



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**



**FACULTAD DE QUÍMICA**

**INGENIERÍA CONCEPTUAL DE UNA  
PLANTA GENERADORA DE BIOGÁS**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

INGENIERO QUÍMICO

**PRESENTA**

**IVÁN BERNAL SANTANA**

**MÉXICO, D. F.**

**2008**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

Jurado asignado:

**Profesores**

Presidente **Reynaldo Sandoval González**

Vocal **José Agustín Texta Mena**

Secretario **Humberto Rangel Dávalos**

1er. Suplente **Alfonso Durán Moreno**

2do. Suplente **Abraham Rodrigo Flores Ramos**

Sitio en donde se desarrolló el tema:

Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México.

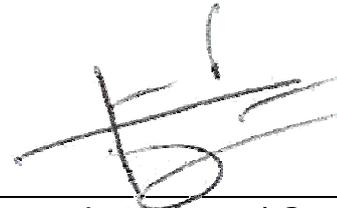
Asesor del tema



---

Ing. Quím. Humberto Rangel Dávalos

Sustentante



---

Iván Bernal Santana

## Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todas las personas que han revisado el material y formalmente proporcionado retroalimentación valiosa, en especial a mi asesor, el Ingeniero Químico Humberto Rangel Dávalos, quién siempre estuvo en la mejor disposición de ayudarme durante la elaboración de este material.

También quiero agradecer a las personas que me han brindado su confianza, experiencia y apoyo de forma incondicional a lo largo de todos estos años: profesores, familiares, amigos y compañeros de trabajo, personas con las cuales siempre estaré en deuda, les pido una disculpa por no mencionar a todos.

Quiero hacer una mención especial y dedicar este trabajo a las tres personas, la Sra. Oralia Santana, la Sra. Delfina Ayala y el Ing. Uranio Arredondo.

## Organización del material

Traté de organizar el material de una forma simple, iniciando con un panorama general del biogás (usos, definición, comparación con otros combustibles, etc.) además de proporcionar sobre su producción incluyendo algunos datos técnicos, pasando al capítulo tres y sabiendo cual es la parte más importante del proceso de generación de biogás, encontrará toda la información referente al reactor químico (biodigestor, en nuestro caso). El capítulo cuatro muestra las tecnologías para la generación de biogás en otros países, tomándolo como referencia, en el capítulo cinco se hace la selección técnico-económica del proceso más adecuado, una vez seleccionado el proceso se elabora el diagrama de flujo de proceso (DFP) y la lista de equipos con predimensionamiento, capítulos seis y siete, respectivamente. En el capítulo ocho se encontrarán medidas de seguridad y protección al ambiente y por último se mencionan las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo.

## CONTENIDO

### INTRODUCCIÓN

#### CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1.	Definición de biogás -----	9
1.2.	Composición del biogás -----	10
1.3.	Comparación del biogás con otros combustibles -----	11
1.4.	Beneficios del uso de una tecnología de biogás -----	11
1.5.	Producción de biogás -----	13
1.6.	Parámetros que influyen en la generación de biogás -----	15

#### CAPÍTULO 2. PROCESOS DE GENERACIÓN DE BIOGÁS

2.1.	Características del digestor -----	19
2.2.	Tipos de digestores -----	20

#### CAPITULO 3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PROCESOS DE GENERACIÓN DE BIOGÁS

3.1.	Características de procesos exitosos -----	25
3.2.	Características de procesos que han fracasado -----	25
3.3.	Tecnología BDP -----	27
3.4.	Tecnología Pfeffer's -----	34
3.5.	Tecnología Nord GmbH -----	36
3.6.	Casco Inc -----	38
3.7.	Haubenschild Farms, Inc. -----	40
3.8.	Finnie Distributing, Inc. -----	42

CAPÍTULO 4.	SELECCIÓN TÉCNICA-ECONÓMICA DEL PROCESO MÁS ADECUADO DE GENERACIÓN DE BIOGÁS	
4.1.	Estudio general de mercado -----	43
4.2.	Localización de la planta -----	55
4.3.	Estudio de factibilidad técnica-económica -----	63
CAPÍTULO 5.	DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO (DFP) SELECCIONADO	
5.1.	Notas -----	70
5.2.	Diagrama de flujo del proceso -----	71
CAPÍTULO 6.	LISTA DE EQUIPOS CON PREDIMENSIONAMIENTO	
6.1.	Transformación química: Reactor -----	72
6.2.	Desintegración mecánica: Triturador -----	79
6.3.	Separación fraccionada de sólidos: Clasificador -----	80
6.4.	Movimiento de fluidos: Bombas, Sopladores y Compresores -----	83
6.5.	Contacto de las fases: Mezclador -----	85
6.6.	Separación sólido-líquido: Filtración -----	89
6.7.	Disolución selectiva de un gas: Absorción -----	92
6.8.	Transferencia de calor: Cambiadores de calor -----	93
CAPÍTULO 7.	SEGURIDAD Y PROTECCIÓN DEL AMBIENTE	
7.1.	Consideraciones de seguridad -----	97
7.2.	Disposición de efluentes -----	98
	CONCLUSIONES -----	100
	RECOMENDACIONES -----	101
	ANEXOS -----	102
	REFERENCIAS -----	107

## INTRODUCCIÓN

El ambiente mundial y las limitaciones de recursos probablemente hagan que se recrudezcan los costos. Los esfuerzos por solucionar el problema a largo plazo del calentamiento de la atmósfera han sido tímidos y parciales hasta el momento, y seguramente serán pocos los países que logren cumplir con las metas de control de las emisiones de carbono en el período 2008–12 según lo dispuesto en el Protocolo de Kyoto. Las consecuencias económicas que podría tener a largo plazo el cambio climático son un problema cada vez más reconocido y suscitan creciente interés mundial en medidas de control de las emisiones, que inevitablemente encarecerán la actividad comercial, aunque impedirán secuelas a largo plazo mucho más graves. Las dimensiones económicas del cambio climático estima que costaría alrededor de 1% del PIB por año estabilizar las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, en tanto que a largo plazo la inacción costaría como mínimo 5% del consumo mundial, y los efectos estarían concentrados en los países tropicales de ingreso más bajo. Más allá de las consecuencias ambientales, los costos marginales de la producción de energía ya están subiendo porque los yacimientos petroleros más fáciles de explotar que no pertenecen a uno de los pocos grandes productores ya se están agotando, y la producción fuera de la OPEP tendrá que concentrarse en plataformas marítimas mucho más costosas o en yacimientos de baja calidad y difícil extracción como las arenas asfálticas.

Las condiciones socioeconómicas y geográficas de la mayor parte del territorio mexicano, hacen impráctico y costoso satisfacer las fuentes convencionales de energía (electricidad, derivados del petróleo) utilizadas en forma centralizada, las necesidades energéticas de las áreas rurales. La riqueza de los campos de biomasa de todos los tipos permite identificar alternativas para que

estos sectores solucionen su necesidad básica de suministro de energía.

Una de las muchas soluciones alternativas capaz de resolver los problemas de demanda energética actual y futura está en las plantas de biogás, las que pueden operar a partir de casi toda la materia orgánica, y especialmente de residuos agrícolas, así como de desechos de animales y humanos. Por medio de este proceso se obtienen gas combustible y fertilizantes, resolviendo al mismo tiempo los problemas ambientales y sanitarios al convertir desechos que hacen proliferar larvas y moscas, en recursos útiles.

## **CAPÍTULO 1. GENERALIDADES**

### **1.1. Definición de biogás**

El biogás es una mezcla de gases cuyos principales componentes son el metano y el bióxido de carbono, el cual se produce como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire, por la acción de un grupo de microorganismos.

Cuando esta mezcla de gases se produce en forma natural, se le llama "gas de los pantanos"; fue descubierto y reportado por Shirley en 1667. Volta fue el primero en reconocer una relación entre el gas de los pantanos y la vegetación en descomposición en el fondo de los lagos.

En 1808 Sir Humphrey Davy colectó el metano e inició la experimentación que puede considerarse como el principio de la investigación en este campo, sin embargo su interés no estaba enfocado a resolver problemas de energía sino hacia la producción agrícola.

Entre 1883 y 1884 Pauster concluyó que la fermentación de estiércol en ausencia de aire producía un gas que podía ser usado para calefacción e iluminación.

En 1896 el biogás fue usado en el alumbrado de una calle en Exeter, Inglaterra, siendo esta su primera aplicación importante.

En la naturaleza se encuentra una gran variedad de residuos orgánicos a partir de los cuales puede obtenerse biogás, entre ellos se encuentran: los desechos provenientes de animales domésticos como vacas, cerdos y aves, excretas humanas, residuos vegetales como pajas, pastos y hojas secas, y basuras domésticas. En la tabla 1.1 se dan algunos ejemplos de los desechos que pueden ser utilizados para producir biogás.

<b>Tipo de residuo orgánico</b>	<b>Ejemplos</b>
Desechos animales	Estiércoles, desechos alimenticios, orina, etc.
Residuos agrícolas	Semillas, pajas, bagazo de caña, etc.
Desechos de rastros	Sangre, carne, desechos de pescado, etc.
Residuos agroindustriales	Aserrín, desechos de tabaco, cascarillas de arroz, desechos de frutas y vegetales, etc.
Residuos forestales	Ramas, hojas, cortezas, etc.

Tabla 1.1. Desechos agrícolas y animales con potencial para producir metano.

## 1.2. Composición del biogás

La composición del biogás depende del tipo de desecho utilizado y las condiciones en que se procesa. En promedio su composición es la siguiente:

<b>Compuesto</b>		<b>Porcentaje</b>
Metano	CH <sub>4</sub>	54-70%
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	27-45%
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	1-10%
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0.5-3%
Ácido sulfhídrico	H <sub>2</sub> S	0.1%

Tabla 1.2. Composición del biogás. Fuente: Mandujano, Biogás energía y fertilizantes a partir de desechos orgánicos.

El biogás, con su alto contenido de metano, es una fuente de energía que puede usarse para cocinar, iluminar, generar calor, operar maquinaria, bombear agua o generar energía eléctrica. En la tabla 1.3 se muestra el valor combustible del biogás en comparación con otros combustibles.

### 1.3. Comparación del biogás con otros combustibles

Combustible	kcal/m <sup>3</sup>	Kcal/kg	Cantidad equivalente a 1000 m <sup>3</sup> de biogás / m <sup>3</sup>
Biogás	5335		1000
Gas natural	9185		581
Metano	8847		603
Propano	22052		242
Butano	28588		187
Electricidad	860 kcal/kWh		6203kWh
Carbón		6870	776kg
Petróleo		11357	470kg (553 L)
Combustóleo		10138	5262kg (528 L)

Tabla 1.3. Valores promedio del poder calorífico de diferentes combustibles y su equivalente referido al biogás. Fuente: Mandujano, Biogás energía y fertilizantes a partir de desechos orgánicos.

### 1.4. Beneficios del uso de una tecnología de biogás

La mayoría de los confinamientos de estiércol y desperdicios orgánicos como líquidos, semisólidos, o sólidos pueden ser almacenados en lagos, cisternas, tanques y otras estructuras contenedoras. Estas estructuras comúnmente son diseñadas para cumplir con las regulaciones ambientales locales, estatales y federales, lo cual representa un costo de producción necesario.

Las tecnologías de biogás pueden ser ambiental y socialmente amigables, además de tener muchas ventajas costo-beneficio si se tiene una buena administración de los residuos. Las tecnologías de biogás que usan la digestión anaerobia de biomasa dan como resultado biogás, abono y una disminución en el olor de los efluentes. La digestión anaerobia de biomasa usando las tecnologías de biogás se reduce significativamente la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), niveles de patógenos, eliminan olores nocivos; y convierten la

mayoría del nitrógeno orgánico en nitrógeno inorgánico el cual es disponible para los vegetales.

Las principales razones a considerar en la instalación de un sistema de biogás para un inversionista son:

- *Una alternativa energética.* Ahorro en el consumo mensual de energía para los consumidores actuales de electricidad y gas.
- *Reducción de olores ofensivos derivados de un manejo y almacenamiento inadecuado de biomasa.* Estos olores deterioran la calidad del aire y pueden causar molestias a comunidades cercanas. Los sistemas de biogás reducen estos olores ofensivos debido a los ácidos orgánicos volátiles, los olores que causan estos compuestos son consumidos por las bacterias que producen el biogás.
- *Alta calidad de los fertilizantes.* En el proceso de una digestión anaerobia, el nitrógeno orgánico en la biomasa es, en su mayoría, convertido en amonio. El amonio es el principal constituyente del fertilizante comercial, el cual es utilizado por las plantas.
- *Reduce la contaminación de la superficie y mantos acuíferos.* Los efluentes del digestor son más estables e inofensivos que los residuos que no se tratan.
- *Reducción de patógenos.* Los digestores acondicionados con calentamiento reducen dramáticamente la población de bacterias patógenas en pocos días. Los digestores de lote aíslan del medio a las bacterias patógenas hasta matarlas por el proceso completo de almacenamiento.

Las tecnologías de biogás pueden mejorar la rentabilidad y al mismo tiempo mejoran la calidad del aire maximizando los recursos de la población y de esta manera probar que es esencial para un

desarrollo competitivo y sustentable en la actual industria del tratamiento de residuos. Adicionalmente, la difusión del uso de tecnologías de biogás creará empleos relacionados con el diseño, operación y manufactura de los sistemas de energía.

El siguiente esquema muestra brevemente la forma de obtener energía a partir de biomasa por un proceso de fermentación anaeróbica.

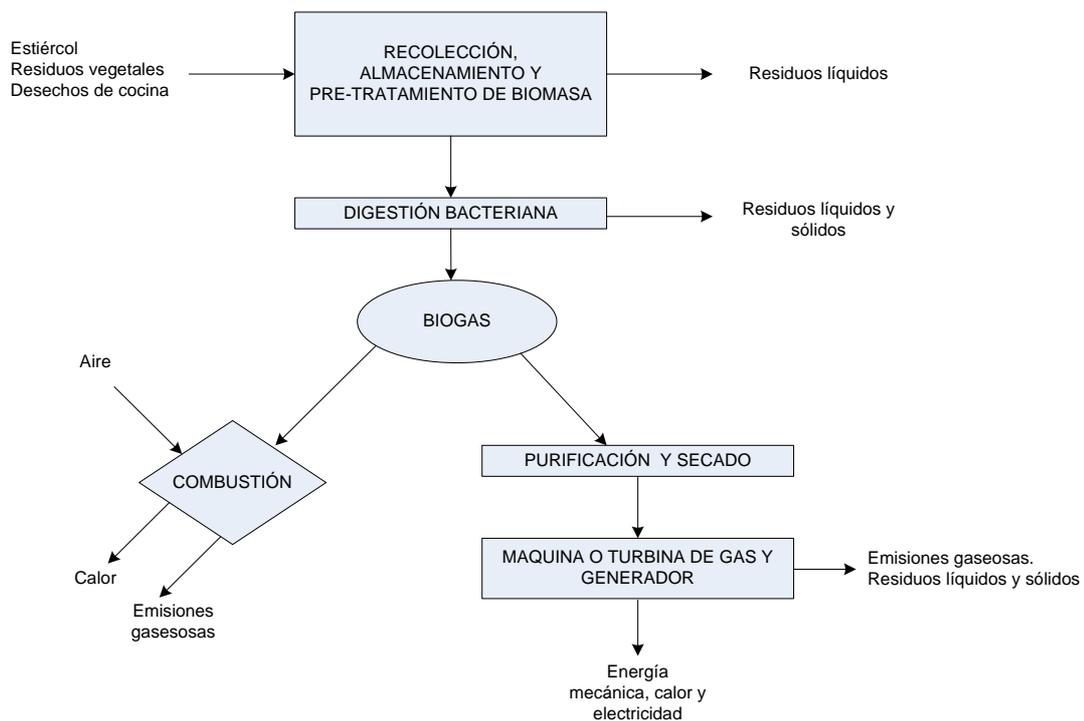


Fig. 1.1 Esquema general de la obtención de biogás a partir de biomasa y posibles usos.

### 1.5. Producción de biogás

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

En la práctica, los desechos mezclados con agua se introducen a un recipiente cerrado, llamado digestor, que es donde se realiza el proceso de generación de biogás. Cuando el digestor es de carga diaria, todos los días se carga con una cantidad dada de desechos mezclados con agua, y del digestor sale un volumen de lodos fertilizantes igual al de la mezcla alimentada; el biogás se genera en forma continua durante todo el día. Cuando se trata de un digestor que trabaja a régimen permanente de "lote", se carga todo de una sola vez, no descargándose hasta después de dos o tres meses, cuando se vacía el residuo se aplica al campo; en este caso la cantidad de biogás producida es mayor en las primeras semanas y va bajando a medida que transcurre el tiempo, por lo que casi siempre, se instalan varios digestores en "batería", los que se cargan en forma alternada, con objeto de disponer siempre de la cantidad requerida de biogás.

La fermentación anaeróbica de la materia orgánica se lleva a cabo por la acción de diversas familias de bacterias. Usualmente se consideran dos etapas del proceso:

1ª. Etapa: formación de ácidos.

2ª. Etapa: formación de gases.

En la primera etapa la materia prima es atacada por las bacterias formadoras de ácidos, mismas que convierten los desechos en compuestos más simples como los ácidos acético, butírico y propanoico. En la segunda etapa los ácidos formados en la primera son convertidos a metano y bióxido de carbono por acción de otro grupo de bacterias.

Todos estos procesos se llevan a cabo simultáneamente dentro del digestor, al cual sólo se alimenta la materia prima en las condiciones adecuadas.

## 1.6. Parámetros que influyen en la generación de biogás

Tomando en cuenta que las bacterias son el ingrediente esencial del proceso, es necesario mantenerlas en condiciones que permitan asegurar y optimizar su ciclo biológico. A continuación analizaremos detalladamente los parámetros que influyen directamente en la formación de metano.

### 1.6.1. Temperatura

El proceso se lleva a cabo en un amplio rango de temperaturas, desde 15 hasta 60° C. Sin embargo, para que las bacterias formadoras de metano trabajen en forma óptima, se requiere mantenerlas a temperaturas que oscilan entre 30 y 60°C dependiendo del tipo de bacterias que se adapten y se desarrollen.

En la práctica, sobre todo en pequeños sistemas instalados en el medio rural, no se controla la temperatura del proceso, y se trabaja a temperatura ambiente sin proporcionar calor al digestor. Una forma simple de aumentar la temperatura de operación y con ello aumentar la cantidad de biogás producido, es calentar el agua con la que se va a efectuar la mezcla, por ejemplo en calentadores solares. En la gran mayoría de los casos los digestores se construyen enterrados para evitar que se pierda mucho calor.

Para el desarrollo óptimo del proceso, se distinguen dos rangos de temperatura el mesofílico de 30 a 40° C y el termofílico de 55 a 60° C.

*Rango mesofílico (30 – 40° C).* Las bacterias que se desarrollan en este rango de temperaturas se reproducen fácilmente y pueden permanecer activas si no ocurren cambios súbitos de temperatura.

*Rango termofílico (55 – 60° C).* Este rango de temperatura, en que se produce la mayor cantidad de gas que en el anterior y en tiempos más cortos, en general sólo es usado en grandes instalaciones a nivel industrial, ya que requiere de un control muy preciso. Las bacterias termofílicas son muy sensibles a los cambio de

temperatura y en pequeños sistemas no resulta económico mantener esta temperatura controlada, especialmente en sistemas controlados.

### 1.6.2. **Tiempo de retención**

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

En un digestor que trabaja a régimen estacionario o sea de "lote", el tiempo de retención es el tiempo que transcurre entre la carga del sistema y su descarga.

En un sistema de carga diaria, el tiempo de retención va a determinar el volumen diario de carga que será necesario alimentar al digestor, ya que tiene la siguiente relación:

$$\frac{\text{volumen del digestor (m}^3\text{)}}{\text{tiempo de retención (días)}} = \frac{\text{volumen de carga diaria}}{\text{m}^3\text{/día}}$$

Es decir que para un sistema de retención de 20 días, cada día se carga 1:20 del volumen total del digestor, y en promedio la materia orgánica y la masa microbiana permanecen 20 días dentro del sistema. La cantidad de biogás producido por una planta dependerá, entre otras cosas, de la cantidad de desechos alimentado diariamente. Usualmente se trabaja con tiempos de retención de entre 20 y 55 días y la alimentación diaria varía entre 1 y 5 kg de sólidos totales por metro cúbico del digestor.

### 1.6.3. **Relación carbono/nitrógeno**

Prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometida a fermentación anaeróbica, y la cantidad y

calidad del biogás producido dependerá de la composición del desecho utilizado.

El carbono y el nitrógeno son las fuentes principales de alimentación de las bacterias formadoras de metano; el carbono es la fuente de energía y el nitrógeno contribuye a la formación de nuevas células. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos es de 30.

Si no existe suficiente nitrógeno para permitir que las bacterias se multipliquen, la velocidad de producción de gas se verá limitada; al estar presente nitrógeno en exceso, se produce amoníaco, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso.

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

#### 1.6.4. **Porcentaje de sólidos**

Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida; esta última es llamada "sólidos totales".

El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla con que se carga el digestor, es también un factor importante a considerar para asegurar que el proceso se lleve a cabo en forma satisfactoria.

Experimentalmente se ha demostrado que una carga que contenga entre 7 y 9% de sólidos totales es óptima para la digestión.

#### 1.6.5. **pH**

En las plantas de biogás alimentadas con estiércol de bovino, se han obtenido niveles de pH en el intervalo de 6.7 a 7.5 o sea prácticamente neutro. El pH se mantiene en ese rango sólo, si el digestor está operando correctamente. Si se pierde el equilibrio tornándose demasiado ácido, las bacterias formadoras de metano se inhiben aumentando la proporción de bióxido de carbono en el biogás.

