luis Gil Díaz y Marcel Szanto Narea, España, Mc Graw-Hill, 1994.
43. Álvarez Fúster, Constantino Dr., editor. "Diseño de equipo, tanques y recipientes", 2ª. Ed. México, UNAM-Facultad de Química, 1995. (Cuadernos de posgrado, 25).
44. Foust, S. Alan, Leonard A. Wenzel, et al. "Principios de operaciones unitarias", 2ª. Reimpresión. Trad. del Ing. Francisco Torres Roldán, México, CECSA, 1989.
45. H. Perry, Robert, ed. "Perry's Chemical Engineers Handbook", 6ª. Ed., USA, Mc Graw-Hill, 1988.
46. Popper, "Modern Costs – Engineering Techniques" USA, Mc Graw-Hill, 1970.

## **APÉNDICE**

Datos típicos sobre peso específico y contenido de humedad para residuos domésticos, comerciales, industriales y agrícolas

Tipos de residuos	Peso específico, kg/m <sup>3</sup>		Contenido de humedad, porcentaje en peso	
	Rango	Típico	Rango	Típico
Domésticos (no compactados)				
Residuos de comida (mezclados)	131-481	291	50-80	70
Papel	42-131	89	4-10	6
Cartón	42-80	50	4-8	5
Plásticos	42-131	65	1-4	2
Textiles	42-101	65	6-15	10
Goma	101-202	131	1-4	2
Cuero	101-261	160	8-12	10
Residuos de jardín	59-225	101	30-80	60
Madera	131-320	237	15-40	20
Vidrio	160-481	196	1-4	2
Latas de hojalata	50-160	89	2-4	3
Aluminio	65-240	160	2-4	2
Otros metales	131-1,151	320	2-4	3
Suciedad, cenizas, etc.	320-1,000	481	6-12	8
Cenizas	650-831	745	6-12	6
Basuras	89-181	131	5-20	15
Residuos de jardín domésticos				
Hojas (sueltas y secas)	30-148	59	20-40	30
Hierba verde (suelta y húmeda)	208-297	237	40-80	60
Hierba verde (húmeda y compactada)	593-831	593	50-90	80
Residuos de jardín (triturados)	267-356	297	20-70	50
Residuos de jardín (compostados)	267-386	326	40-60	50

Tipos de residuos	Peso específico, kg/m <sup>3</sup>		Contenido de humedad, porcentaje en peso	
	Rango	Típico	Rango	Típico
<b>Urbanos</b>				
En camión compactador	178-451	279	15-40	20
En vertedero				
Medianamente compactados	362-498	451	15-40	25
Bien compactados	590-742	600	15-40	25
<b>Comerciales</b>				
Residuos de comida (húmedos)	475-950	540	50-80	70
Aparatos	148-202	181	0-2	1
Cajas de Madera	110-160	110	10-30	20
Podas de árboles	101-181	148	20-80	5
Basura (combustible)	50-181	119	10-30	15
Basura (no combustible)	181-362	300	5-15	10
Basura (mezclada)	139-181	160	10-25	15
<b>Construcción y demolición</b>				
Demolición mezclados (no combustible)	1000-1600	1421	2-10	4
Demolición mezclados (combustible)	300-400	360	4-15	8
Construcción mezclados (combustible)	181-360	261	4-15	8
Hormigón roto	1198-1800	1540	0-5	-
<b>Industriales</b>				
Lodos químicos (húmedos)	801-1101	1000	75-99	80
Cenizas volantes	700-900	800	2-10	4
Restos de cuero	100-250	160	6-15	10
Chatarra metálica (pesada)	1501-2000	1780	0-5	-
Chatarra metálica (ligera)	498-900	740	0-5	-
Chatarra metálica (mezclada)	700-1500	900	0-5	-
Aceites, alquitranes, asfaltos	801-1000	950	0-5	2
Aserrín	101-350	291	10-40	20
Residuos textiles	101-220	181	6-15	10
Madera (mezclada)	400-676	498	30-60	25
<b>Agrícolas</b>				
Agrícolas (mezclados)	30-148	59	20-40	30
Animales Muertos	208-297	237	40-80	60
Residuos de frutas (mezclados)	593-831	593	50-90	80
Estiércol (húmedo)	267-356	297	20-70	50
Residuos de vegetales (mezclados)	267-386	326	40-60	50

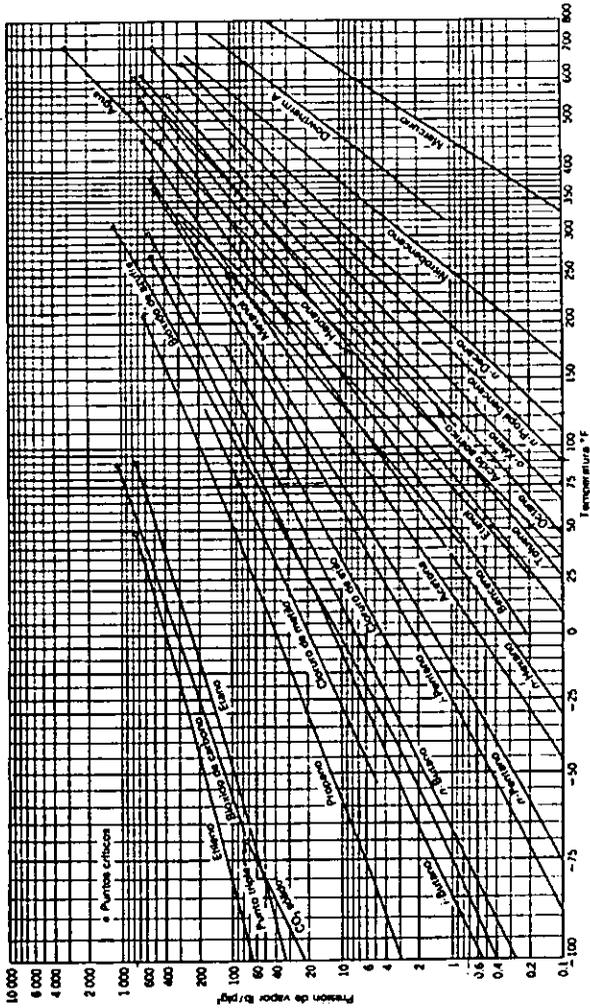
Composición física de los RSU domésticos, excluyendo materiales reciclados y residuos de comida desechados con las aguas residuales (1990)

Tipos de residuos	Estados Unidos		Materiales de embalaje	Davis, California
	Rango	Típico		
Orgánicos				
Residuos de comida	6-8	9.0	-	6.0
Papel	25-40	34.0	50-60	33.1
Cartón	3-10	6.0	12-16	7.9
Plásticos	4-10	7.0	-	10.7
Textiles	0-4	2.0	-	2.4
Goma	0-2	0.5	-	2.5
Cuero	0-2	0.	-	0.1
Residuos de jardín	5-20	18.5	-	17.7
Madera	1-4	2.0	4-8	5.0
Orgánicos misceláneos	-	-	-	0.4
Inorgánicos				
Vidrio	4-12	8.0	20-30	5.8
Latas de hojalata	2-8	6.0	6-8	3.9
Aluminio	0-1	0.5	2-4	0.4
Otros metales	1-4	3.0	-	3.6
Suciedad, cenizas, etc.	0-6	3.0	-	0.5
Total	100.0			100.0