#### 1.6.6. **Agitación**

La generación de biogás depende totalmente de que las bacterias cumplan en forma óptima su ciclo biológico y de ahí la importancia de darles mejores condiciones para que esto ocurra. Los microorganismos y la materia prima o sustrato deben estar en íntimo contacto, por lo que es necesario agitar la masa interior del digestor.

## **CAPÍTULO 2. PROCESOS DE GENERACIÓN DE BIOGÁS**

Una planta de biogás rural consiste básicamente de un tanque o pozo llamado digestor donde ocurre la fermentación y un contenedor hermético que tiene como función almacenar biogás producido; las dos partes pueden estar juntas o separadas y el tanque de almacenamiento puede ser rígido o flotante. La carga y descarga del sistema puede ser por gravedad o por bombeo.

El procesamiento de desechos orgánicos permite generar biogás y como residuo del proceso se tiene un excelente abono orgánico que lleva el nombre de bioabono. En China se encuentran operando actualmente más de 8 millones de digestores y cerca de 80,000 en India, los mismos que suplen de biogás y bioabono al mismo número de familias.

### **2.1. Características del digestor**

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

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

- Se deberá contar con un medio para romper las natas que se forman.

## 2.2. Tipos de digestores

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

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

### 2.2.1. Digestores de lote

Este digestor se carga una sola vez en forma total y la descarga se efectúa una vez que han dejado de producir el gas combustible. Digestores de régimen Semi-Continuo. Este sistema es aplicable cuando la materia prima presenta problemas de manejo en un sistema continuo o cuando la materia a procesar está disponible en forma intermitente.

### 2.2.2. Digestores de régimen semi-continuo

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

*Digestores Tipo Hindú (figura 2.1)* Existen varios diseños de estos digestores, pero en general son verticales y enterrados, semejando un pozo. Se cargan por gravedad una vez al día, con un volumen de mezcla que depende del tiempo de fermentación o retención y producen una cantidad diaria más o menos constante de biogás si se mantienen las condiciones de operación.

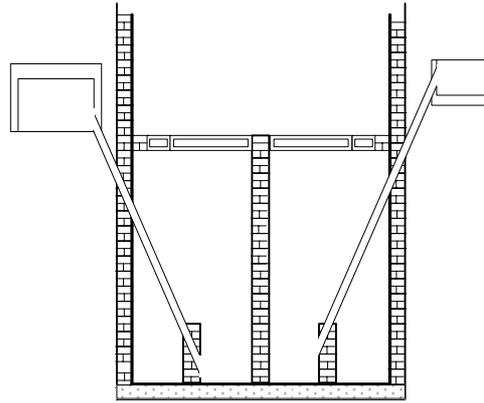


Fig. 2.1 Planta de biogás diseñada por Singh.

El gasómetro está integrado al sistema, en la parte superior del pozo flota una campana donde se almacena el gas. La presión de utilización del biogás es constante.

El digestor normalmente se construye de ladrillos. La campana puede construirse de lámina de hierro, de fibra de vidrio o de otro material, con la condición de que no permita fuga del gas.

*Digestores Tipo Chino.* Los digestores de este tipo, como el que aparece en la figura 2.2, son tanques cilíndricos con el techo y piso en forma de domo, y se construyen totalmente herméticos.

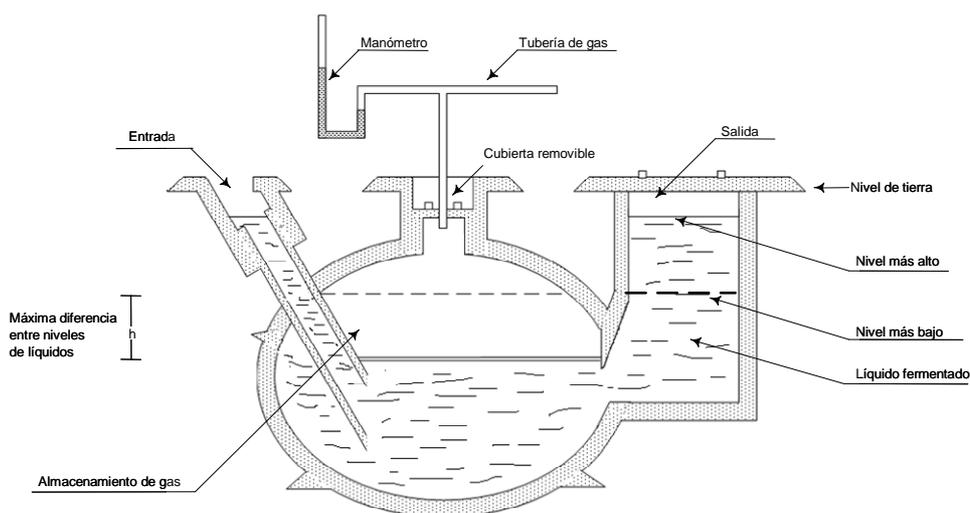


Fig. 2.2 Planta de biogás familiar tipo "Circular pequeño y achatado" usado en la República Popular de China.

Al iniciar el proceso, el digestor se llena con residuos agrícolas procedentes de compostas mezclados con lodos activados de otro digestor, a través de la cubierta superior que es removible.

En este tipo de digestores no existe gasómetro, almacenándose el biogás dentro del mismo sistema. La fluctuación del nivel de la mezcla en fermentación aumenta el contacto de la fase líquida con el oxígeno del aire, reduciéndose la actividad de las bacterias generadoras de metano, y la alta presión impide que el gas salga libremente del seno de la mezcla, todo lo cual conduce a una menor eficiencia de generación de biogás en los digestores de tipo chino, en comparación con los de tipo hindú, generándose en el primero entre 0.15 y 0.20 volúmenes de gas por volumen del digestor.

Periódicamente se extrae una parte de líquido en fermentación a través del tubo de salida. Una o dos veces al año el digestor se vacía completamente, aplicando el residuo a los campos de cultivo.

Los digestores rurales se construyen casi siempre por los mismos usuarios, con asesoramiento de un técnico especializado, a partir de ladrillos, bloques prefabricados o por vaciado integral de concreto ligero sobre la propia tierra.

### 2.2.3. **Digestores horizontales de desplazamiento**

Generalmente se construyen enterrados, son poco profundos y alargados, semejando un canal, con relaciones de largo a ancho de 5 a 1 hasta 8 a 1 y sección transversal circular, cuadrada o en "V". Ver figura 2.3. Este tipo de digestores se recomiendan cuando se requiere trabajar con volúmenes mayores a los 15m<sup>3</sup>.

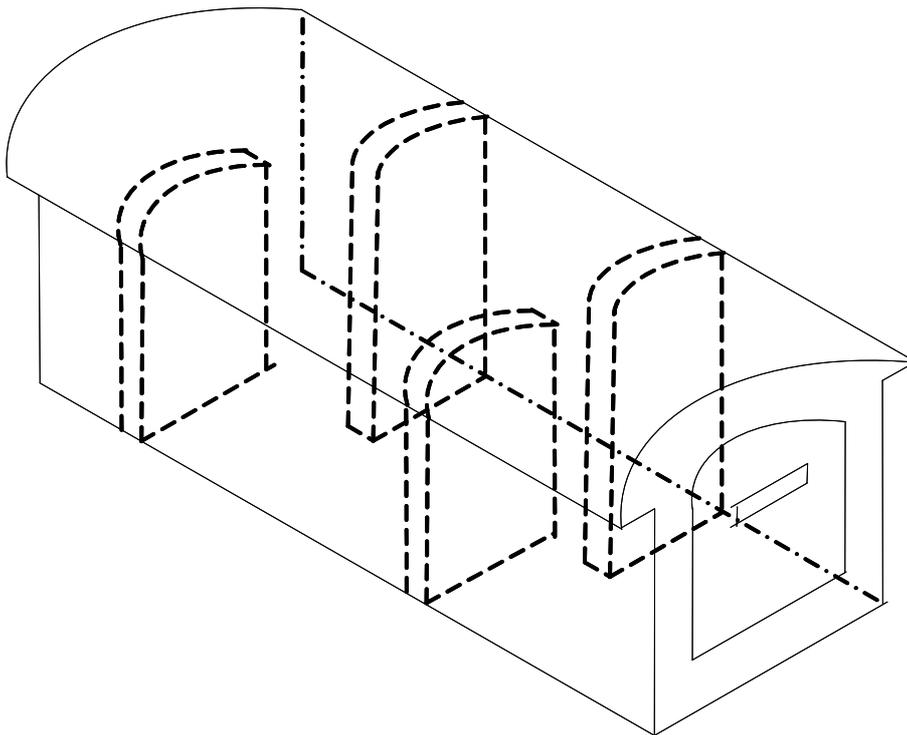


Fig. 2.3 Digestor de 40m<sup>3</sup>.

#### 2.2.4. **Digestores de régimen continuo**

Este tipo de digestores se desarrollaron principalmente para el tratamiento de aguas negras y en la actualidad su uso se ha extendido al manejo de otros sustratos. En general son muy grandes, en los cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionarles calefacción y agitación, así como para su control.

#### 2.2.5. **Otros tipos de digestores**

La investigación en el tema de fermentación anaeróbica, buscando aumentar la eficiencia de generación de biogás y degradación de la materia orgánica reduciendo el tiempo de retención, ha llevado al desarrollo de diversos tipos de digestores, como los llamados filtros anaeróbicos. En estos sistemas de alimentación continua y alta dilución, por métodos físicos se logra retener los microorganismos dentro del digestor durante 20 a 30 días, mientras que el líquido

activo pasa a través del sistema en tiempos de 1 a 5 días. Con estos se logra reducir en forma significativa el tamaño de la planta, con la consecuente disminución de costos de instalación y operación, mejorando la eficiencia de generación de biogás.

Tecnología anaeróbica	Tamaño del tanque por unidad de volumen tratado	Temperatura de operación	Tiempo de tratamiento requerido	Eficiencia del tratamiento
Flujo tapón	25m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> tratado por día	35-40 °C	20 - 30 días	60-75 %
Sistema con agitación	13 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> tratado por día	35-40 °C	6 - 20 días	70-80 %
Flujo de película anaeróbica	3 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> tratado por día	35-40 °C	0.5 - 6 días	80-95 %
Cama fluidizada	3 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> tratado por día	35-40 °C	0.5 - 1 días	80-95 %
Reactor por lote en serie	15m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> tratado por día	18-20 °C	10 - 28 días	60-80 %

Tabla 2.1 Tecnologías de digestión anaeróbica más comunes.

## **CAPÍTULO 3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PROCESOS DE GENERACIÓN DE BIOGÁS**

### **3.1. Características de procesos exitosos**

Los proyectos de generación de biogás que han sido exitosos tienen en común lo siguiente:

- El propietario u operador se da cuenta de los beneficios de la tecnología del biogás tiene y busca lo mejor para que funcione.
- El propietario u operador tiene habilidad manual y conocimientos del proceso, tiene acceso a soporte técnico.
- El diseñador y/o constructor construyen sistemas compatibles con el tratamiento existente de los residuos.
- El propietario u operador aumenta la rentabilidad del sistema de biogás a través de la utilización de biomasa y venta de los productos.

### **3.2. Características de procesos que han fracasado**

Numerosos son los factores que inciden en el fracaso de las tecnologías de producción de biogás en determinados lugares, encontrándose dentro de los fundamentales los siguientes:

- El diseñador y/o constructor no construye sistemas compatibles con el tratamiento existente de los residuos.
- Los productores seleccionan un digestor que no es compatible con el tratamiento previo que se le da a los residuos.
- Los operadores no tienen las habilidades o el tiempo requerido para mantener una operación marginal del sistema.
- Los diseñadores y/o constructores instalan el equipo inadecuado, tamaños incorrectos de bombas, equipo para la transmisión de gas y control eléctrico.

- El sistema puede llegar a ser muy costoso debido a trabajos de mantenimiento y reparación debido a un sistema mal diseñado.
- Los operadores no reciben un adecuado entrenamiento y soporte técnico para sus sistemas.
- No hay recuperación de la inversión por parte del sistema o la tasa de retorno disminuye con el tiempo.
- Importación fotográfica de tecnologías para producir biogás desde el exterior o sea no se hace una adaptación de la tecnología existente a las condiciones de la región que se desea aplicar.
- Perspectiva metodológica conceptual errónea en el proceso de identificación y diseño de las plantas. Los conceptos energéticos prevalecieron por encima de las posibilidades de tratar un residual y de la posibilidad de obtener un fertilizante de alta calidad.
- No se realizó un análisis en sistema de las plantas por los usuarios y promotores; no se tuvieron en cuenta las ventajas del tratamiento del residual y el alto valor agregado del fertilizante.
- Deficiencias en los diseños de las plantas, sobre todo desde el punto de vista geográfico.
- Elevado empirismos en el diseño, construcción y operación de las plantas de biogás, lo que se traduce en una deficiente capacitación y motivación de los actores involucrados al desarrollo de esta tecnología.
- Falta de infraestructura para desarrollar la tecnología en el país, no existe una empresa encargada de producir la tecnología completa o sus elementos, al mismo tiempo no se encontraban organizados e integrados los principales actores que intervienen en el proceso de desarrollo de la tecnología.
- Los cambios ocurridos en el espectro de necesidades de la población y los empresarios producen un decrecimiento del

interés en la operación de las plantas, ya que se vieron las plantas de biogás para cubrir necesidades energéticas fundamentalmente.

- Existencia de resultados científicos bien estructurados y logrados que no se generalizan adecuadamente.

Similares deficiencias aparecen recogidas por Barreto 2002, estas pueden agruparse en cuatro problemas fundamentales:

1. *Técnicos*: Debido a problemas de operación y mantenimiento, de localización, así como de diseño y construcción.
2. *Institucionales*: Falta de promoción de la tecnología del biogás, insuficiente coordinación institucional para el desarrollo de proyectos de biogás, ausencia de programas nacionales para el desarrollo del empleo del biogás, así como escaso entrenamiento a trabajadores para el mejoramiento de tecnologías de biogás.
3. *Problemas socioeconómicos*: A causa de la alta inversión inicial, resistencia al cambio en el uso tradicional de las excretas de animales.
4. *Problemas financieros*: como es la incertidumbre de su beneficio, ausencia de políticas de crédito blandos e insuficiente presupuesto para investigaciones y proyectos de demostración

### 3.3. **Tecnología BDP**

En Costa Rica se está usando un biodigestor de polietileno (BDP) para la obtención de biogás. Un biodigestor de tamaño promedio para una familia rural tiene un volumen total de 7.2 m<sup>3</sup>, con una fase líquida de 5.1 m<sup>3</sup> (75 % del total de la capacidad) y 1.8 m<sup>3</sup> para el

almacenamiento del biogás (25 % del total de su capacidad). EL BDP recibe una carga diaria de 21.6 kg de excrementos frescos mezclados con 86.4 kg de agua. Esto representa una carga anual de 7,885 kg de excrementos frescos y 31,536 kg de agua. Ocho cerdos adultos o una vaca lechera adulta (confinada a tiempo completo) pueden producir la cantidad necesaria por día (Botero y Preston, 1986). La mezcla de excrementos frescos y agua es necesaria para mantener un flujo continuo de material orgánico dentro del biodigestor. Botero y Preston (1986) sugieren esta mezcla en proporción 1/4, (excrementos/agua) para reducir la concentración de sólidos de 15 % en el material fresco a 3 % - 4 % en el material cargado dentro de la planta de biogás.

Durante el proceso de digestión anaeróbica dentro del BDP, el carbono es el único elemento que es emitido en cantidades considerables bajo condiciones normales (Hedlund y Xuan An, 2000). Otros nutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P), y potasio (K) se mantienen en iguales cantidades, pero salen en una mayor concentración en el efluente, dado que el estiércol ha sido digerido dentro del biodigestor y se ha reducido su volumen (Botero y Preston, 1986; Hedlund y Xuan An, 2000). Por tanto, la misma cantidad anual de nutrientes que ingresa al sistema (36.5 kg N, 58.4 kg P y 55.2 kg K) es la que sale del biodigestor a través de su tubo de salida. La figura 3.1 muestra un flujo de nutrientes para un BDP de las características descritas previamente.

La tabla 3.1 muestra el potencial de producción de metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), monóxido de carbono (CO) y sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) por un año. También incluye resultados que pueden ser obtenidos bajo dos tiempos de retención distintos: 20 y 50 días. El tiempo de retención representa el número de días que el material orgánico permanece dentro del BDP para su digestión.

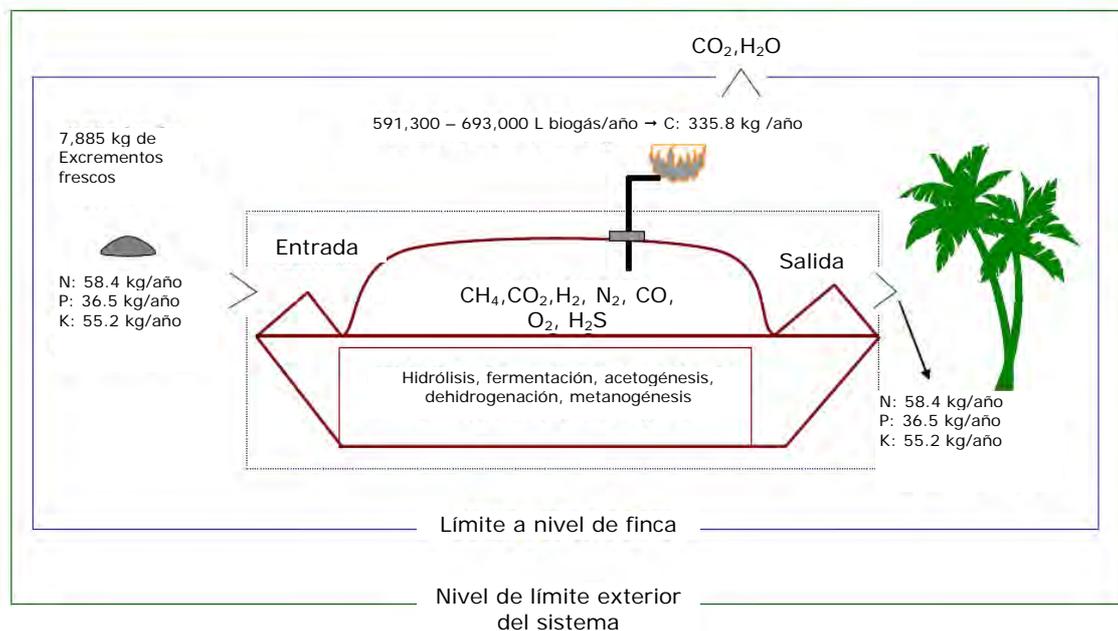


Fig. 3.1 Análisis del ecosistema para un biodigestor de polietileno basado en 7,885 kg de excrementos frescos. Fuente: Aguilar y Botero. Tierra Tropical 2006.

Gases	Volumen (%)	Litros producidos al año	
		Xuan An et al (1997b)	Botero y Preston (1986)
CH <sub>4</sub>	60.3	384 345	450 775
CO <sub>2</sub>	33.2	196 312	230 242
H <sub>2</sub>	1.0	5 913	6 935
N <sub>2</sub>	5.0	2 957	3 468
CO <sub>2</sub>	0.1	591	694
O <sub>2</sub>	0.1	591	694
H <sub>2</sub> S	0.1	591	694
Biogás	100.0	591 300	693 502

Tabla.3.1 Producción total de biogás por año calculado para un biodigestor cargado anualmente con un total de 7885 kg de excrementos frescos de cerdo. Fuente: Aguilar y Botero. Tierra Tropical 2006.

El total de CH<sub>4</sub> producido en un año tiene un valor energético equivalente a 13,600 MJ – 15,950 MJ, lo que es equivalente a 37 MJ - 47 MJ por día (Tabla 3.2).

Tiempo de retención	Biogás			
	L/año	J/L	J/año	MJ/año
20 días	590700	23 000	13 599 900 000	13 600
50 días	693500	23 000	15 950 500 000	15 950

Tabla 3.2 Producción total de biogás y su equivalente en MJ para un total de 7,885 kg de excrementos de cerdo al año. Fuente: Aguilar y Botero. Tierra Tropical 2006.

La estimación del potencial que la instalación de un BDP tiene para reducir la emisión de gases de efecto invernadero se basa en su capacidad para disminuir la emisión de CO<sub>2</sub> en comparación con combustibles fósiles. Un análisis teórico estima que un BDP de 7.2 m<sup>3</sup> puede producir 3,524 kW/año – 4,133 kW/año, considerando que un metro cúbico de biogás representa un equivalente de 5.96 kW. Con la combustión de biogás, en lugar de combustibles fósiles, como el caso del diesel que se usará como parámetro en este estudio, hay un potencial de reducir 0.34 kg de CO<sub>2</sub> por kW de energía producido en base a datos propuestos por Kumar *et al.* (2000). El valor total que puede reducirse por año en términos de CO<sub>2</sub> es del orden de 1.20 – 1.41 Ton para un BDP de 7.2 m<sup>3</sup> (Tabla 3.3).

Producción de biogás m <sup>3</sup> /año	Energía producida kW/año	Ahorro en emisión kg CO <sub>2</sub> /kW	Disminución de emisión de CO <sub>2</sub> kg/año	Disminución total en emisión de CO <sub>2</sub> Ton/año
591.30	3524.15	0.34	1198.21	1.20
685.50	4133.26	0.34	1405.31	1.41

Tabla 3.3 Disminución en la emisión de CO<sub>2</sub> por el uso de biogás producido por un biodigestor de 7.2 m<sup>3</sup> como alternativa a la combustión de diesel. Fuente: Aguilar y Botero. Tierra Tropical 2006.

### 3.3.1. Beneficios directos

Los beneficios directos del uso de la biodigestión pueden ser estimados en base al uso del biogás, como una fuente alternativa a energías no renovables, y a la aplicación del efluente como una

sustitución de nutrientes aportados por fertilizantes sintéticos (Meynell, 1982). El valor comercial del biogás como fuente de energía fue estimado en su equivalente en valor energético de un combustible fósil que puede ser reemplazado por el uso de biogás. Un combustible comúnmente utilizado en zonas rurales donde los BDPs son instalados es el diesel. El valor neto en calorías de un metro cúbico de biogás equivale a la energía emitida por la combustión de 0.55 litros de diesel (Sasse, 1988). Así, la producción anual de 693.50 m<sup>3</sup> de biogás (50 días de retención) equivale a 381.43 L de diesel y 591.30 m<sup>3</sup> (40 días de retención) equivalen a 325.22 L de diesel.

El valor comercial de un litro de diesel en Costa Rica es de US\$ 0.42. Calculando la cantidad de biogás por su equivalente energético en diesel por su valor comercial, los beneficios directos derivados de la combustión de biogás ascienden a un rango de entre US\$ 137 a US\$ 160.

Referente al valor económico del efluente, el precio por nutriente es calculado en base al valor comercial por kilo de cada nutriente de los fertilizantes sintéticos. El valor económico anual del efluente se obtiene mediante el análisis del contenido nutricional del material, multiplicado por el precio comercial por kilo de nutrientes como N, P y K. Este valor se estima en US\$ 23 por la producción de 58.4 kg N, US\$ 148 por la producción de 36.5 kg P y US\$ 89 por el contenido de 55.2 kg de K, para un total de US\$ 260.

Los principales beneficios directos derivados de la aplicación de la biodigestión a bajo costo (Tabla 3.4) pueden incrementarse si el efluente se seca y se vende como fertilizante sólido a otras fincas a un precio mayor que el comercial. Falta por valorar la materia orgánica que contiene el efluente y de la cual carecen por completo los fertilizantes sintéticos.

Beneficios		Valor	
		Caso A	Caso B
<b>A. Biogás como fuente de energía</b>			
a. Producción neta anual de biogás	M <sup>3</sup> /año	693.5	591.3
b. Equivalente neto a la combustión de diesel	L	381.43	325.22
c. Precio comercial por unidad de combustible fósil	US\$/L	0.42	0.42
d. Ahorro total anual por el uso de biogás	(b*c)US\$	160.2	136.59
<b>B. Efluente como fertilizante</b>			
e. Nitrógeno	US\$	23.1	23.1
f. Fósforo	US\$	148.4	148.4
g. Potasio	US\$	88.75	88.75
h. Beneficios totales derivados del uso del efluente	(e+f+g)	260.25	260.25
<b>C. Beneficios totales al año</b>			
i. Beneficios directos totales al año	(d+h)US\$	420.25	396.84
Tabla 3.4. Beneficios directos de la aplicación de un sistema de gestión anaeróbica utilizando un BDP de 7.2 m3 con una carga anual de 7885 kg de excrementos frescos de cerdo. Caso A: 20 días de tiempo de retención (Xuan An et al, 1997). Caso B: 50 días de tiempo de retención (Botero y Preston, 1986). Fuente: Aguilar y Botero. Tierra Tropical 2006.			

### 3.3.2. Valores funcionales

Los valores funcionales incluyen beneficios intangibles del uso de biodigestores como algunos de los listados por Brown (1987), Fulford (1993), European Union (2000) y Kumar *et al.* (2000), como son:

- Reducción de la emisión de gases de efecto invernadero (CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> por ejemplo) gracias a la reducción de la demanda de combustibles fósiles y por la captura controlada de gas CH<sub>4</sub>.

- Ahorro en el consumo de leña, previniendo deforestación y aportando energía, aún en períodos de escasa oferta de leña.

- Control de contaminación, disminución de malos olores (reducción en la emisión de SO<sub>2</sub>) y disminución de enfermedades respiratorias asociadas a la quema de leña.

- Mejor control de plagas - reducción de patógenos y semillas de maleza.

Para evaluar los valores funcionales de la aplicación de un BDP, este estudio únicamente incluye la capacidad del uso de biodigestión para reducir la emisión de gases de efecto invernadero comparado con la combustión de combustibles fósiles como es el caso del diesel. Otros valores funcionales como el potencial de reducir enfermedades humanas, reducción de patógenos y semillas de maleza no se han incluido. Esto se debe a que no existe un consenso general concerniente al efecto directo o indirecto de la biodigestión en estos asuntos.

Como ya se presentó en el análisis anterior, un BDP de 7.2 m<sup>3</sup> puede evitar la emisión de 1.20 a 1.41 Ton de CO<sub>2</sub> al año, cuando es comparado con la combustión de diesel. El Departamento del Ambiente del Reino Unido (DOE, 1993) ha estimado que el valor de la emisión de una tonelada de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (como un contaminante global) fluctúa entre US\$ 5 a US\$ 45 por año. Por tanto, el ahorro externo gracias a la emisión de esa cantidad de CO<sub>2</sub> al año, gracias a la implementación de un BDP de 7.2 m<sup>3</sup> se estima de entre US\$ 7 a US\$ 63.

Este valor puede parecer como un monto minúsculo, pero a una escala regional y mundial adquiere una mayor dimensión. Según Kumar *et al.* (2000), en la India en el año 1995 se estima existían 14 millones de biodigestores en funcionamiento. De este número 2.1 millones eran plantas de 6 m<sup>3</sup> a 10 m<sup>3</sup> (Meynell, 1982). De estos datos y el valor estimado de una tonelada de CO<sub>2</sub> emitida en la atmósfera, a nivel nacional, la India podría ahorrar entre US\$ 246,015,840 a US\$ 1'76,392,000 en costos evitados relacionados a daños que puede causar el CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

### 3.4. Tecnología Pfeffer

Como ya se ha mencionado los microorganismos anaerobios se alimentan de los desperdicios orgánicos en ausencia de oxígeno produciendo metano y dióxido de carbono. Un proyecto propuesto usaría la digestión anaerobia para proveer 1500 ft<sup>3</sup> (42.5m<sup>3</sup>) /día a partir de 1000 lb (453.6 kg) de residuos sólidos de Milwaukee. Los participantes del proyecto, Allis-Chalmers Inc. of Wak Brook, Illinois, construyeron una planta piloto, basada en el trabajo de laboratorio de John T. Pfeffer (University of Illinois).

En la figura 3.2 se muestra el proceso Pfeffer. Inicialmente, los desperdicios sólidos municipales pasan a través de un cortador para disminuir su tamaño y lograr uniformidad en los residuos que serán procesados, posteriormente un separador magnético remueve metales ferrosos para ser reciclados, y el resto es llevado a un clasificador de aire en donde es dividido en dos fracciones, una pesada y una ligera. La fracción pesada es llevada al drenaje o también se puede reclasificarse para un relleno sanitario. La fracción ligera la cual tiene un alto contenido en papel (i. e. celulosa) es mezclada con desechos animales y/u otro nutriente químico para producir la mezcla iniciadora (desechos animales y agua). Los nutrientes químicos para producir la mezcla iniciadora deben ser introducidos para proveer de los requerimientos de compuestos nitrogenados para el crecimiento de los microorganismos, compuestos que usualmente son deficientes en los desechos orgánicos sólidos. Esta mezcla iniciadora debe ser ajustada a un pH de 6.7 y una temperatura entre 130 y 140° F para pasar hacia el digestor. Estos parámetros para la mezcla iniciadora son los óptimos para el crecimiento de los microorganismos. La mezcla iniciadora se recircula en el digestor por 5 días. El gas generado por estos microorganismos tiene entre un 50 y 60% por ciento de metano y el resto corresponde a dióxido de carbono. La figura 3.3 muestra el método de separación del metano de dióxido de carbono.

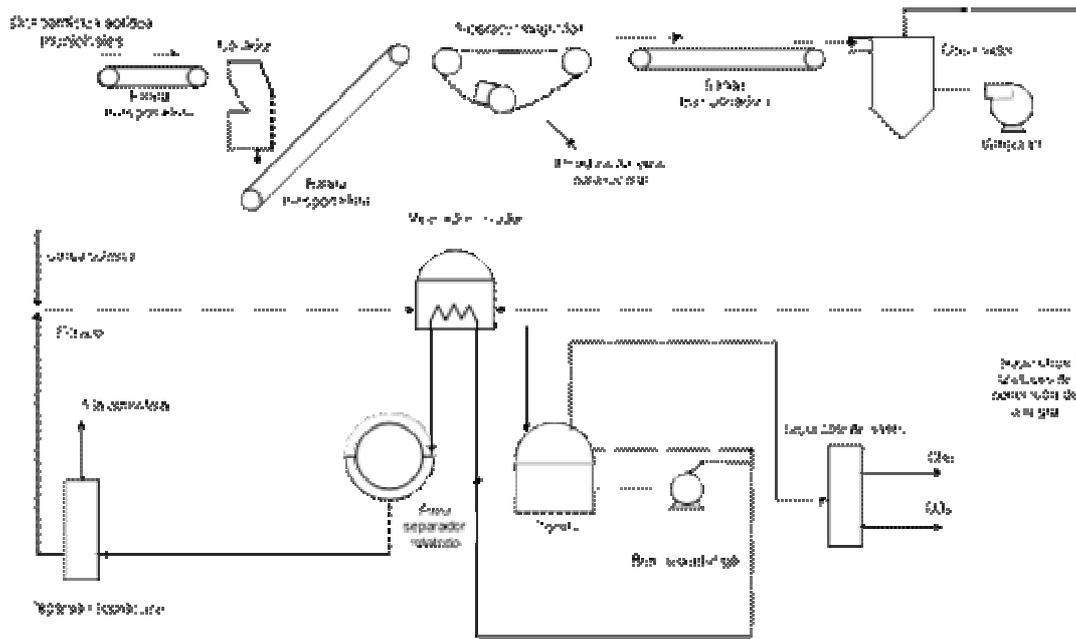


Fig. 3.2 Proceso Pfeffer de conversión de residuos sólidos para producir metano

El residuo remanente en el digester o lodo es una mezcla de lignina, plásticos y un algo de celulosa que no reaccionó, este lodo disminuye su volumen en aproximadamente 75% cuando se remueve que contenía. Este lodo puede ser usado como abono natural.

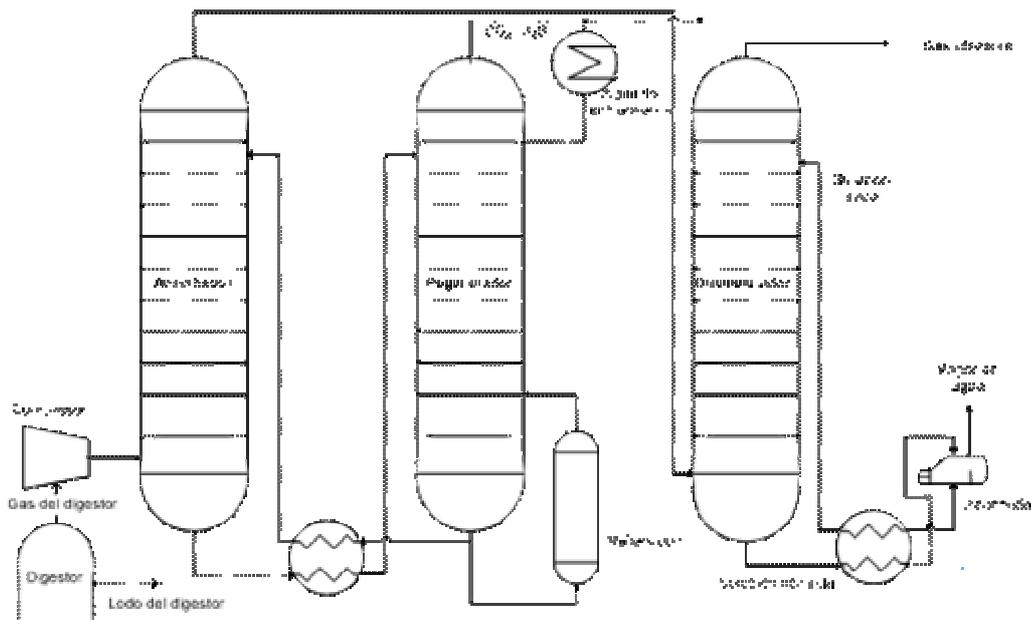


Fig. 3.3. Proceso de separación de la mezcla de metano y dióxido de carbono.

### 3.5. Tecnología Nord GmbH

Biogas Nord ha proyectado y construido en Alemania más de 45 plantas de biogás, tanto de tratamiento de residuos agrícolas como para mezclas de residuos orgánicos y aguas residuales, incluyendo también residuos de destilerías, comedores, panaderías, separadores de grasas, así como también plantas de valor energético (productos renovables). Todas las plantas están equipadas con equipos de cogeneración para la producción de energía eléctrica y térmica.



Fig. 3.4 Ejemplos de plantas de biogás Nord.



Fig. 3.4 Ejemplos de plantas de biogás Nord (continuación).

La figura 3.5 muestra el uso de una de las tecnologías de Biogás Nord usada en una planta de tratamiento de aguas residuales una destilería en Cuba.



Fig. 3.5 Laguna de la Tecnología Biogás Nord usada en una destilería en Cuba.

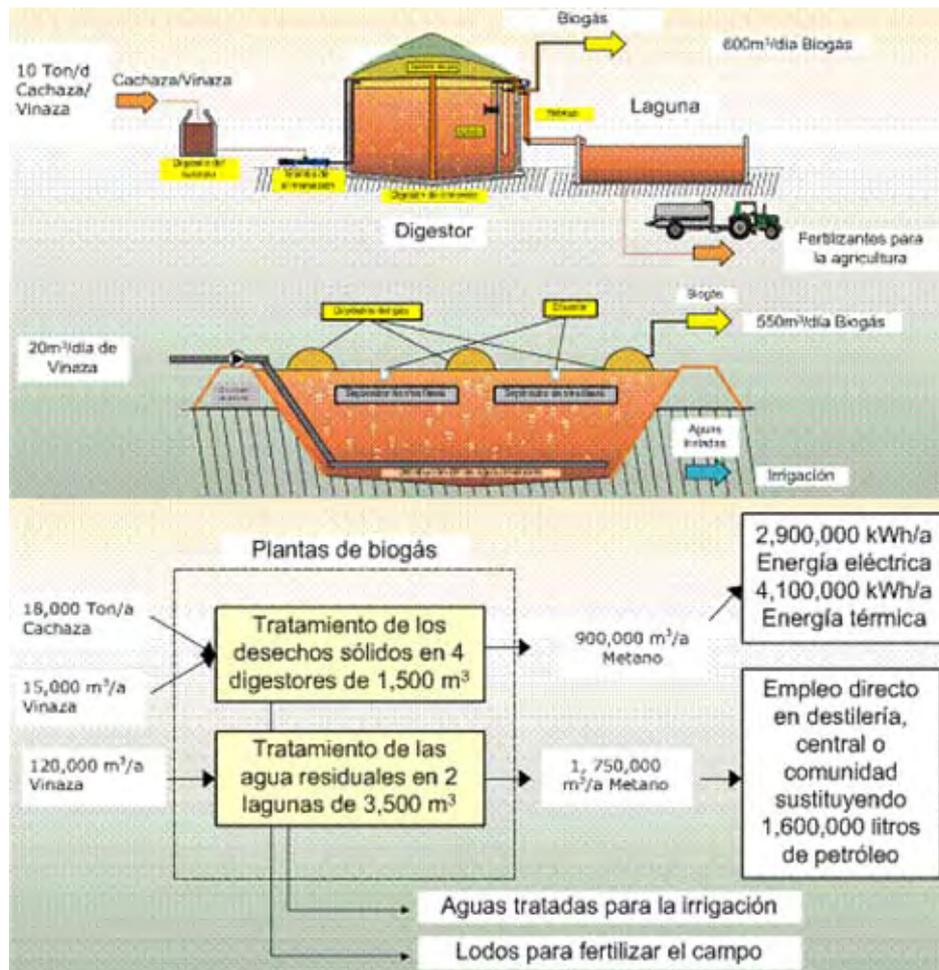


Fig. 3.6 Tecnología Biogás Nord usada en una destilería en Cuba.

### 3.6. Casco Inc.

Casco Inc. Ha acordado producir ingredientes para alimentos con un precio competitivo sin dañar el ambiente. La planta de Casco en London, Ontario, genera aguas residuales con un alto contenido de contaminantes producidos durante el proceso de fabricación de azúcares, almidón y alimentos a base de maíz para animales. La planta instalada en 1998, una ONDEO Degrémont Anaflux®, sistema de tratamiento anaeróbico e instalación de un segundo reactor en el 2000. Este es el sistema de pretratamiento de aguas residuales que Casco usa antes de descargar sus residuos en el sistema de drenaje municipal.

Casco eligió este sistema en particular debido a que remueve más del 95% de DBO (Demanda biológica de oxígeno) y produce sólo una fracción muy pequeña de biosólidos de un sistema aeróbico.



Fig. 3.7 Casco Inc. Planta de azúcar, almidón y alimento para animales

Además, el pre-tratamiento del agua residual reduce significativamente las cuotas que Casco paga al municipio por las descargas al sistema sanitario municipal. Este sistema puede tratar hasta  $213 \text{ m}^3$  de agua residual por hora. Casco usa un sistema de tres etapas. La inicial ocurre en el tanque de acidificación, el cual tiene un tiempo de residencia mínimo de 6 horas. El flujo a la entrada y salida de este tanque depende del agua residual enviada al sistema debido a que el volumen del tanque se mantiene constante.

La inversión total realizada para el sistema de tratamiento anaeróbico, considerando la expansión que se llevó a cabo en el 2000, fue de \$CA 8 millones. El costo de operación anual –

incluyendo mano de obra, compuestos químicos, mano de obra y energía – es cercana a \$CA 950,000.

Casco ha estado examinando opciones para el uso de biogás producido por su sistema de tratamiento anaeróbico. Otros estudios indican que el valor del biogás que produce Casco tiene un valor de \$CA 200,000 a \$CA 300,000, dependiendo del uso final en la planta.

### 3.7. **Haubenschild Farms, Inc.**

Haubenschild Farms, Inc. Es una granja familiar de 400 hectáreas cerca de cerca de Princenton, Minnesota. En 1998, los propietarios planearon aumentar la producción de leche de 430 a 900 vacas e iniciaron a considerar los beneficios ambientales y económicos de la operación de la granja en caso de instalar un digestor anaeróbico para procesar el estiércol de las vacas. Haubenschild Farms considero este digestor por las siguientes razones.

- Control de olor.
- Generación de electricidad.
- Producción de energía térmica.
- Transformar el residuo al usarlo como fertilizante.
- Reducción de bacterias patógenas.
- Destrucción de la maleza.
- Reducción de las emisiones de gases de invernadero.

El programa AgSTAR del gobierno de los Estados Unidos recomienda el uso de metano recuperado de animales de granja, la granja Haubenschild fue seleccionada para demostrar la digestión anaeróbica a esta escala. El proyecto del digestor de Haubenschild Farms fue una muy buena experiencia con asistencia de AgSTAR y del Departamento de Comercio y Oficina de Asistencia Ambiental. El digestor de Haubenschild y su sistema de cogeneración fue construido en 1999 con un costo aproximado de US\$ 355,000.00.



Fig. 3.8 Haubenschild Farms Inc., Princeton Minnesota

Fig. 3.9 Operación diaria y sistema de digestión de la granja Haubenschild.

El sistema maneja un flujo tapón calentado y comprimido por una cubierta, un tanque de concreto instalado debajo de la tierra con una capacidad de  $1,325 \text{ m}^3$  y un sistema de cogeneración de 150kW operado por una máquina Caterpillar® 3406 que usa el biogás como combustible para producir electricidad y calor. La electricidad es vendida a la localidad. El calor recuperado es usado para calentar el digestor y proveer de calor al establo. Un cambiador de calor dentro del digestor es usado para mantener la temperatura entre  $35$  y  $40^\circ \text{ C}$ . El digestor produce  $3.9 \text{ m}^3$  de biogás por vaca por día y el sistema de cogeneración produce  $5.5 \text{ kWh}$  de electricidad por vaca por día durante el periodo de monitoreo (de enero a junio del 2000). Las ganancias fueron calculadas en \$US 62,200 al año considerando la venta de electricidad en \$US 0.0725 por kWh, basado en el tratamiento del estiércol de 425 vacas. Adicionalmente se obtuvieron ahorros de \$US 4,000 en el calentamiento de las granjas, no se usó propano durante todo el invierno del 2001.

### 3.8. **Finnie Distributing Inc.**

Finnie Distributing Inc. es una procesadora de ingredientes especializados para el alimento de animales. Como resultado del proceso de producción y operaciones de limpieza se genera agua residual muy contaminada.

Finne examinó opciones para mejorar su sistema de tratamiento de biogás. Finne seleccionó un sistema de tratamiento anaeróbico de aguas residuales debido a los bajos costos de operación y ahorros de energía que se derivan al sustituir el gas natural por biogás en calentadores.

Geomatrix Consultants diseñaron el sistema anaeróbico de Finne mediante el análisis de muestras del agua residual de Finne.