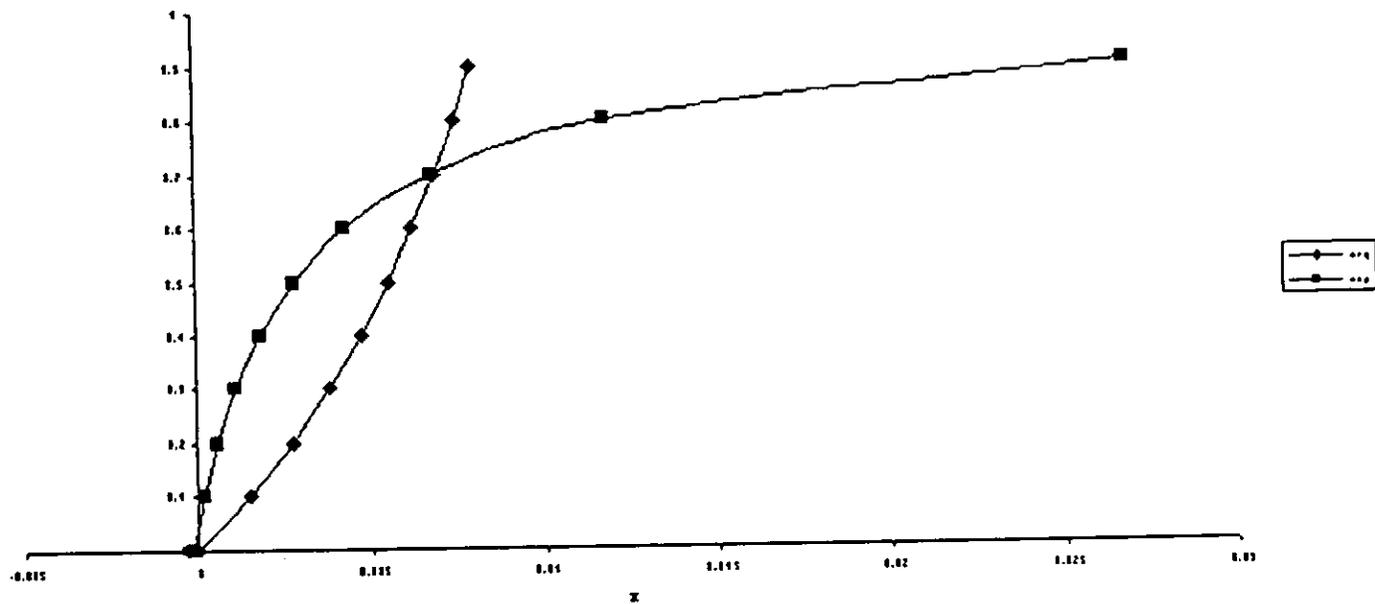
Datos típicos sobre el análisis elemental del material combustible presente en los residuos sólidos domésticos, comerciales e industriales