La construcción del sistema inició en el verano del 2001 y terminó en la primavera del 2002. El sistema anaeróbico de Finne es un sistema de flujo constante con agitación, el reactor donde se lleva a cabo la digestión tiene un volumen de 1,800 m<sup>3</sup> es de concreto y fue diseñado para el tratamiento diario de 72m<sup>3</sup> de agua residual. El agua residual de Finne tiene una temperatura promedio entre 35 y 40° C, no requiere de un proceso de calentamiento.

El costo aproximado del sistema anaeróbico es de \$CA 425,000. Los costos de operación anual son de \$CA 20,000, este sistema tiene una producción de 625 m<sup>3</sup> de biogás por día operando al 100%. El biogás producido tiene un valor en energía calculado en \$CA 32,700 por año.

## **CAPÍTULO 4. SELECCIÓN TÉCNICA-ECONÓMICA DEL PROCESO MÁS ADECUADO DE GENERACIÓN DE BIOGÁS**

Evaluando cada una de las tecnologías que se mostraron en el capítulo anterior, se ha decidido continuar a partir de este capítulo con la Tecnología Pfeffer debido a que esta tecnología es abierta y la información que se encontró es suficiente para el desarrollo de la Ingeniería Conceptual de este proceso, además de que esta tecnología Pfeffer está enfocada al tratamiento de residuos orgánicos sólidos.

### **4.1. Estudio general de mercado**

#### *Producto*

Los productos de esta tecnología son una fuente alterna de energía y nutrientes naturales para los vegetales, biogás y abono respectivamente.

#### *Productos sustitutos o similares.*

Otras tipos de energías alternativas o similares son:

- Energía geotérmica. Este tipo de energía hace apenas una pequeña contribución a la generación total de energía en el mundo. Estados Unidos tiene unidades comerciales en operación. La más grande tiene una capacidad de 500MW. Varios tipos de unidades se han inventado y operan, incluso un sistema dual-binario, que consume isobutano y propano como fluidos secundarios. Las técnicas están bien establecidas pero hasta ahora los campos geotérmicos con áreas bastante

extensas para ser ampliamente útiles como fuentes probadas, no han sido delineadas.

- Energía de las olas y mareas. En las regiones donde ocurren grandes mareas, existe la posibilidad de producir cantidades modestas de energía. Los franceses han creado una unidad que opera satisfactoriamente. La baja presión y lo intermitente de la operación determinan que estas unidades no sean atractivas

- Celdas de combustible. Estos dispositivos que generan electricidad sin mover partes mecánicas, tiene posibilidades muy prometedoras. Sus posibilidades teóricas se han comprendido desde hace mucho tiempo, pero las unidades prácticas constituyen una realidad apenas reciente y aún en la actualidad el requisito para producir combustible limpio limita sus alcances. Una celda de combustible es un dispositivo que carece sustancialmente de partes móviles dentro del cual, combustibles como hidrógeno, gas natural, metanol o propano puede convertirse en el doble de la cantidad de energía eléctrica que resultaría de un generador común, con la combinación de caldera y turbina. Las eficiencias están entre 40 y 80% contra el acostumbrado 25 a 40%. Una celda de combustible difiere de una batería de almacenamiento en que por lo general, su combustible gaseoso o líquido, así como el oxidante son llevados desde el exterior, mientras que en la batería ésta almacenada su combustible sólido y su oxidante en placas, donde son consumidos. Una celda de combustible opera de manera electroquímica, tal como se ilustra en la figura 4.1.

En muchos lugares de Estados Unidos resulta más barato usar gas natural o propano en las celdas de combustible que

comprar energía ya generada. También es más económico utilizar aire en vez de oxígeno para el oxidante.

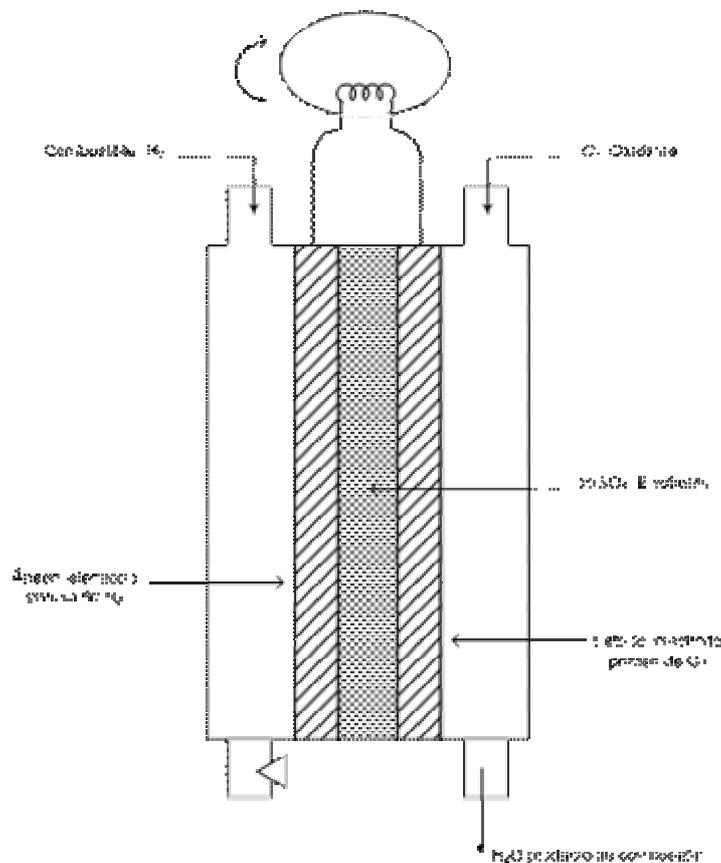


Fig. 4.1 Celda de combustible hidrógeno-oxígeno, en la cual la corriente es transportada internamente por medio de iones móviles hidronio.

- Energía de desechos sólidos. Estados Unidos en particular, produce grandes cantidades de desperdicios y basura. La disposición de su basura es un gran problema. En varias ciudades se incineran los desechos para generar vapor y electricidad. Los resultados parecen ser bastante satisfactorios, aunque el combustible derivado de los desperdicios no ha sido adecuado para algunas industrias.
- Energía solar. Existen dos serios problemas que restringen el empleo de la energía solar; es difusa ( $1 \text{ kW/m}^2$ , en promedio) y sólo está disponible en forma intermitente. Se

requieren convertidores para cambiar la energía solar disponible en la forma en que generalmente la necesita la civilización moderna: electricidad y calor de alto grado.

Los dispositivos fotovoltaicos funcionan hoy satisfactoriamente en relojes y calculadoras y como fuentes de energía eléctrica para dispositivos electrónicos en áreas aisladas. La probabilidad de que en este siglo la energía solar llegue a ser una fuente importante de energía es bastante pequeña. Uno de los principales motivos es que la gran cantidad de material que se debe reunir para aprovechar esta fuente difusa, es más de lo que la industria podría fabricar si se diera aplicación masiva a la energía solar.

– Etanol de biomasa. Los países con condiciones favorables para los cultivos, para la producción rápida de biomasa, y con gran escasez de petróleo, experimentan el etanol como combustible para los automóviles. Los intentos de Estados Unidos para utilizar alcohol derivado de grano, como combustible automotor durante la década de 1930, fracasaron por los elevados costos, por las dificultades para producir las mezclas de alcohol-gas y por la indiferencia. Un bushel de grano produce, cuando mucho 9.5 L de etanol. La destilación ordinaria produce sólo etanol de 95%; éste no se mezclará con la gasolina a menos que se elimine el 5% de agua, y esto requiere un proceso adicional costoso. Una vez mezclado, las mezclas alcohol-gasolina se separan si entra cualquier cantidad de agua en el sistema, y esto es casi imposible de evitar. Ninguno de estos problemas se presenta cuando se emplea etanol puro combustible, excepto por el costo. Brasil se ha empeñado en una gran producción de etanol para combustible de motores, mediante el aprovechamiento de la

caña de azúcar como materia prima y parece que lo hace bastante bien.

– Aceite vegetales. No existe duda alguna respecto a que puede emplearse una gran variedad de aceites vegetales, en particular como combustibles diesel, con poco o ningún procesamiento adicional. No obstante, los precios son extremadamente elevados, y la mayoría de los aceites que se producen actualmente se necesitan más como alimentos y son de más valor.

– Gradiente térmico de los océanos. Existe enorme potencial para la producción de energía debido a la diferencia entre la temperatura de la superficie del mar y la de las profundidades, sobre todo cerca del Ecuador.

Estas diferencias térmicas pueden aprovecharse para operar máquinas que produzcan electricidad. Los japoneses han construido una pequeña planta que aplica este principio. Ha sido colocada en tierra, en la isla de Nauru. Estados Unidos tiene dos unidades pequeñas en Hawái. Otros países (Francia, India, Holanda) están también ocupados en proyectos de investigación.

– Hidrógeno entubado. El hidrógeno puede convertirse en una forma secundaria de energía de importancia, si los problemas de generación, almacenamiento y transporte pueden resolverse. Como la electricidad, el hidrógeno requiere alguna otra fuente de energía para su producción. No obstante, una vez producido, el hidrógeno mantiene la potencialidad de ventajas significativas, técnicas y económicas sobre sus competidores. Por ejemplo, los cálculos preliminares

indican que entubar el hidrógeno debería ser más barato que la conducción de la electricidad por cables.

– Fusión. Aunque se habla mucho acerca de la fusión, todavía no existe un solo proceso que produzca energía por fusión y no hay seguridad de que alguna vez llegue a existir. Los entusiastas predicen que este método será totalmente no-contaminante, que estará libre de subproductos dañinos y que presentará bajos riesgos. Las desventajas operativas son así, sólo aparecen después de que un nuevo proceso se vuelve operativo a escala comercial.

Un reactor de fusión nuclear es un dispositivo en el que pueden llevarse a cabo reacciones de fusión nuclear que se mantienen por sí mismas para producir energía útil.

#### *Área De Mercado. Caracterización Del Mercado*

La Zona del Valle de México, como un continuo de gran magnitud e importancia, incluye las dieciséis delegaciones políticas del Distrito Federal y los municipios conurbados del Estado de México, conforman una enorme macrourebe de significativos problemas ambientales y socioeconómicos en todos los órdenes presentes y futuros.

Cada día en el Distrito Federal se generan alrededor de 13,250 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos producidos por 8,720,916 habitantes de la población que habitan en la ciudad, lo que lleva a contar con un indicador de generación per cápita de residuos sólidos equivalente a 1.52 kg hab/día.

Esta zona es la más densamente poblada del país, puesto que las delegaciones Iztapalapa y Gustavo A. Madero son la número uno y dos en población del Distrito Federal; mientras Ecatepec y Nezahualcóyotl son los municipios que ocupan el primero y

segundo lugar del Estado de México, concentrando 5 millones 857 mil 254 millones de habitantes y un 32.9% de la población metropolitana.

### *Tamaño Actual y Tasa De Crecimiento*

<b>Delegación</b>	<b>1995</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>
Azcapotzalco	456,145	444,194	440,613	417,670	389,486
Coyoacán	652,651	663,340	665,735	676,614	685,187
Cuajimalpa	135,778	146,683	149,529	164,883	181,865
Gustavo A. Madero	1,259,034	1,215,620	1,204,018	1,141,515	1,074,034
Iztacalco	422,205	385,422	376,575	335,280	298,066
Iztapalapa	1,691,566	1,754,921	1,771,382	1,865,340	1,972,460
Magdalena Contreras	210,800	223,048	226,136	241,900	257,956
Milpa Alta	80,531	87,360	89,074	97,380	105,316
Álvaro Obregón	676,434	678,221	678,227	675,617	668,992
Tláhuac	253,753	280,730	287,881	326,875	371,075
Tlalpan	548,457	596,653	609,384	679,502	759,363
Xochimilco	329,987	357,995	365,151	401,488	438,671
Benito Juárez	370,874	359,475	355,948	332,116	302,414
Cuauhtémoc	539,992	534,442	531,723	505,187	465,352
Miguel Hidalgo	364,821	353,413	349,831	325,151	294,179
Venustiano Carranza	486,686	473,425	469,284	441,126	405,613
Distrito Federal	8,479,714	8,554,942	8,570,491	8,627,644	8,670,029
Tabla. 4.1	Proyección de población por delegación en el Distrito Federal, 1995-2010. Fuente: COESPO, 1996. Proyecciones de población del Estado de México. Depto. De Desarrollo y Dinámica Poblacional del CONAPO. Consejo Estatal de Población del Gobierno del Estado de México.				

Es así, que la enorme ZMCM conforma una macrourbe en donde se identifican multitud de actividades socioeconómicas, que reflejan desde la perspectiva de productores de bienes y servicios, la

generación de residuos sólidos de tipo municipal, entre otros. Ello ocasiona cada vez más, la presencia de residuos sólidos en todos los ámbitos y que deben ser atendidos, desde las primeras fuentes de generación, recolección, reciclaje, transporte, tratamiento, hasta la disposición final adecuada.

Municipio	1995	1999	2000	2005	2010
Atizapán de Zaragoza	422,318	482,109	498,109	583,572	680,776
Chimalhuacán	401,282	561,032	561,032	762,790	1,038,596
Coacalco	201,504	247,683	247,683	300,645	363,695
Cuautitlán	56,917	63,407	63,407	67,647	69,515
Cuautitlán Izcalli	411,259	504,022	504,022	600,943	706,193
Ecatepec	1,441,741	1,660,496	1,660,496	1,879,114	2,094,836
Naucalpan	840,502	843,872	843,872	839,533	815,365
Nezahualcóyotl	1,224,025	1,153,975	1,153,975	1,095,768	1,027,818
Nicolás Romero	233,626	280,723	280,723	321,681	357,284
La Paz	175,328	221,789	221,789	268,668	318,396
Tlalnepantla	715,950	695,777	695,777	671,710	630,537
Tepotztlán	53,673	63,364	63,364	71,857	79,224
Tultepec	74,351	95,174	95,174	115,545	136,488
Tultitlán	355,341	442,394	442,394	533,900	634,654
Estado de México	11,611,476	12,768,360	13,046,239	14,354,323	15,531,504
Tabla.4.2	Proyección de población por delegación del Estado de México, 1995-2010. Fuente: COESPO, 1996. Proyecciones de población del Estado de México. Depto. De Desarrollo y Dinámica Poblacional del CONAPO. Consejo Estatal de Población del Gobierno del Estado de México.				

## Comportamiento de la Demanda

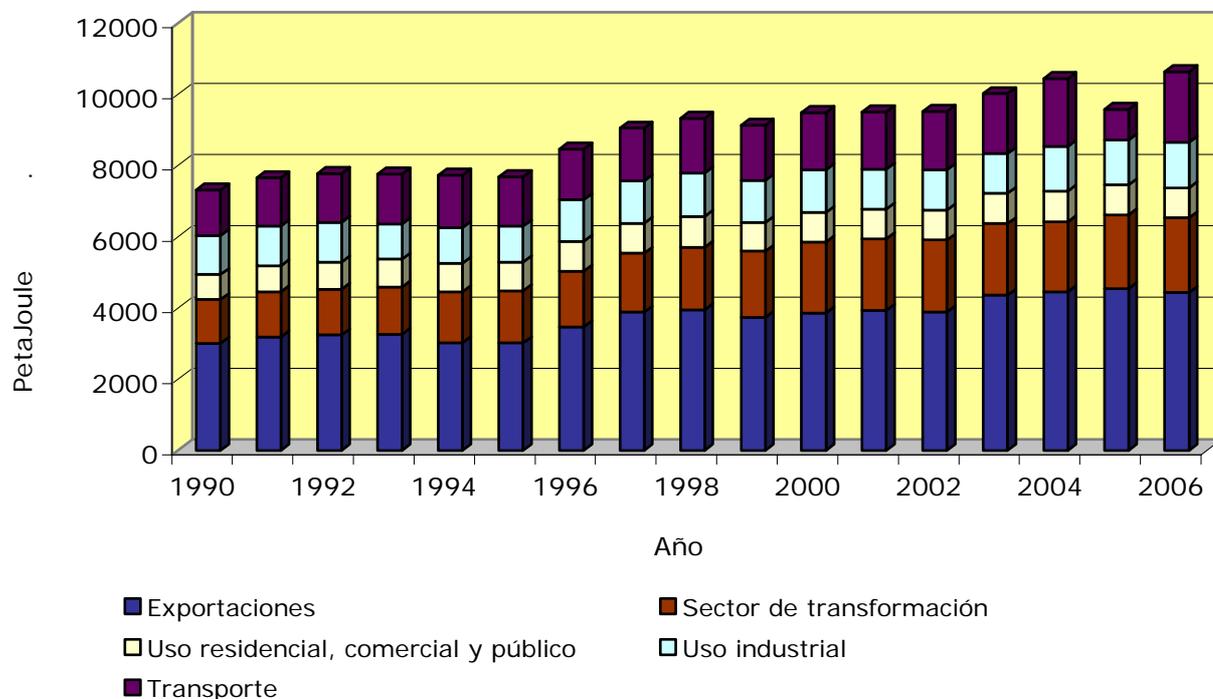


Fig. 4.2 Comportamiento de la demanda nacional de energéticos. Fuente: Sistema de Información Energética de la Secretaría de Energía. 2007.

### *Distribución Espacial y Tipología de Consumidores*

La gran heterogeneidad de condiciones socioeconómicas que se observan en la zona de estudio considerada, permite aseverar que existen áreas con características particulares, por ejemplo, se identifican zonas industriales hacia la parte norte de la ciudad de México (Azcapotzalco, Gustavo A.Madero), con municipios conurbados (Ecatepec, Tlalnepantla, Naucalpan, Cuautitlán Izcalli, etc.).

Extensas áreas habitacionales con mezcla de servicios, como la zona centro del D. F.; la zona oriente se caracteriza por fuerte densidad poblacional como Nezahualcóyotl, Iztapalapa, entre otras. Ellas definen estilos de vida y productividad y por lo tanto del tipo de generación de residuos.

### *Características Teóricas de la Demanda*

La población y las actividades económicas aumentarán en los siguientes años y con ello la demanda de energéticos en el país.

El gobierno permitirá la transformación de biogás en otras formas de energía, incluyendo la electricidad, para la comercialización del mismo.

### *Comportamiento de la Oferta*

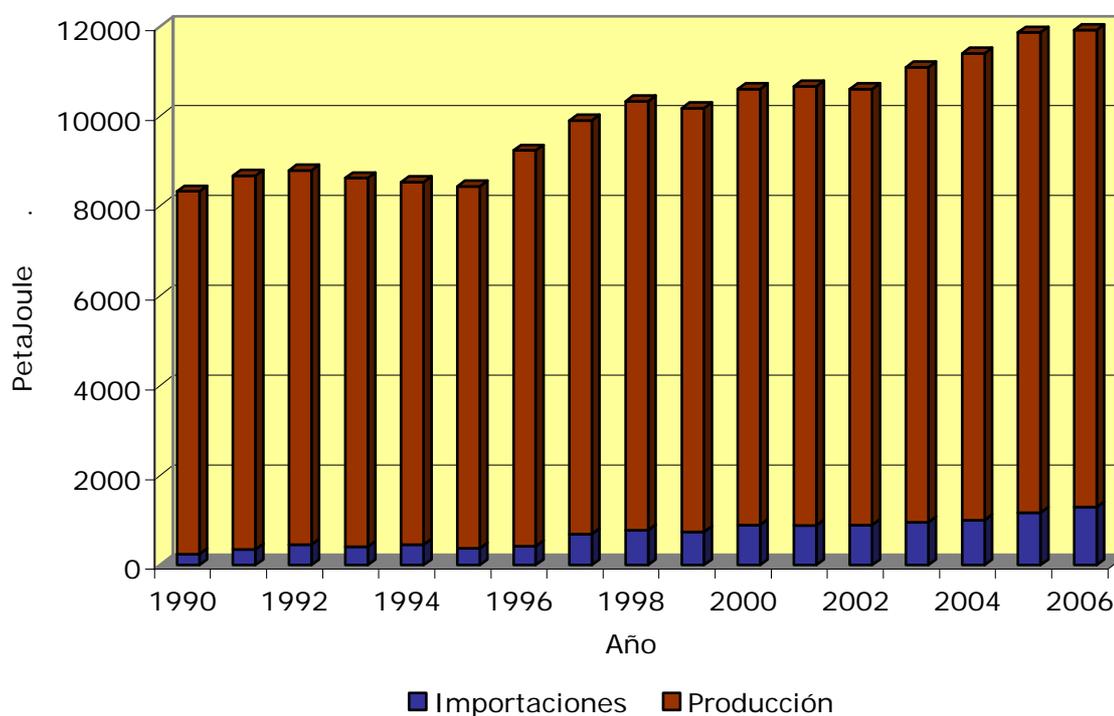


Fig. 4.3 Comportamiento de la oferta nacional de energéticos. Fuente: Sistema de Información Energética de la Secretaría de Energía. 2007. Fuente: Sistema de Información Energética de la Secretaría de Energía. 2007.

Como referencia para este estudio se tomarán como referencia los precios ofrecidos por Metrogas, empresa encargada de la distribución de gas natural en el Distrito Federal. En las tablas 4.3, 4.4 y 4.5 se observa el desglose de facturación para los sectores residencial, comercial e industrial:

<b>Sector residencial</b>					
Mes	Precio de gas	Tarifa de distribución	Cargo por servicio	Precio al público	Factura promedio
	(Pesos/GJ)	(Pesos/GJ)	(Pesos/GJ)	(Pesos/GJ)	Pesos
	A	B	C	D=A+B+C	D*Ct
Nov-06	70.46	43.66	11.15	144.06	306.16
Dic-06	71.49	43.66	11.15	145.25	308.67
Ene-07	54.60	43.66	11.15	125.82	267.40
Feb-07	69.48	43.66	11.15	142.93	303.76
Mar-07	73.74	43.66	11.15	147.83	314.17
Abr-07	70.43	43.66	11.15	144.03	306.08
May-07	76.41	41.57	10.62	147.89	314.30
Jun-07	77.30	41.57	10.62	148.91	316.47
Jul-07	69.91	41.57	10.62	140.42	298.41
Ago-07	58.64	41.57	10.62	127.45	270.87
Sep-07	55.63	41.57	10.62	123.99	263.51
Oct-07	64.83	41.57	10.62	134.57	285.99
Nov-07	65.92	41.57	10.62	135.83	288.66
Promedio	67.60	42.53	10.86	139.15	295.73

Tabla 4.3. Precios ofrecidos por Metrogas al sector residencial. Fuente: Comisión Reguladora de Energía; Estadísticas básicas de los mercados de gas y electricidad en México.

<b>Sector comercial</b>					
Mes	Precio de gas	Tarifa de distribución	Cargo por servicio	Precio al público sin IVA	Factura promedio
	(Pesos/GJ)	(Pesos/GJ)	(Pesos/GJ)	(Pesos/GJ)	Pesos
	A	B	C	D=A+B+C	D*Ct
Nov-06	70.46	17.33	0.35	101.36	35,902.40
Dic-06	71.49	17.33	0.35	102.55	36,321.95
Ene-07	54.60	17.33	0.35	83.12	29,442.09
Feb-07	69.48	17.33	0.35	100.23	35,503.21
Mar-07	73.74	17.33	0.35	105.13	37,238.46
Abr-07	70.43	17.33	0.35	101.33	35,890.18
May-07	76.41	16.49	0.34	107.23	37,979.80
Jun-07	77.30	16.49	0.34	108.25	38,342.33
Jul-07	69.91	16.49	0.34	99.75	35,332.13
Ago-07	58.64	16.49	0.34	86.79	30,741.48
Sep-07	55.63	16.49	0.34	83.33	29,515.41
Oct-07	64.83	16.49	0.34	93.91	33,262.88
Nov-07	69.52	16.49	0.34	99.30	35,173.27
Promedio	67.88	16.88	0.34	97.87	34,665.05

Tabla 4.4. Precios ofrecidos por Metrogas al sector comercial. Fuente: Comisión Reguladora de Energía; Estadísticas básicas de los mercados de gas y electricidad en México.

Sector industrial					
Mes	Precio de gas	Tarifa de distribución	Cargo por servicio	Precio al público sin IVA	Factura promedio
	(Pesos/GJ)	(Pesos/GJ)	(Pesos/GJ)	(Pesos/GJ)	Pesos
	A	B	C	D=A+B+C	D*Ct
Nov-06	70.14	5.30	0.17	86.95	30,798.51
Dic-06	71.17	5.30	0.17	88.14	31,218.06
Ene-07	54.30	5.30	0.17	68.74	24,346.34
Feb-07	69.17	5.30	0.17	85.84	30,403.39
Mar-07	73.43	5.30	0.17	90.74	32,138.64
Abr-07	70.13	5.30	0.17	86.94	30,794.43
May-07	76.11	5.04	0.16	93.51	33,120.31
Jun-07	77.00	5.04	0.16	94.53	33,482.84
Jul-07	69.91	5.04	0.16	86.38	30,594.84
Ago-07	58.34	5.04	0.16	73.07	25,881.99
Sep-07	55.33	5.04	0.16	69.61	24,655.91
Oct-07	64.52	5.04	0.16	80.18	28,399.31
Nov-07	65.62	5.04	0.16	81.44	28,847.38
Promedio	67.32	5.16	0.16	83.54	29,590.92

Tabla 4.5. Precios ofrecidos por Metrogas al sector industrial. Fuente: Comisión Reguladora de Energía; Estadísticas básicas de los mercados de gas y electricidad en México.

#### Notas metodológicas de las Tablas 4.3, 4.4 y 4.5

1. Salvo en los casos en que se indique lo contrario, el precio de gas corresponde al que aplica PEMEX, el cual se determina conforme a la Metodología Transitoria de julio de 1995. Actualmente dicho precio de VPM incluye el precio del gas natural en planta de proceso, la tarifa de transporte y el costo de servicio. Para efectos de determinar el costo del servicio, se emplean las modalidades de entrega Base Firme Mensual y Adicional Notificado.
2. En las columnas de "Cargos de Distribución"
  - i) La tarifa de distribución incluye el cargo por capacidad y el cargo por uso, considerando un factor de carga de 100%. Es decir, dicha tarifa corresponde a la suma simple de esos cargos.
  - ii) El cargo por servicio es un cargo fijo mensual. A efecto de estimar el precio final unitario, dicho cargo se multiplica por un "consumo típico, Ct" en cada sector:

Residencial:	2.1252 GJ/mes
Comercial:	354.2033 GJ/mes
Industrial	5317.2360 GJ/mes

- Los precios que se presentan son indicativos, toda vez que corresponden a una estimación considerando los supuestos planteados en los numerales 1 y 2 anteriores. Los precios reales dependen, entre otras cosas, del tipo de modalidades de entrega de gas que contrate cada distribuidor en su zona geográfica, el volumen de compra de cada usuario, las coberturas contratadas, la utilización de los sistemas de transporte respecto de la capacidad contratada, etc.
- A partir de febrero de 2006, el precio VPM se determinó de acuerdo con lo establecido en la Resolución Núm. RES/046/2005.

#### 4.2. Localización de la planta

Antes de iniciar con la selección del lugar, es conveniente saber cómo se manejan los residuos sólidos en el Distrito Federal.

El flujo que siguen los residuos sólidos urbanos diariamente desde el momento de su generación hasta su disposición final se esquematiza en la figura 4.4.

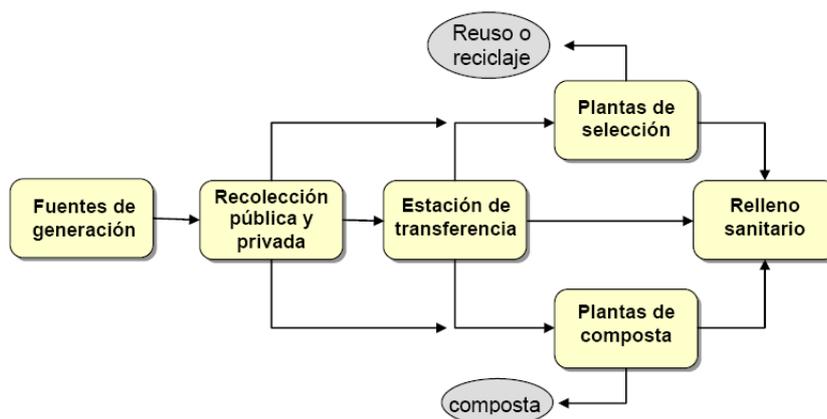


Fig. 4.4 Manejo de residuos sólidos en el Distrito Federal.

Las 16 delegaciones del Distrito Federal tienen a su cargo la recolección y transporte de los residuos sólidos urbanos a las

estaciones de transferencia (ET). Para realizar esta labor, se cuentan con un parque vehicular de 2,163 unidades, de los cuales 73 unidades cuentan con caja separada para la recolección simultánea de residuos orgánicos e inorgánicos, ver figura 4.5.

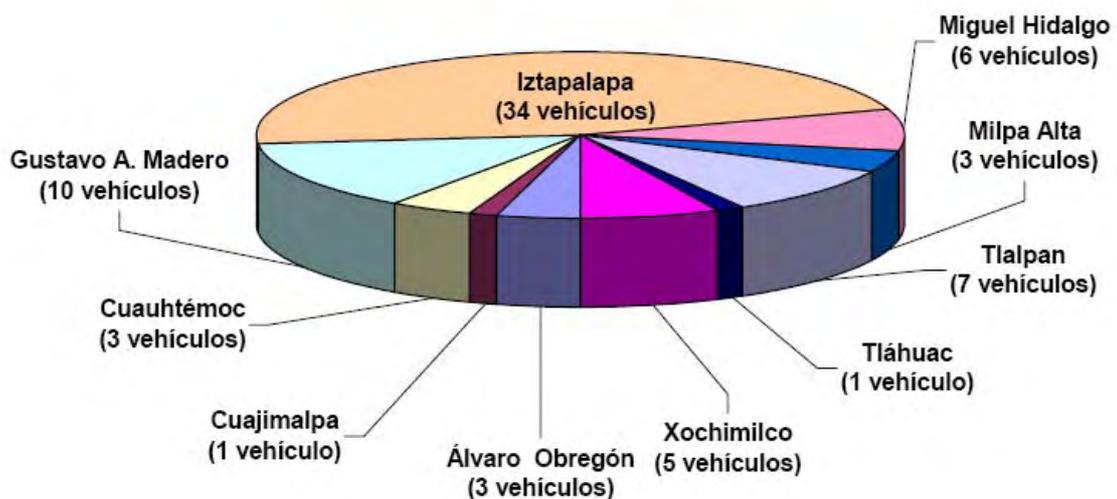


Fig. 4.5 Vehículos de doble compartimiento adquiridos por las delegaciones en el período 2004-2006.  
Fuente: Inventario de residuos sólidos del Distrito Federal 2006.

### *Estaciones de transferencia*

La Ciudad de México, dadas sus dimensiones y complejidad, cuenta con trece instalaciones de transferencia de residuos sólidos, que concentran los residuos sólidos provenientes de los servicios de recolección pública y privada y conforman una etapa intermedia en el traslado de los mismos a las plantas de selección, planta de composta y el relleno sanitario. Ver figura 4.6



Fig. 4.6 Ubicación de las estaciones de transferencia y plantas de selección del DF. Fuente: Inventario de residuos sólidos del Distrito Federal 2006.

La función de las estaciones de transferencia es mejorar la eficiencia del servicio de recolección, reduciendo el número de viajes y el tiempo de traslado de los vehículos de recolección al sitio de disposición final. La descarga de los residuos se efectúa a cajas de transferencia remolcadas por tractocamiones, con la capacidad de recibir la carga de 4 a 5 vehículos, que equivale a 30 toneladas aproximadamente.

### *Plantas de selección*

El Distrito Federal cuenta con tres plantas de selección de residuos sólidos, en las que se recuperan materiales reciclables, la organización y operación de estas plantas se realiza de manera coordinada entre la Dirección General de Servicios Urbanos (DGSU) y los gremios de selectores.

Estas tres plantas son conocidas como Bordo Poniente, San Juan de Aragón y Santa Catarina, como se aprecia en la figura 4.6 y su capacidad instalada conjunta es de 6,500 toneladas por día.

### *Plantas de composta*

Existen 13 plantas de composta en el Distrito Federal, en las que se procesan residuos orgánicos para su aprovechamiento. En la tabla 4.6 se enlistan dichas plantas y sus características principales.

Plantas de composta	Capacidad instalada (Ton/año)	Capacidad de operación (Ton/año)	Tipo de proceso	Tiempo de producción (meses)	Materia prima
Álvaro Obregón	5,280	877	Pilas aerobias	4	Troncos, ramas y maleza, estiércol de caballo provenientes de: Luz y Fuerza, Jardines del Pedregal.
Bordo Poniente	73,000	36,500	Pilas aerobias	4	Material de poda, hortalizas, lodos autorizados, alimentos caducos provenientes de: Central de Abasto, Delegaciones, generadores particulares en alto volumen, DGSU.
Cuajimalpa de Morelos	480	480	Pilas aerobias	3	Poda proveniente de: parques y jardines.
Iztapalapa	131,400	2,256	Pilas aerobias	1	Poda proveniente de: parques y jardines, residuos de panteón.
Milpa Alta (8 plantas)	164	114	Pilas aerobias	3	Restos de nopal y verdura provenientes de: Centro de acopio del nopal y la verdura, poda de parques y jardines, residuos orgánicos domiciliarios.
Xochimilco	9,125	9,125	Pilas aerobias	3	Material de poda y estiércol provenientes de: Parques y jardines, caballerizas.

Tabla 4.6 Características de las plantas de composta del Distrito Federal

El destino o uso de la composta producida puede variar de una planta a otra, sin embargo, se emplea por lo general en áreas de cultivo, áreas verdes, parques y jardines, para donación a la población en general y en algunos casos para escuelas.

### *Relleno sanitario*

El Distrito Federal cuenta con el Relleno Sanitario Bordo Poniente, operando en su Etapa IV, con 472 hectáreas de superficie y un área de disposición de 320 hectáreas.

El relleno sanitario Bordo Poniente se localiza en un predio de propiedad federal, dentro de los terrenos del antiguo Lago de Texcoco, que la Comisión Nacional del Agua destinó para ser utilizado como relleno sanitario por el Distrito Federal. Tiene una extensión total de 1,000 hectáreas de las cuales se han utilizado 721 en cuatro etapas. La vida útil de las primeras 3 etapas transcurrió de 1985 a 1995, momento en el cual entró en operación la IV Etapa (figura 4.7).

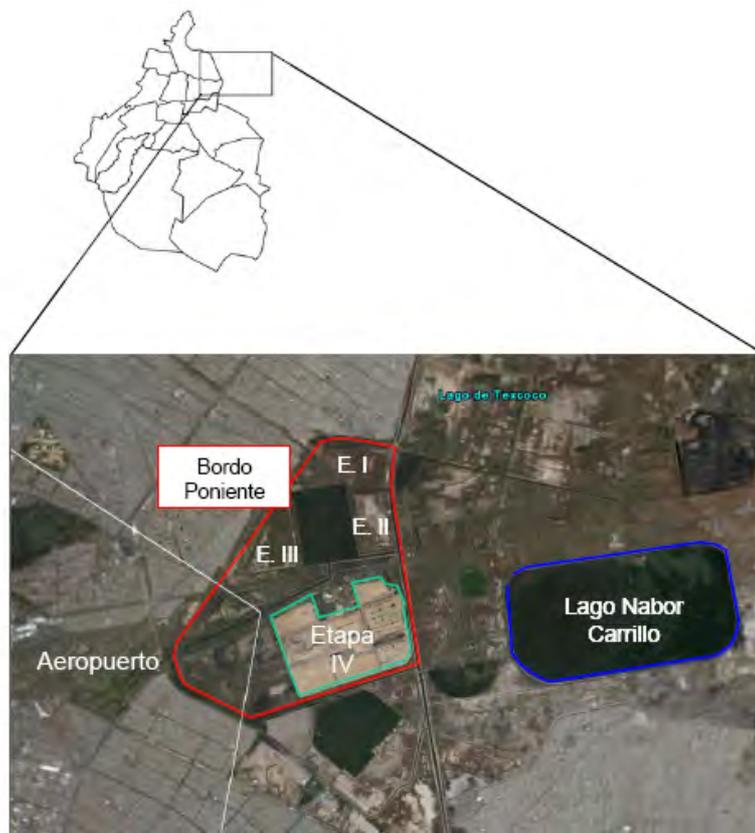


Fig. 4.7 Etapas del relleno sanitario Bordo Poniente

*Limpia, recolección y disposición final en Nezahualcoyotl*

De acuerdo a los parámetros de basura producida por habitante (835 gramos), el municipio produce diariamente alrededor de 1,250 toneladas, sin embargo a esta cifra se debe sumar la de los mercados, el rastro, la industria y la recogida en la vía pública, totalizando alrededor de unas 2,000 toneladas diarias, mismas que son enviadas al sitio de disposición final.

Una cantidad menor de desechos sólidos es recogida por recolectores privados (burreros, bicicleteros, camionetas y vehículos de mayor tamaño) que cobran por el servicio y depositan la basura en los tiraderos a cielo abierto Neza II y Neza III, causando graves problemas al ambiente.

El servicio municipal de limpia y recolección trabaja en la zona centro con 117 unidades recolectoras que atienden 123 rutas, teniendo una cobertura del 100% del territorio municipal, con un nivel de eficiencia del 80%.

En la zona norte del municipio el servicio lo realizan 26 unidades en dos turnos; no hay estaciones de transferencia, lo que produce un desgaste considerable de tiempo, recursos y esfuerzo, pues los vehículos para realizar el depósito de sus cargas en el sitio de disposición final deben acudir a la zona centro del municipio.

El sitio de disposición final, relleno controlado Neza I, es administrado por el Ayuntamiento. Existen otros dos tiraderos más en el Municipio a cielo abierto que son operados de manera privada (Neza II y Neza III) y representan una de las fuentes fundamentales de irregularidad en la prestación del servicio de limpia y disposición de desechos sólidos.

No obstante lo anterior, dentro del relleno controlado Neza I, se trabaja en un interesante programa de producción de composta, como parte integral del Proyecto Piloto de Separación de Desechos Sólidos Domiciliarios.

### *Opciones de Ubicación*

La localización de la planta es determinante para lograr que la actividad económico-industrial se lleve a cabo de manera que se obtengan los mayores beneficios. Los factores evaluados para la selección de la ubicación fueron los siguientes: capacidad eléctrica, disponibilidad de agua, planta de tratamiento de agua, servicios auxiliares, costo de los lotes, superficie promedio de las naves, transporte público, distancia a las vías de comunicación principales, distancia a las plantas de selección y plantas de composta de donde se obtendrá la materia prima, etc. La búsqueda se llevó a cabo dentro de los diversos parques industriales ya que son lugares que previamente son autorizados con fines de actividad industrial, las opciones fueron las siguientes:

- . Parque Industrial Cuautitlán Itzcalli, Edo. de México.
- . Zona Industrial Vallejo.
- . Parque Industrial Cd. de México.
- . Parque Industrial Lerma-Toluca.
- . Parque Industrial Cd. Nezahualcoyotl, Edo. de México.

En la tabla 4.7 se evalúan las opciones de ubicación considerando los factores que anteriormente se mencionaron, asignando valores números de 0= nulo a 5 disponibilidad, la mejor opción fue el Parque Industrial Cd. Nezahualcoyotl. Entre las ventajas más importantes se encuentran la cercanía a la ciudad de México que al ser la ciudad más importante del país y más densamente pobladas los desechos orgánicos se encuentran con mayor abundancia, añadiéndose la población del oriente del estado de México hace una gran fuente de materia prima.

	Cuautitlán	Vallejo	CD. México	Lerma	CD. Neza
Capacidad eléctrica	5	0	5	4	5
Disponibilidad de agua	3	5	4	4	4
Planta tratamiento agua	5	0	0	5	4
Espuela de ferrocarril	0	5	0	5	5
Red de gas	0	5	0	5	5
Transporte público	5	5	5	5	4
Servicios de apoyo	4	5	5	3	4
Disponibilidad de naves	4	4	2	5	4
Superficie promedio naves	3	3	3	4	3
Costo de lotes	3	4	3	4	5
Tamaño de los lotes	3	4	2	5	3
Distancia ciudades importantes	5	5	5	4	5
Cercanía a vías de comunicación	5	5	5	4	5
Drenaje sanitario	4	0	3	3	5
Drenaje pluvial	5	0	3	3	5
Distancia centros acopio	5	2	1	4	5
Capacidad para expansión	4	3	2	5	4
<b>TOTAL</b>	<b>63</b>	<b>55</b>	<b>48</b>	<b>72</b>	<b>75</b>

Tabla 4.7. Matriz usada para la selección de la planta generadora de bioqás.

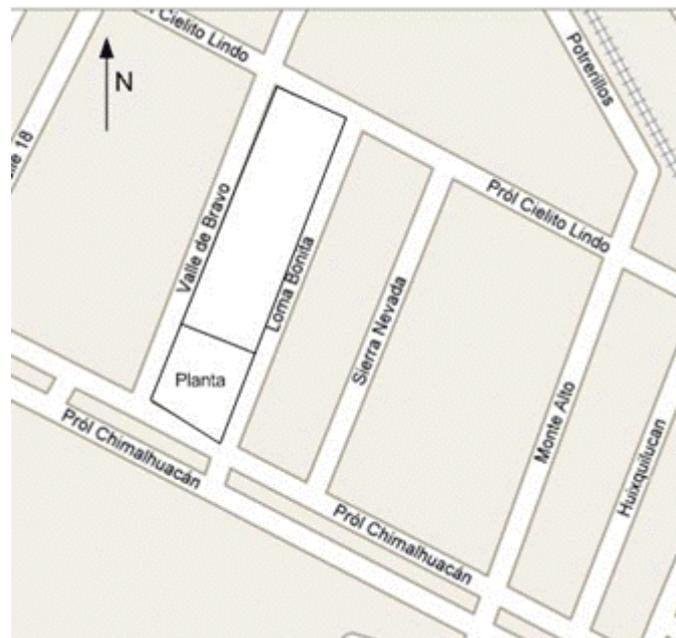


Fig. 4.8 Localización de la planta.

#### 4.2.1. Estudio de factibilidad técnica-económica

##### Costo del equipo

Clave	Descripción	Costo 2007/ \$ US
BT-101	Banda transportadora Apron	\$ 28,200.00
BT-102	Banda transportadora Campana	\$ 11,800.00
TR-101	Triturador	\$ 13,400.00
CL-101	Clasificador	\$ 139,200.00
SL-101	Soplador	\$ 21,000.00
ML-101	Mezclador-Lavador	\$ 69,200.00
DG-101	Digestor	\$ 68,100.00
GA-101	Bomba centrífuga	\$ 9,900.00
FR-101	Filtro separador rotatorio	\$ 164,000.00
SE-101	Separador líquido aire (Desorbedor)	\$ 1,313.00
CP-201	Compresor	\$ 85,000.00

Tabla 4.8. Costo del equipo.