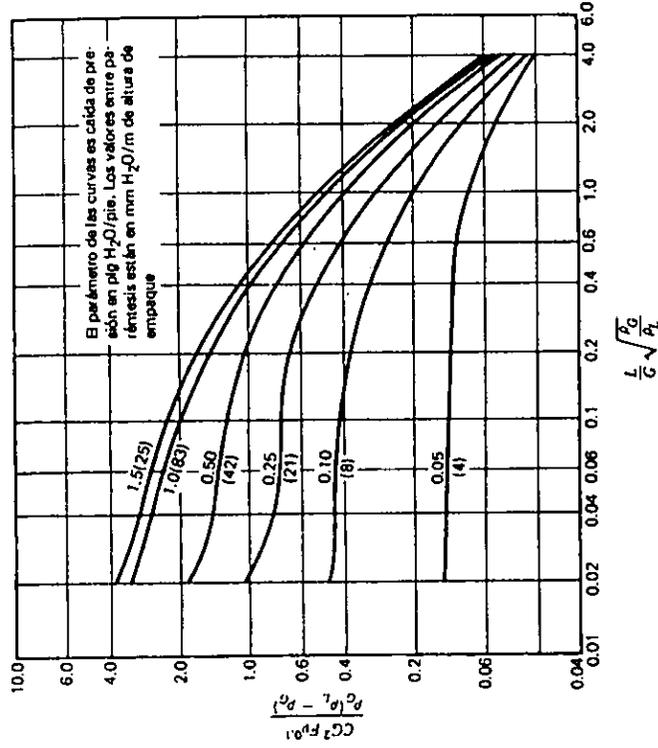
Tipos de residuos	Porcentaje en peso (base seca)					
	Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre	Cenizas
Comida y prod. de comida						
Grasas	73.0	11.5	14.8	0.4	0.1	0.2
Residuos de c. (mezclados)	48.0	6.4	37.6	2.6	0.4	5.0
Residuos de frutas	48.5	6.2	39.5	1.4	0.2	4.2
Residuos de carne	59.6	9.4	24.7	1.2	0.2	4.9
Productos de papel						
Cartón	43.0	5.9	44.8	0.3	0.2	5.0
Revistas	32.9	5.0	38.6	0.1	0.1	23.3
Papel de periódico	49.1	6.1	43.0	<0.1	0.2	1.5
Papel (mezclado)	43.4	5.8	44.3	0.3	0.2	6.0
Cartones encerados	59.2	9.3	30.1	0.1	0.1	1.2
Plásticos						
Plásticos (mezclados)	60.0	7.2	22.8	-	-	10.05.01
Poliétileno	85.2	14.2	-	<0.1	<0.1	0.4
Poliestireno	87.1	8.4	4.0	0.2	-	0.3
Poliuretano	63.3	6.3	17.6	6.0	<0.1	4.3
Policloruro de vinilo	45.2	5.6	1.6	0.1	0.1	2.0
Textiles, goma, cuero						
Textiles	48.0	6.4	40.0	2.2	0.2	3.2
Goma	69.7	8.7	-	-	1.6	20.0
Cuero	60.0	8.0	11.6	10.0	0.4	10.0
Madera, árboles, etc.						
Residuos de jardín	46.0	6.0	38.0	3.4	0.3	6.3
Madera (verde)	50.1	6.4	42.3	0.1	0.1	1.0
Maderas duras	49.6	6.1	43.2	0.1	<0.1	0.9
Madera mezclada	49.5	6.0	42.7	0.2	<0.1	1.5
Viruta de madera mezclada	48.1	5.8	45.5	0.1	<0.1	0.4
Vidrio, metales, etc.						
Vidrio y mineral	0.5	0.1	0.4	<0.1	-	98.9
Metales (mezclados)	4.5	0.6	4.3	<0.1	-	90.5
Misceláneos						
Barreduras de oficina	24.3	3.0	4.0	0.5	0.2	68.0
Aceites, pinturas	66.9	9.6	5.2	2.0	-	16.3
Combustibles derivado de residuos (CDR)						
	44.7	6.2	38.4	0.7	<0.1	9.9

Presiones de vapor de líquidos comunes (Con permiso de McGraw Hill; Copyright 1950.) ( $T^{\circ}F = 1.8T^{\circ}C + 32$ ;  $lb/plg^2 = 6.8948 \text{ kN/m}^2$ .)



curvas de comparación y equilibrio





Velocidades de inundación y caída de presión en torres empacadas (Cortesia de the Norton Co.)

Características físicas de empaques comerciales secos.\*

Empaque	% Vacío ( $\epsilon$ )	Superficie específica ( $a_v$ ) ft <sup>2</sup> /ft <sup>3</sup>	Factor de empaque F	Nitrógeno
<b>Anillo Raschig de cerámica</b>				
¼ plg	73	240	1600	46
½	63	111	580	54
1	73	58	155	40
2	74	28	65	38
<b>Anillos metálicos Raschig (1/16 plg de pared)</b>				
½ plg	73	118	410	132
1	85	57	137	71
2	92	31.4	57	37
<b>Albardillas Berl</b>				
¼ plg	60	274	900	56
½	63	142	240	54
1	69	76	110	45
2	72	32	45	40
<b>Anillos Pall</b>				
1 plg	93.4	66.3	48	33
2	94.0	36.6	20	27.5
<b>Ciclohelicoidal y espiral simple</b>				
3 ¼ plg	58	40		60
4	60	32		61
6	66	21		59