Clave	Descripción	Costo 2007/ \$ US
AB-201	Absorbedor	\$ 210,000.00
HT-102	Cambiador de calor absorbedor-regenerador	\$ 19,400.00
RE-201	Regenerador	\$ 198,000.00
DH-201	Deshidratador	\$ 136,000.00
RH-102	Rehervidor del regenerador	\$ 15,400.00
RH-101	Rehervidor del deshidratador	\$ 15,400.00
HT-101	Cambiador de calor del deshidratador	\$ 19,400.00
<b>COSTO DEL EQUIPO</b>		<b>\$1,224,713.00</b>

Tabla 4.8. Costo del equipo (continuación).

### *Cálculo de la inversión*

Usando el método de Guthrie, tenemos:

Equipo	A	\$ US 1,224,713.00
Factor de material	$B=A*1.622$	\$ US 1,986,484.49
Factor de mano de obra	$C=A*0.58$	\$ US 710,333.54
Modulo sencillo total	$D=B+C$	\$ US 2,696,818.03
Contingencias y horarios	$E=D*0.18$	\$ US 485,427.24
Costo modular total	$F=D+E$	<b>\$ US 3,182,245.27</b>

Tabla 4.9. Cálculo de la inversión.

*Insumos, consumos y costos unitarios*

EVALUACION ECONOMICA-FINANCIERA						COSTO		
<b>INSUMOS / CONSUMOS / COSTOS UNITARIOS</b>						EQUIPO	1,224,713	
						INVERSION	3,182,245	
						TERRENO	-	
NOMBRE DEL PROYECTO: PLANTA GENERADORA DE BIOGÁS			LOCALIZACIÓN: PARQUE INDUSTRIAL NEZAHUALCOYOTL					
CAPACIDAD: 3,979,224.87 m <sup>3</sup> /año			FECHA: 30/11/2007					
CONCEPTO	CONSUMO	UNIDAD	P. U.	UNIDAD	AÑO 1	. . .	AÑO 10	
						( DOLARES ,USD )		
<b>MATERIA PRIMA:</b>								
a1	RESIDUOS DOMÉSTICOS	186,891.19	TON/AÑO	4.00000	TON	747,564.75	747,564.75	747,564.75
<b>A</b>	<b>T O T A L (a1)</b>					747,564.75	747,564.75	747,564.75
<b>SERV. AUXILIARES:</b>								
c1	ENERGIA ELÉCTRICA	87.000	KWH	0.00062	KWH	472	472	472
c2	AGUA DE ENFRIAMIENTO	3.000	M3/H	0.00040	M3	10.55	10.55	10.55
<b>C</b>	<b>T O T A L ( c1+c2 ):</b>					483	483	483
<b>MANO DE OBRA:</b>								
d1	OPERADOR	6	PERSONAS	1.5200	HR	26,630	26,630	26,630
d2	SUPERVISOR	1	PERSONAS	1.8900	HR	5,519	5,519	5,519
d3	OBREIRO GENERAL	3	PERSONAS	0.9500	HR	8,322	8,322	8,322
<b>D</b>	<b>T O T A L ( d1+d2 + d3 ):</b>					40,471	40,471	40,471
<b>PRODUCTO:</b>			<b>PRECIO DE VENTA:</b>			<b>V E N T A S</b>		
e1	BIOGÁS	144,858.92	GJ/AÑO	6.3636	GJ	921,829	921,829	921,829
e2	ABONO	112,134.71	TON/AÑO	12.0000	TON	1,345,617	1,345,617	1,345,617
<b>E</b>	<b>TOTAL VENTAS ( e1 ):</b>					2,267,446	2,267,446	2,267,446

Tabla 4.10. Insumos / Consumos / Costos unitarios.

### Costos anuales

EVALUACION ECONOMICA-FINANCIERA				
COSTOS ANUALES				
NOMBRE DEL PROYECTO: PLANTA GENERADORA DE BIOGÁS		FECHA: 30/11/2007		
CAPACIDAD: 3,979,224.87 m <sup>3</sup> /año		LOC: P.I. NEZAHUALCOYOTL		
	C O N C E P T O		AÑO 1	AÑO 10
			( DOLARES ,USD )	
	MATERIA PRIMA ( A )		747564.75	747564.75
	SERVICIOS AUXILIARES ( C )		482.83	482.83
	MANO DE OBRA DIRECTA ( D )		40,471	40,471
F	SUPERVISION ( 5% DE D )		2023.56	2023.56
G	MANTENIMIENTO (2% DEL COSTO DEL EQUIPO)		24,494	24,494
H	SUMINISTROS DE OPERACIÓN ( 10% DE G )		2,449	2,449
I	TOTAL DE COSTOS DIRECTOS ( A+B+C+D+F+G+H ):		817,486	817,486
J	DEPRECIACION ( 5 % DE W )		159,112	159,112
K	INDIRECTOS DE PLANTA ( 2 % DE W )		63,645	63,645
L	VENTAS Y DISTRIBUCION ( 1 % DE E )		22,674	22,674
M	TOTAL DE COSTOS INDIRECTOS ( J+K+L ):		245,432	245,432
N	TOTAL DE COSTOS DE PRODUCCION ( I + M ):		1,062,918	1,062,918
o1	ADMINISTRACION ( 2 % DE D )		809.42	809.42
O	TOTAL DE GASTOS GENERALES :		809.42	809.42
P	TOTAL DE COSTOS ANUALES ( N + O ):		1,063,727	1,063,727

Tabla 4.11. Costos anuales.

*Estado proforma de resultados*

EVALUACION ECONOMICA - FINANCIERA				
ESTADO PROFORMA DE RESULTADOS				
NOMBRE DEL PROYECTO: PLANTA GENERADORA DE BIOGÁS		LOC: P.I. NEZAHUALCOYOTL		
CAPACIDAD: 3,979,224.87 m <sup>3</sup> /año		FECHA: 30/11/2007		
C O N C E P T O		AÑO 1	AÑO 2	AÑO 10
		( DOLARES ,USD )		
	<b>VENTAS NETAS</b> ( E )	2,267,446	2,267,446	2,267,446
	<b>COSTOS DE PRODUCCION</b> ( N )	-1,062,918	-1,062,918	-1,062,918
<b>Q</b>	<b>UTILIDAD BRUTA</b> ( E + N )	1,204,528	1,204,528	1,204,528
	<b>GASTOS DE OPERACIÓN</b> ( O )	-809	-809	-809
<b>R</b>	<b>UTILIDAD NETA ANTES DE IMP.</b> ( Q + O )	1,203,719	1,203,719	1,203,719
<b>S</b>	<b>IMPUESTO SOBRE LA RENTA</b> ( 35 % DE R )	421,302	421,302	421,302
<b>T</b>	<b>PART. DE LOS TRABAJADORES A LAS UTILIDADES</b> ( 10 % DE R )	120,372	120,372	120,372
<b>U</b>	<b>UTILIDAD NETA DESPUES DE IMP. ( + R – S - T )</b>	662,045	662,045	662,045

Tabla 4.12. Estado proforma de resultados.

*Capital de trabajo*

EVALUACION ECONOMICA-FINANCIERA				
CAPITAL DE TRABAJO				
NOMBRE DEL PROYECTO: PLANTA GENERADORA DE BIOGÁS		LOC: P.I. NEZAHUALCOYOTL		
CAPACIDAD: 3,979,224.87 m <sup>3</sup> /año		FECHA: 30/11/2007		
	C O N C E P T O		AÑO 1	. . . AÑO 10 ( DOLARES ,USD )
v1	CAJA Y BANCOS ( 15 DIAS DE N )		48,314	48,314 48,314
v2	CUENTAS POR COBRAR ( 15 DIAS DE E )		103,066	103,066 103,066
	<b>INVENTARIOS ( v3+v4):</b>			
v3	MATERIA PRIMA (15 DIAS DE B )		33,980	33,980 33,980
v4	PRODUCTO TERMINADO (15 DIAS DE E )		103,066	103,066 103,066
v5	CUENTAS POR PAGAR ( 30 DIAS DE E )		206,131	206,131 206,131
<b>V</b>	<b>C A P I T A L D E T R A B A J O ( v1+v2+v3+v4+v5 ):</b>		494,558	494,558 494,558

Tabla 4.13. Capital de trabajo.

### Flujo de efectivo

EVALUACION ECONOMICA-FINANCIERA							
FLUJO DE EFECTIVO							
NOMBRE DEL PROYECTO: PLANTA GENERADORA DE BIOGÁS				LOCALIZACIÓN: P. I. NEZAHUALCOYOTL			
CAPACIDAD: 3,979,224.87 m <sup>3</sup> /año				FECHA: 30/11/2007			
	CONCEPTO	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
W	INVERSION FIJA	-3,182,245					
X	TERRENO	0					
V	CAPITAL DE TRABAJO		-494,558				
	UTILIDAD NETA DESP. DE IMP. (U)		662,045	1,203,719	1,203,719	1,203,719	1,203,719
W1	VALOR DE RESCATE Y TERRENO (0.1 W + X)						
V1	RECUPERACION DEL CAPITAL DE TRABAJO (V)						
	DEPRECIACION (J)		159,112.264	159,112.264	159,112.264	159,112.264	159,112.264
Y	FLUJO DE EFECTIVO (W+X+V+U+W1+V1+J)	-3,182,245	326,600	1,362,831	1,362,831	1,362,831	1,362,831
Y1	Y DESCONTADO (i=10%) Y1 = (Y/(1+i)^t)	(3,182,245)	296,909	1,126,307	1,023,915	930,832	846,211
Y2	Y1 ACUMULADO	(3,182,245)	(2,885,336)	(1,759,029)	(735,114)	195,718	1,041,929
	CONCEPTO	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10	
W	INVERSION FIJA						
X	TERRENO						
V	CAPITAL DE TRABAJO						
	UTILIDAD NETA DESP. DE IMP. (U)	1,203,719	1,203,719	1,203,719	1,203,719	1,203,719	
W1	VALOR DE RESCATE Y TERRENO (0.1 W + X)						0
V1	RECUPERACION DEL CAPITAL DE TRABAJO (V)						494,558
	DEPRECIACION (J)	159,112.264	159,112.264	159,112.264	159,112.264	159,112.264	
Y	FLUJO DE EFECTIVO (W+X+V+U+W1+V1+J)	1,362,831	1,362,831	1,362,831	1,362,831	1,857,389	
Y1	Y DESCONTADO (i=10%) Y1 = (Y/(1+i)^t)	769,283	699,348	635,771	577,973	716,104	
Y2	Y1 ACUMULADO	1,811,212	2,510,560	3,146,330	3,724,304	4,440,408	

Tabla 4.14. Flujo de efectivo

#### Parámetros de rentabilidad

##### Tasa interna de rendimiento (TIR)

<b>33%</b>	TIR= i Tal que VPN = 0
------------	------------------------

##### Valor presente neto (VPN)

<b>\$ US 4,440,408</b>	VPN (i=10%)= W + SY/(1+i)^t
------------------------	-----------------------------

##### Período de recuperación de la inversión (PRI)

<b>5.03 años</b>	PRI = (-W+3031120.62)/1236478.56 ( Interpolación)
------------------	---

## **CAPÍTULO 5. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO (DFP) SELECCIONADO**

### **5.1. Notas**

- La imagen mostrada a continuación es el diagrama de flujo de proceso que muestra de una forma clara la composición de las corrientes y equipos involucrados en la generación de biogás mediante la tecnología Pfeffer.
- Las corrientes principales, las que conducen la transformación de materias primas al biogás (el producto de interés), están numeradas del 1 al 13. A todos los equipos se les asignó una clave la cual se relaciona con el nombre del equipo, como se puede observar en la lista de equipo.
- Las líneas segmentadas indican los límites de batería de la planta.
- MEA es la abreviación de la monoetanolamina.
- N<sub>FIJADO</sub> incluye al nitrógeno amoniacal y nitratos.



## CAPÍTULO 6. LISTA DE EQUIPOS CON PREDIMENSIONAMIENTO

### 6.1. Transformación química: Reactor

El reactor químico es el corazón de todo proceso químico. Los procesos químicos modifican la materia aumentando su valor. Generalmente las unidades que involucran procesos de separación son los componentes de mayor tamaño en un proceso químico, tienen la función de purificar la materia prima antes de entrar al reactor y purificar los productos después de abandonar el reactor. La figura 6.1 muestra un diagrama general de un proceso químico.

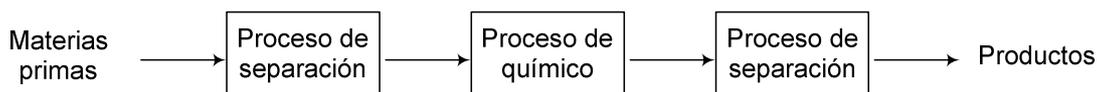


Fig. 6.1. Diagrama general de un proceso químico.

Las materias primas generalmente son purificadas para tener la composición adecuada para ser tratadas en el reactor. Después de dejar el reactor químico, la materia que no reaccionó, algunos solventes y otros subproductos deben ser separados del producto deseado antes de ser vendido o usado como reactivo en otro proceso químico.

Como ya se mencionó el equipo más importante en cualquier proceso químico es el reactor químico. En un proceso químico típico el capital y los costos de operación del reactor pueden ser de sólo 10 al 25% del total, las unidades de separación determinan el tamaño y el costo del proceso.

Los factores que hay que tener en cuenta para llevar a cabo o desarrollar una reacción química son:

- Condiciones de presión, temperatura, y composición necesarias para que los materiales entren en estado de reacción.
- Las características termodinámicas y cinéticas de la reacción.
- Las fases (sólido, líquido, gaseoso) que se encuentran presentes en la reacción.
- Formas de cambios químicos:
  - . *Descomposición*, consiste en que una molécula se divide en moléculas más pequeñas, átomos o radicales.
  - . *Combinación*: ésta se realiza cuando una molécula o átomo se une con otra especie para formar un compuesto nuevo.
  - . *Isomerización*, en este caso la molécula no efectúa ninguna descomposición externa o adición a otra, es simplemente un cambio de configuración estructural interna.

Los tipos de reacciones más comunes son las siguientes:

- *Reacciones Homogéneas*: Cuando se afecta solamente una fase, ya sea gaseosa, sólida, o líquida.
- *Reacciones Heterogéneas*: Cuando se requiere la presencia de al menos dos fases para que tenga lugar la reacción a una velocidad deseada.
- *Reacciones Enzimáticas*: Utilizan catalizadores biológicos (proteínas con alto peso molecular, con centros activos, y que trabajan a temperaturas relativamente bajas).
- *Reacciones Catalíticas*: Son aquellas reacciones que requieren de una sustancia adicional (que no aparece en el balance global) para modificar la velocidad de reacción; esta sustancia por su mera presencia provoca la reacción química, reacción que de otro modo no ocurriría o se llevaría a cabo en un tiempo infinito.

- *Reacciones No Catalíticas:* Los materiales reactantes no necesitan ninguna sustancia adicional para dar lugar a la reacción química.
- *Reacciones Autocatalíticas:* En esta reacción, uno de los productos formados actúa como catalizador, participando en otra etapa del proceso donde velocidad de reacción es más rápido que en la primera.
- *Reacciones Endotérmicas:* Son aquellas que absorben calor del exterior.
- *Reacciones Exotérmicas:* Son aquellas que liberan energía en forma de calor.

Una definición más precisa de un reactor químico podría ser la siguiente:

Unidad de proceso diseñada para que en su interior se lleve a cabo una o varias reacciones químicas, la cual está constituida por un recipiente cerrado, el cual cuenta con corrientes de entrada y salida para sustancias químicas, y está gobernado por un algoritmo de control.

Los reactores químicos tienen como funciones principales:

- Asegurar el tipo de contacto o modo de fluir de los reactantes en el interior del tanque, para conseguir una mezcla deseada con los materiales reactantes.
- Proporcionar el tiempo suficiente de contacto entre las sustancias y con el catalizador, para conseguir la extensión deseada de la reacción.
- Permitir condiciones de presión, temperatura y composición de modo que la reacción tenga lugar en el grado y a la velocidad deseada, atendiendo a los aspectos termodinámicos y cinéticos de la reacción.

Existen infinidad de tipos de reactores químicos, y cada uno responde a las necesidades de una situación en particular, entre los tipos más importantes, más conocidos, y mayormente utilizados en la industria se puede mencionar los siguientes:

- a) **Reactor Discontinuo**. Es aquel en donde no entra ni sale material durante la reacción, sino más bien, al inicio del proceso se introducen los materiales, se lleva a las condiciones de presión y temperatura requeridas, y se deja reaccionar por un tiempo preestablecido, luego se descargan los productos de la reacción y los reactantes no convertidos. También es conocido como reactor tipo Batch.
- b) **Reactor Continuo**. Mientras tiene lugar la reacción química al interior del reactor, éste se alimenta constantemente de material reactante, y también se retiran ininterrumpidamente los productos de la reacción.
- c) **Reactor Semicontinuo**: Es aquel en el cual inicialmente se carga de material todo el reactor, y a medida que tiene lugar la reacción, se va retirando productos y también incorporando más material de manera casi continua.
- d) **Reactor Tubular**. En general es cualquier reactor de operación continua, con movimiento constante de uno o todos los reactivos en una dirección espacial seleccionada, y en el cual no se hace ningún intento por inducir al mezclado. Tienen forma de tubos, los reactivos entran por un extremo y salen por el otro.
- e) **Tanque con Agitación Continua**. Este reactor consiste en un tanque donde hay un flujo continuo de material reaccionante y desde el cual sale continuamente el material que ha reaccionado. La agitación del contenido es esencial, debido a que el flujo interior debe estar en constante circulación y así producir una mezcla uniforme.

- f) **Reactor de Lecho Fluidizado.** Se utiliza para reacciones donde intervengan un sólido y un fluido (generalmente un gas). En estos reactores la corriente de gas se hace pasar a través de las partículas sólidas, a una velocidad suficiente para suspenderlas, con el movimiento rápido de partículas se obtiene un alto grado de uniformidad en la temperatura evitando la formación de zonas calientes.
- g) **Reactor de Lecho Fijo.** Los reactores de lecho fijo consisten en uno o más tubos empacados con partículas de catalizador, que operan en posición vertical. Las partículas catalíticas pueden variar de tamaño y forma: granulares, cilíndricas, esféricas, etc. En algunos casos, especialmente con catalizadores metálicos como el platino, no se emplean partículas de metal, sino que éste se presenta en forma de mallas de alambre. El lecho está constituido por un conjunto de capas de este material. Estas mallas catalíticas se emplean en procesos comerciales como por ejemplo para la oxidación de amoníaco y para la oxidación del acetaldehídico a ácido acético.
- h) **Reactor de Lecho con Esgurrimiento.** En estos reactores el catalizador sólido está presente como en el lecho fijo. Los reactivos se hacen pasar en corrientes paralelas o a contracorriente a través del lecho.
- i) **Reactor de Lecho de Carga Móvil.** Una fase fluida pasa hacia arriba a través de un lecho formado por sólidos. El sólido se alimenta por la parte superior del lecho, se mueve hacia debajo de la columna y se saca por la parte inferior.
- j) **Reactor de Burbujas.** Permiten hacer burbujear un reactivo gaseoso a través de un líquido con el que puede reaccionar, porque el líquido contiene un catalizador disuelto, no volátil u otro reactivo. El producto se puede sacar del reactor en la corriente gaseosa.

- k) **Reactor con Combustible en Suspensión.** Son similares a los reactores de burbujeo, pero la fase "líquida" está formada por una suspensión de líquidos y partículas finas del catalizador sólido.
- l) **Reactor de Mezcla Perfecta.** En este reactor las propiedades no se modifican ni con el tiempo ni con la posición, ya que suponemos que estamos trabajando en estado de flujo estacionario y la mezcla de reacción es completamente uniforme. El tiempo de mezcla tiene que ser muy pequeño en comparación con el tiempo de permanencia en el reactor. En la práctica se puede llevar a cabo siempre que la mezcla fluida sea poco viscosa y esté bien agitada
- m) **Reactores de Recirculación.** Pueden ser *con dispositivo separador*, cuando se toma parte de la corriente de salida y se llevan directamente a la entrada del reactor o *sin dispositivo separador*, cuando en la salida del reactor colocamos un dispositivo separador que hace que se separen reactivos y productos, luego los reactivos se recirculan de nuevo al reactor.
- n) **Reactores de Membrana.** Son aquellos que combinan la reacción y la separación en una sola unidad; la membrana selectivamente remueve una (o más) de las especies reactantes o productos. Estos reactores han sido comúnmente usados para aplicaciones en las cuales los rendimientos de la reacción están limitados por el equilibrio. También han sido propuestos y usados para otras aplicaciones; para incrementar el rendimiento y la selectividad de reacciones enzimáticas y catalíticas influyendo a través de la membrana sobre la concentración de una (o más) especies intermedias, removiéndolas selectivamente (o ayudando a mantenerlas en una concentración baja), evitando la posibilidad de que dichos

compuestos envenenen o desactiven el catalizador y para proveer una interfase controlada entre dos o más reactantes.

- o) **Fermentadores**. Este tipo de reactores utilizan hongos, los cuales forman un cultivo, el cual a su vez se transforma en una "sopa" espesa que contiene crecimientos filamentosos. Un ejemplo se encuentra en la fabricación de antibióticos como la penicilina.
- p) **Reactor Trickle Bed**. Este tipo de reactor supone la existencia de un flujo continuo de gas y otro de líquido hacia abajo sobre un lecho fijo de partículas sólidas catalíticas, las características de las partículas sólidas y de su empaquetamiento, junto con los caudales y propiedades de las dos corrientes de fluidos determinarán el régimen de flujo del reactor y también sus propiedades fluido-dinámicas.
- q) **Reactores Isotérmicos**. Aquellos que trabajan u operan a una misma temperatura constante.
- r) **Reactores Isobáricos**. Aquellos que trabajan u operan a una misma presión constante.

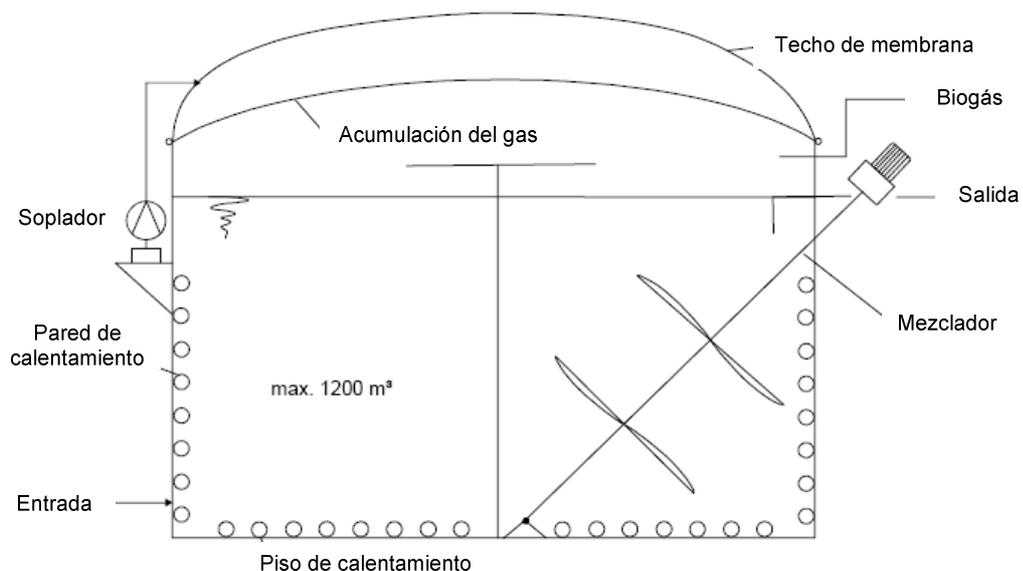


Fig. 6.2. Diagrama de un reactor químico usado en la producción de biogás.

## 6.2. **Desintegración mecánica: Triturador**

La desintegración mecánica es un término genérico de reducción de tamaño. Las quebrantadoras y los molinos son tipos de equipos de desintegración. Una quebrantadora o molino ideal debieran (1) tener una gran capacidad, (2) requerir poco consumo de energía por unidad de producto, y (3) dar lugar a un producto de un único tamaño, o distribución de tamaños, que se desee. El método habitual para estudiar el comportamiento del equipo de proceso es establecer una operación ideal como patrón y comparar las características del equipo real con las de la unidad ideal, observando la diferencia entre ambas. Cuando se aplica este método al equipo de desintegración y molienda, las diferencias entre la unidad ideal y la real son muy grandes y, a pesar de los amplios estudios realizados, no se han aclarado totalmente las deficiencias. Por otra parte, se han desarrollado correlaciones empíricas útiles para predecir el comportamiento del equipo a partir de la incompleta teoría disponible.

Los aspectos fundamentales de la forma y tamaño del producto, así como el consumo de energía, son comunes a la mayor parte de las máquinas y se pueden considerar de una forma más general.

El objetivo de la trituración y molienda es producir pequeñas partículas a partir de otras más grandes. Las partículas más pequeñas son deseables por su gran superficie o bien por su forma, tamaño y número. Una medida de la eficacia de la operación se basa en la energía que se requiere para crear nueva superficie, el área superficial de una unidad de masa de partículas aumenta mucho cuando las partículas disminuyen de tamaño.

Contrariamente a un triturador o molino ideal, una unidad real no da lugar a un producto uniforme, con independencia de que la alimentación sea o no de tamaño uniforme. El producto siempre consta de una mezcla de partículas, con tamaño variable desde un máximo definido hasta un mínimo submicroscópico.

Algunas máquinas, especialmente en el caso de molinos, están diseñadas para controlar el tamaño de las partículas más grandes en sus productos, pero en cambio las más finas no están bajo control. En algunos tipos de molinos los tinos se reducen a un mínimo, pero no se eliminan totalmente. Si la alimentación es homogénea, tanto por lo que se refiere al tamaño de las partículas como a su estructura física y química, las formas de las distintas partículas de los productos pueden ser bastante uniformes; en caso contrario, las proporciones de los granos en los distintos tamaños de un solo producto pueden variar considerablemente.

La relación de diámetros entre las partículas más grandes y más pequeñas en un material triturado es del orden de  $10^4$ . Debido a esta enorme variación de tamaños de las partículas individuales, las relaciones que son adecuadas para tamaños uniformes han de modificarse cuando se aplican a tales mezclas.

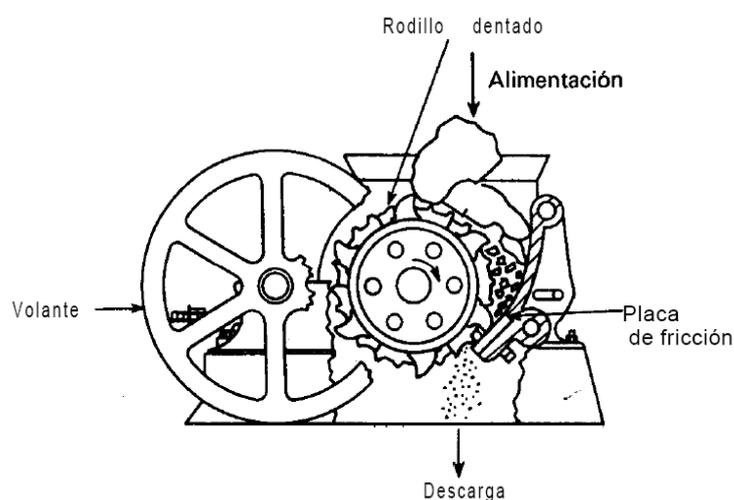


Fig. 6.3. Trituradora de un solo rodillo dentado.

### 6.3. Separación fraccionada de sólidos: Clasificador

El equipo que separa los sólidos en fracciones recibe el nombre de un clasificador, este equipo funciona bajo los fundamentos de sedimentación.

Los clasificadores mecánicos son muy utilizados en la molienda en circuito cerrado (véase la figura 6.4), especialmente en las

operaciones metalúrgicas. En este caso las partículas relativamente gruesas se llaman arenas mientras que la suspensión de partículas finas recibe el nombre de zimos. Se deja tiempo suficiente para que las arenas sedimenten hasta el fondo del dispositivo mientras que los limos salen con el líquido efluente.

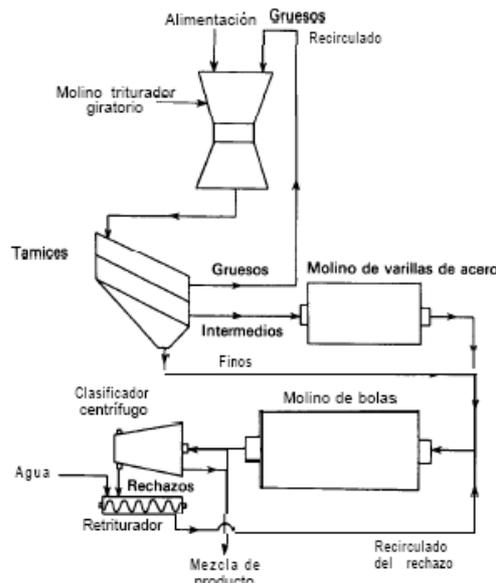


Fig. 6.4. Diagrama de flujo para molienda en circuito cerrado.

En un clasificador mecánico típico la cámara de sedimentación está inclinada y el líquido rebosa por el extremo inferior. La suspensión alimento se introduce de forma continua por un punto intermedio. La velocidad de flujo y la concentración de la suspensión se ajustan de forma que los linos no tengan tiempo de sedimentar sino que salgan con el líquido que abandona el clasificador. Las partículas más grandes decantan hasta el fondo de la cámara y después son retiradas.

En el clasificador de flujo cruzado que se ilustra en la figura 6.5, la cámara es semicilíndrica y está inclinada con un ángulo de aproximadamente  $12^\circ$  con la horizontal. Un transportador helicoidal rotatorio transporta hacia arriba los sólidos sedimentados a lo largo del fondo de la cámara, los saca del depósito de líquido y los lleva hasta el vertedero de descarga. Este clasificador opera bien con

partículas gruesas para devolverlas al molino, de forma que no se necesitan transportadores y elevadores auxiliares. Sin embargo, para separaciones nítidas con partículas más finas deben utilizarse otros tipos de clasificadores.

Los dispositivos que separan partículas de diferente densidad se conocen como clasificadores lavadores. Se utilizan los dos métodos principales de separación: lavadero por flotación y sedimentación diferencial.

*Métodos de hundimiento y flotación.* Los métodos de hundimiento y flotación utilizan un medio líquido de separación cuya densidad es intermedia entre el material ligero y el pesado. La separación se produce porque las partículas pesadas sedimentan a través del medio, mientras que las más ligeras flotan. Este método presenta la ventaja, en principio, de que la separación depende solamente de la diferencia de densidades de las dos sustancias y es independiente del tamaño de las partículas. Este método también se denomina separación de fluido espeso.

*Métodos de sedimentación diferencial.* Los métodos de sedimentación diferencial utilizan la diferencia entre las velocidades terminales que puedan existir entre sustancias de diferente densidad. La desventaja del método reside en que como la mezcla de materiales a separar comprende un intervalo de tamaños de partícula, las más grandes y ligeras sedimentarán con la misma velocidad que las más pequeñas y pesadas, por lo que se obtendrá una fracción mezclada.

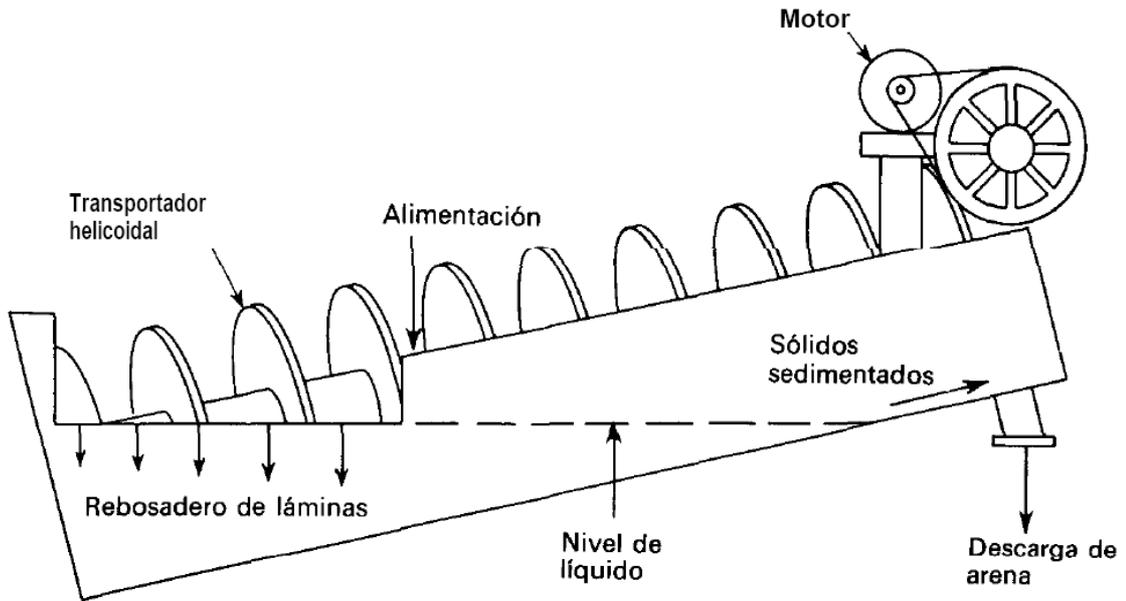


Fig. 6.5. Clasificador de sedimentación húmeda con flujo cruzado.

#### 6.4. **Movimiento de fluidos: Bombas, Sopladores y Compresores**

Los fluidos se mueven a través de tuberías, aparatos o la atmósfera, por medio de bombas, ventiladores, sopladores y compresores. Estos dispositivos aumentan la energía mecánica del fluido. El aumento de energía puede emplearse para incrementar la velocidad, la presión o la altura del fluido. En el caso especial de metales líquidos, la energía puede ser suministrada por medio de campos electromagnéticos giratorios. Los elevadores de aire, las trompas y los eyectores, mueven al fluido utilizando la energía de un segundo fluido. Sin embargo, el método más común de comunicar energía es por medio de un desplazamiento positivo o de una acción centrífuga suministrada por fuerzas exteriores. Estos métodos conducen a las dos clases principales de aparatos para el movimiento de fluidos: en primer lugar, los que aplican directamente presión al fluido, y en segundo lugar, los que producen rotación por medio de un par de fuerzas. En el primer grupo están incluidos los aparatos de presión y, en el segundo, las bombas centrífugas, sopladores y

compresores. Por otra parte, en los aparatos que comunican presión por desplazamiento positivo, la fuerza puede ser aplicada al fluido, bien por medio de un émbolo que acciona dentro de un cilindro, o bien por dispositivos giratorios de presión. El primer grupo comprende las llamadas máquinas alternativas y el segundo corresponde a los aparatos de tipo rotatorio.

Los términos bomba, ventilador, soplador y compresor, no tienen siempre un significado preciso. Por ejemplo, una bomba de aire y una bomba de vacío son términos que se utilizan para designar máquinas que comprimen un gas. Sin embargo, una bomba es generalmente un aparato para mover un líquido, y un ventilador, un soplador o un compresor comunican energía a un gas. Los ventiladores desplazan grandes volúmenes de gas (generalmente aire) en espacios abiertos o por el interior de conducciones de gran diámetro. Son máquinas rotatorias de baja velocidad y generan presiones del orden de unas pocas pulgadas de agua. Los sopladores son máquinas rotatorias de elevada velocidad, que operan con desplazamiento positivo o fuerza centrífuga, y que desarrollan una presión máxima de unas 2 atm. Los compresores descargan a presiones desde 2 atm hasta miles de atmósferas.

Sopladores y compresores. Al aumentar adiabáticamente la presión de un fluido compresible, aumenta también la temperatura del mismo. Este aumento de temperatura presenta varias desventajas. Puesto que el volumen específico del fluido aumenta con la temperatura, el trabajo que se requiere para comprimir una unidad de masa de fluido es mayor que si la compresión fuese isotérmica.

Desde el punto de vista de la mecánica de fluidos, los fenómenos que tienen lugar en estos aparatos pueden clasificarse atendiendo a que el flujo sea compresible o no compresible. En bombas y ventiladores la densidad del fluido no varía apreciablemente y en su tratamiento resulta adecuada la teoría del flujo no compresible. En sopladores y compresores el aumento de densidad es demasiado

grande para que pueda justificarse la suposición simplificante de densidad constante, de forma que es preciso utilizar la teoría del flujo compresible.

En todos los aparatos son importantes las características de operación, así como las exigencias de eficacia. Evidentemente son importantes la capacidad de flujo (generalmente medida en flujo volumétrico por unidad de tiempo para una densidad especificada), los requerimientos de potencia y la eficacia mecánica. También son deseables la seguridad de operación y la facilidad de mantenimiento. En unidades pequeñas es más importante la sencillez de operación que un rendimiento mecánico elevado que ahorraría solamente unos pocos kilovatios de potencia.

#### **6.5. Contacto de las fases: Mezclador**

El éxito de muchas operaciones industriales depende de la eficaz agitación y mezcla de fluidos. Aunque con frecuencia tienden a confundirse, agitación y mezcla no son sinónimas. La agitación se refiere al movimiento inducido de un material en una forma específica, generalmente con un modelo circulatorio dentro de algún tipo de contenedor. La mezcla es una distribución al azar de dos o más fases inicialmente separadas. Un único material homogéneo, tal como un tanque con agua fría, puede ser agitado pero, en cambio, no puede mezclarse mientras no se le adicione otro material, tal como una cierta cantidad de agua caliente o algún sólido pulverulento.

La operación de mezcla es mucho más difícil de estudiar y describir que la agitación. Los tipos de flujo de la velocidad de un líquido en un tanque agitado, aunque complejos, son bastante definidos y reproducibles. El consumo de potencia se mide fácilmente. Los resultados de los estudios de mezcla, sin embargo, son difíciles de reproducir y dependen en gran medida de cómo se defina la

«mezcla» por el experimentador. Con frecuencia el criterio de mezcla es visual, como ocurre en la utilización de fenómenos de interferencia para seguir la mezcla de gases en una conducción o en el cambio de color de un indicador ácido-base, para la determinación del grado de mezcla de líquidos. Otros criterios que han sido utilizados son, la velocidad de caída de las fluctuaciones de concentración que tienen lugar cuando un fluido contaminante se inyecta en la corriente del fluido; la variación de composición de pequeñas muestras tomadas al azar, en distintos puntos de la mezcla; la velocidad de transferencia de un soluto de una fase líquida a otra; y en mezclas sólido-líquido, la uniformidad que se observa visualmente en la suspensión.

**Mezcla de líquidos miscibles.** La mezcla de líquidos miscibles en un tanque es un proceso rápido si el régimen de flujo es turbulento. El rodete produce una corriente de alta velocidad y el fluido probablemente se mezcla con rapidez en la región próxima al rodete debido a la intensa turbulencia. A medida que la corriente se modera, arrastrando algo de líquido y fluyendo a lo largo de la pared, hay algo de mezcla radial debido a que los grandes remolinos se rompen en otros más pequeños, pero probablemente hay poca mezcla en la dirección de flujo. El líquido completa un lazo de circulación y retorna a la entrada del rodete, donde ocurre de nuevo una vigorosa mezcla. Los cálculos basados en este modelo ponen de manifiesto que debería alcanzarse una mezcla esencialmente completa (99 por 100) si el contenido del tanque circulase alrededor de 5 minutos.

**Mezcla en chorros.** En grandes tanques de almacenamiento, la mezcla se realiza a veces utilizando un chorro de líquido que entra lateralmente. La corriente mantiene su identidad durante una distancia considerable, el comportamiento de un chorro circular de líquido que sale de una boquilla y fluye a alta velocidad dentro de una masa estancada del mismo líquido. La velocidad en el chorro a la

salida de la boquilla es uniforme y constante. Permanece así formando un núcleo cuya sección disminuye con la distancia a la boquilla. El núcleo está rodeado por un chorro turbulento que se expande, en el cual la velocidad radial disminuye con la distancia a la línea central del chorro. El núcleo que se va estrechando desaparece a una distancia de la boquilla de  $4.3 D_i$ , donde  $D_i$  es el diámetro de la boquilla. El chorro turbulento mantiene su integridad bastante más allá del punto en el que desaparece el núcleo, pero su velocidad va disminuyendo paulatinamente. El crecimiento radial de la velocidad va acompañado de un aumento de la presión de acuerdo con la ecuación de Bernoulli. El fluido circula hacia el interior del chorro y es absorbido, acelerado y mezclado dentro del chorro aumentado. Este proceso recibe el nombre de *arrastré*.

**Mezcladores sin movimiento.** Los gases o los fluidos no viscosos pueden con frecuencia mezclarse satisfactoriamente, haciéndolos circular juntos a través de una determinada longitud de conducción abierta o de una tubería que contiene placas con orificios o placas deflectoras segmentadas. En condiciones adecuadas la longitud de tubería puede ser tan corta como 5 a 10 diámetros de tubería, pero se recomiendan de 50 a 100 diámetros de tubería”.

Los trabajos más difíciles de mezclado se llevan a cabo mediante mezcladores sin movimiento, que son aparatos comerciales en los que elementos estacionarios dividen y recombinan sucesivamente partes de la corriente del fluido. En el mezclador que se presenta en la figura 6.6, cada uno de los elementos helicoidales cortos divide la corriente en dos, la hace girar un ángulo de  $180^\circ$ , y la descarga en el elemento siguiente que está colocado formando un ángulo de  $90^\circ$  con el borde trasero del primer elemento. El segundo elemento divide nuevamente la corriente ya dividida y la gira  $180^\circ$  en sentido contrario. Por tanto, para  $n$  elementos hay  $2^n$  divisiones y recombinaciones, o sea, más de 1 millón en un mezclador de 20

elementos. La caída de presión típica es de unas cuatro veces mayor que en la misma longitud de tubería vacía. La mezcla, aun para materiales altamente viscosos, es excelente después de 6 a 20 elementos. Los mezcladores estáticos se utilizan para el mezclado de líquidos, dispersión de gases y líquidos, reacciones químicas y transmisión de calor. Son especialmente eficaces para el mezclado de fluidos de baja viscosidad, con pastas o líquidos viscosos.

**Selección de mezcladores.** No existe necesariamente una relación directa entre la potencia consumida y el grado de mezcla. Cuando un líquido de baja viscosidad gira alrededor de un tanque sin placas deflectoras, los distintos elementos del líquido pueden seguir caminos circulares paralelos de una forma casi indefinida sin apenas mezclarse. Poca de la energía suministrada se utiliza para mezclar. Si se colocan placas deflectoras la mezcla se produce rápidamente, utilizándose la mayor parte de la energía para el mezclado y relativamente poca para circulación.

Cuando el tiempo de mezclado es crítico, el mejor mezclador es el que produce la mezcla en el tiempo requerido con el menor consumo de potencia. En muchos casos es deseable, pero no esencial, un corto tiempo de mezcla, y el tiempo de mezcla es un compromiso entre el coste de la energía necesaria y el coste de adquisición del mezclador. Para mezclar reactivos en un tanque de alimentación o productos de diferentes cargas en un tanque de almacenamiento, puede utilizarse un mezclador de tamaño relativamente pequeño, aunque se necesiten varios minutos para alcanzar una mezcla completa.

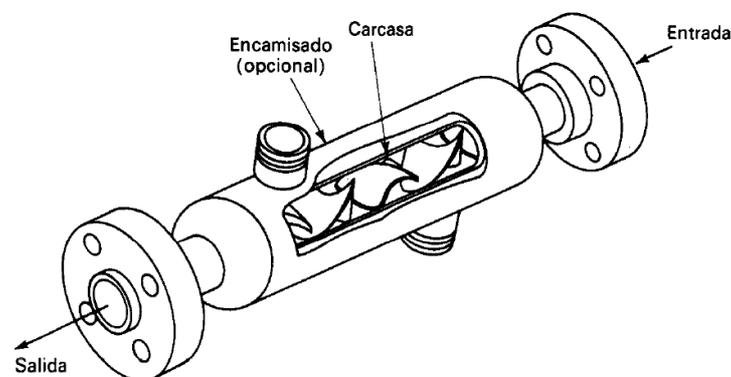
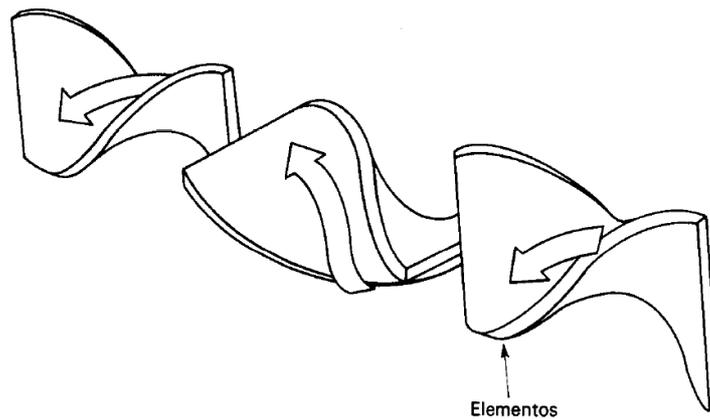


Fig. 6.6. Mezclador sin movimiento.

### 6.6. Separación sólido-líquido: Filtración

Filtración es la separación de partículas sólidas a partir de un fluido haciendo pasar el fluido a través de un medio filtrante sobre el que se depositan los sólidos.

Las filtraciones industriales van desde un sencillo colado hasta separaciones altamente complejas. El fluido puede ser un líquido o un gas, y la corriente valiosa procedente de un filtro puede ser el fluido, los sólidos o ambos productos.

En algunos casos pueden carecer de valor ambas corrientes, como es el caso de la separación de sólidos residuales de un fluido residual antes de su vertido. En la filtración industrial el contenido de sólidos de la alimentación puede oscilar desde trazas hasta un porcentaje muy elevado. Con frecuencia la alimentación se modifica de alguna

forma mediante un pretratamiento, a fin de aumentar la velocidad de filtración, como calentamiento, recristalización o adición de un «coadyuvante de filtración», tal como celulosa, yeso o tierra de diatomeas.

Filtro de tambor rotatorio. El tipo más frecuente de filtro continuo de vacío es el filtro de tambor rotatorio que se representa en la figura 6.7. Un tambor horizontal, con una cara acanalada, gira con una velocidad de 0.1 a 2 rpm en un depósito con la suspensión agitada. Un medio filtrante, tal como una lona, cubre la superficie del tambor, que está parcialmente sumergido en el líquido. Debajo de la superficie acanalada del tambor principal se encuentra un segundo tambor más pequeño. Entre los dos tambores existen tabiques radiales que dividen el espacio anular en compartimentos separados, cada uno de los cuales está conectado por medio de una tubería interna a un orificio situado en la placa de la válvula rotatoria. Una tira de tela filtrante cubre la cara expuesta de cada compartimento para formar una sucesión de paneles.

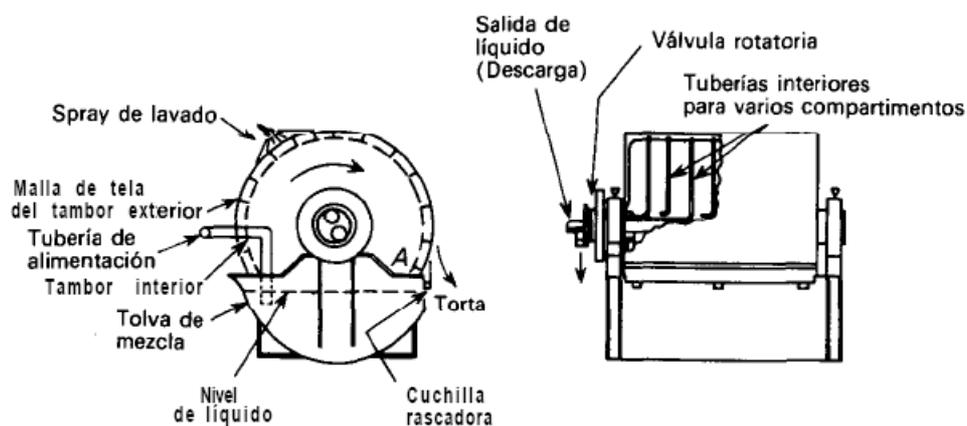


Fig. 6.7. Filtro rotativo continuo de vacío.

Considérese ahora el panel que se representa por A en la figura 6.7, que se encuentra justamente en el momento de introducirse en la suspensión. Cuando se sumerge debajo de la superficie del líquido,

se aplica vacío por medio de la válvula rotatoria. Se forma una capa de sólidos sobre la cara del panel a medida que pasa líquido por la tela hacia el interior del compartimento, a través de la tubería interna y de la válvula hasta el tanque colector. Cuando el panel abandona la suspensión y entra en la zona de lavado y secado, se aplica vacío al panel desde un sistema exterior, succionando líquido de lavado y aire a través de la torta de sólidos (figura 6.8). Después que la torta de sólidos depositada sobre la caja del panel ha sido succionada para ser secada, el panel abandona la zona de secado, se corta el vacío y se retira la torta rascándola con una cuchilla horizontal o rasqueta. Se insufla algo de aire debajo de la torta con el fin de despegarla de la tela. De esta forma la torta se desprende de la tela haciendo innecesario que la cuchilla roce la superficie del tambor. Una vez que se ha desprendido la torta, el panel entra de nuevo en la suspensión y se repite el ciclo. Por tanto, la operación de cualquier panel es cíclica, pero como algunos paneles están en todo momento en cada parte del ciclo, la operación global del filtro es continua.

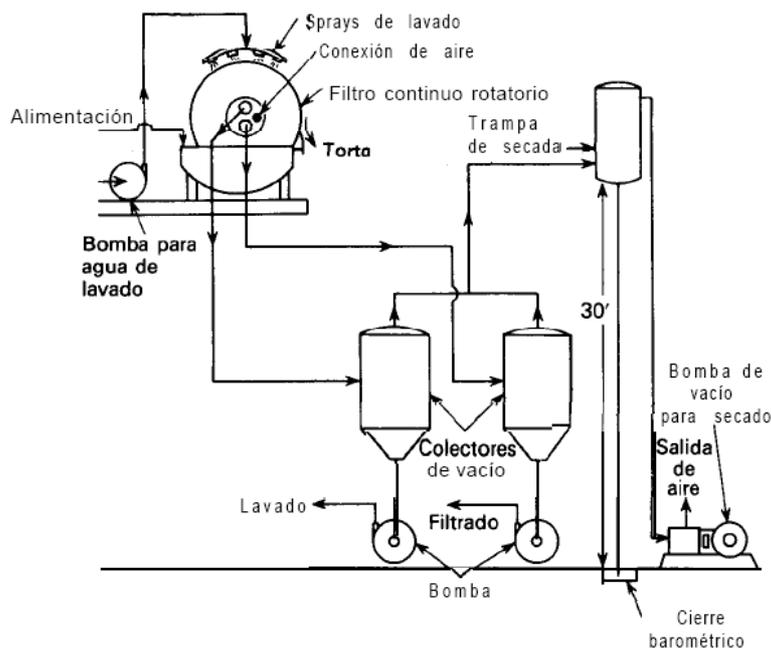


Fig. 6.8. Diagrama de flujo para filtración continua de vacío.

### 6.7. **Disolución selectiva de un gas: Absorción**

La absorción de gases es una operación en la cual una mezcla gaseosa se pone en contacto con un líquido, a fin de disolver de manera selectiva uno o más componentes del gas y de obtener una solución de éstos en el líquido. Por ejemplo, el gas obtenido como subproducto en los hornos de coque, se lava con agua para eliminar el amoníaco; después se lava con un aceite para eliminar los vapores de benceno y de tolueno. Para que el molesto sulfuro de hidrógeno sea eliminado de un gas de este tipo o de hidrocarburos gaseosos naturales, el gas o los hidrocarburos se lavan con diferentes soluciones alcalinas que absorben a dicho sulfuro. Los valiosos vapores de un disolvente, acarreados por una corriente gaseosa pueden recuperarse y luego ser reutilizados; basta lavar el gas con un disolvente adecuado a los vapores. Estas operaciones requieren la transferencia de masa de una sustancia en la corriente gaseosa al líquido. Cuando la transferencia de masa sucede en la dirección opuesta, es decir, del líquido al gas, la operación se conoce como desorción.

Por ejemplo, el benceno y el tolueno se eliminan del aceite que se mencionó antes poniendo en contacto la solución líquida con vapor, de tal forma que los vapores entran en la corriente gaseosa y son arrastrados; en consecuencia, el aceite de absorción puede utilizarse nuevamente. Los principios de la absorción y la desorción son básicamente los mismos.

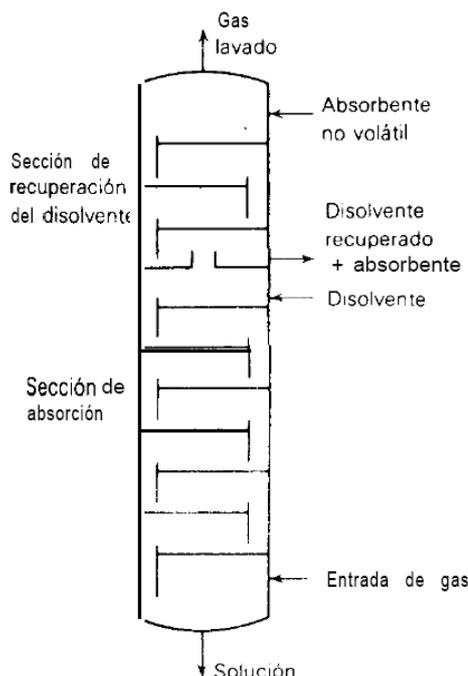


Fig. 6.9. Absorbedor de platos con una sección de recuperación del disolvente volátil.

## 6.8. Transferencia de calor: Cambiadores de calor.

El peso y el tamaño de los cambiadores de calor empleados en el espacio o en aplicaciones aeronáuticas son parámetros fundamentales, y en estos casos, las consideraciones sobre los costos de material y fabricación del cambiador de calor quedan frecuentemente subordinados a aquéllos; sin embargo, el peso y el tamaño son factores de costo importantes dentro de la aplicación global en estos campos, y deben seguir considerándose, por tanto, como variables económicas.

Cada aplicación en particular dictará las reglas a seguir para obtener el mejor diseño en relación a consideraciones económicas, de tamaño, de peso, etc. Un análisis de todos estos factores va más allá del alcance de la presente discusión, pero es bueno recordar que en la práctica, todos ellos deben tenerse en cuenta. Esta discusión sobre cambiadores de calor adoptará la forma de un análisis técnico; esto es, se destacarán los métodos que predicen el funcionamiento de los cambiadores de calor, junto con una discusión sobre los métodos que pueden emplearse para estimar el tamaño y tipo de cambiador de

calor necesario para realizar una tarea en particular. Los modos primarios de transferencia de calor son conducción y convección. Ello no implica que la radiación no sea importante en el diseño del cambiador de calor, porque en muchas aplicaciones importantes es el medio principal disponible para efectuar una transferencia de energía.

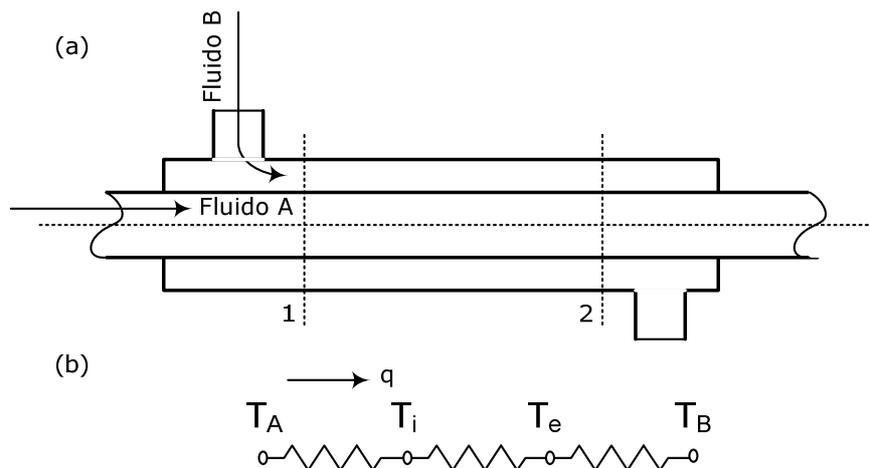


Fig. 6.10 Intercambio de calor con tubos concéntricos: (a) esquema; (b) circuito térmico para la transferencia de calor global.

En la mayor parte de los casos, la transmisión de calor fluido-fluido se realiza en equipos que operan en estado estacionario. Sin embargo, también se utilizan especialmente en la transmisión de calor a elevadas temperaturas, regeneradores térmicos, que consisten en un lecho de partículas sólidas que se calientan alternativamente por un fluido, elevando la temperatura del lecho, el cual se utiliza posteriormente para calentar un fluido, más frío.

El intercambiador de calor, en donde se calienta una parte del aceite enriquecido, se conoce como rehervidor y puede utilizarse el arreglo de la figura 6.11.

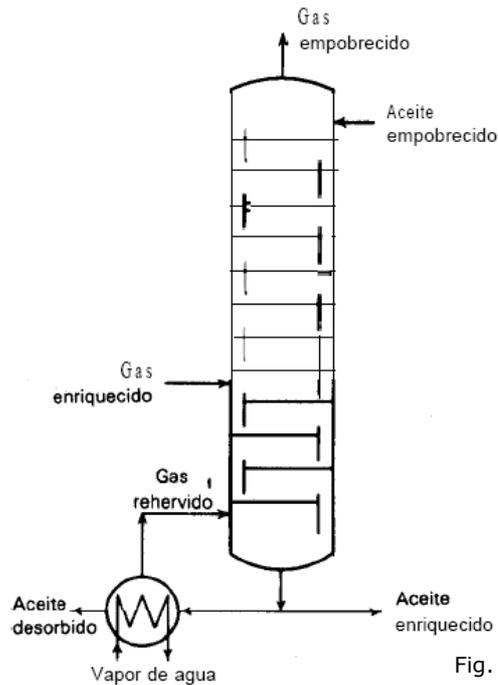


Fig. 6.11 Absorbedor rehervidor

En la siguiente tabla se muestra la lista de equipos necesarios para la generación de biogás a partir de biomasa usando la Tecnología Pfeiffer.

Clave	Descripción	Características
BT-101	Banda transportadora Apron	Tipo Apron, ancho 36 in y longitud 15 ft, para operar a presión atmosférica, construido con acero al carbón.
BT-102	Banda transportadora Campana	Tipo Campana, abierto y de longitud corta, con medidas de 36 in x 15 ft, para operar a presión atmosférica, construido con acero al carbón.
TR-101	Triturador	Marca Sterling, Serie SB50/4024, 50 HP, tamaño de la cámara de 40 x 24 in, con 20 laminas cortadoras con un ancho de 1.96 in cada una, rango de corriente de salida de 800 a 1760 lb/h
CL-101	Clasificador	Clasificador de tornillo de un diámetro 84 in, para operar a presión atmosférica, construido con acero al carbón.
SL-101	Soplador	Tipo rotatorio para operar con un flujo máximo de 750 ft <sup>3</sup> /min, para operar a presión atmosférica, construido con acero al carbón.

Tabla 6.1. Lista de equipos con predimensionamiento.

<b>Clave</b>	<b>Descripción</b>	<b>Características</b>
ML-101	Mezclador-Lavador	Tipo Ribbon, volumen de 320 ft <sup>3</sup> , para operar a presión atmosférica, construido con acero al carbón.
DG-101	Digestor	Fermentador, P máxima de 25 psi y un volumen de 5000 galones, para operar a presión atmosférica, construido con acero al carbón.
GA-101	Bomba centrífuga	Horizontal, cumple con las norma ANSI, opera en una etapa tiene un diámetro a la descarga de 6 in, para operar a presión atmosférica, construido con acero al carbón.
FR-101	Filtro separador rotatorio	Filtro de disco, área de filtración 200 ft <sup>2</sup> , para operar a presión atmosférica, construido con acero al carbón.
SE-101	Separador líquido aire (Desorbedor)	Rango de flujo de 1325 a 4000 SCFM, conexión de 4 in, condiciones máximas de operación: 125 psi y 450° F.
CP-201	Compresor	Tipo centrífugo, 155 psi y una potencia nominal de 125 hp para operar a presión atmosférica, construido con acero al carbón.
AB-201	Absorbedor	Con capacidad de procesar un flujo cercano a 700,000 SCF/d de biogás
HT-102	Cambiador de calor	Enfriamiento por una corriente de agua, y a una presión interna máxima de 150 psi, área de intercambio de 150ft <sup>2</sup> , construido con acero al carbón.
RE-201	Regenerador	Con capacidad de procesar un flujo cercano a 700,000 SCF/d de biogás y obtener un corriente con una composición de 95% de CH <sub>4</sub> , un 5% de CO <sub>2</sub> y máximo de 2ppm de H <sub>2</sub> S
DH-201	Deshidratador	Con capacidad de procesar un flujo cercano a 700,000 SCF/d de biogás y obtener un corriente a la salida con un máximo de 7lb H <sub>2</sub> O/ 106 SCF
RH-102	Rehervidor del regenerador	Presión interna de 150 psi, área de intercambio 150ft <sup>2</sup> , construido con acero al carbón.
RH-101	Rehervidor del deshidratador	Presión interna de 150 psi, área de intercambio 150ft <sup>2</sup> , construido con acero al carbón.
HT-101	Cambiador de calor	Enfriamiento por una corriente de agua, y a una presión interna máxima de 150 psi, área de intercambio de 150ft <sup>2</sup> , construido con acero al carbón.

Tabla 6.1. Lista de equipos con predimensionamiento (continuación).

## **CAPÍTULO 7. CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD Y DISPOSICIÓN DE EFLUENTES**

### **7.1. Consideraciones de seguridad**

- El biogás puede causar explosiones al tener como principal componente metano, el cual tiene niveles de explosión que van desde 5% hasta 15% (proporción en volumen con aire).
- Al encender fósforos o bien producir chispas por choques metálicos, el gas puede alcanzar temperaturas de 650 a 750° C a las cuales puede deflagrar o explotar.
- La densidad y su composición son también factores importantes en la seguridad, pues tomando en cuenta que la densidad del aire es de 1.293 g/L y que considerando un contenido de 35% de CO<sub>2</sub> (antes de ser purificado), la densidad del biogás llega a 1.09 g/L, este es más ligero que el aire y puede diluirse fácilmente. Si la proporción de CO<sub>2</sub> rebasa el 46% (caso que se puede presentar sólo si hay fallas en el digestor) el biogás se vuelve más denso que el aire, aumentando su nivel de peligrosidad ya que puede ser asfixiante cuando su acumulación causa que el oxígeno del aire baje a 17.3% y si baja hasta 13% es positivamente sofocante.
- Evitar la presencia de compuestos fosfatados en las corrientes de alimentación. Las condiciones de ausencia de aire producen compuestos de fósforo altamente tóxicos.
- Usar el equipo de protección adecuado para los trabajos de mantenimiento.

- Usar instalaciones eléctricas a prueba de explosión.
- Realizar trabajos de inspección frecuentes para detectar oportunamente fugas por válvulas o tuberías.
- Mantener ventilada el área de operación para evitar intoxicaciones o desmayos por la falta de oxígeno.

## 7.2. Disposición de efluentes

- El efluente generado, como ya se mencionó anteriormente, es abono orgánico, este residuo es un lodo compuesto por el material no atacado por las bacterias y por el material digerido por éstas. Este lodo, constituye un fertilizante de muy buena calidad, como el proceso sólo remueve los gases generados ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) en el lodo deben concentrarse los nutrientes originales contenidos en la materia prima. Estos quedan en forma más concentrada, y pueden ser absorbidos más fácilmente, mejorando las características fertilizantes del material.
- La aplicación del efluente al suelo le trae beneficios similares a los que se alcanzan con cualquier otra materia orgánica. Es decir, que actúa como mejorador de las características física, facilitando la aireación, aumentando la capacidad de retención de humedad, la capacidad de infiltración de agua y capacidad de intercambio catiónico.
- Además actúa como fuente de energía y nutrientes para el desarrollo de los núcleos microbianos que mejoran la solubilidad de los compuestos minerales del suelo. En este sentido, presenta ventajas sobre el uso directo de la materia orgánica, como los demuestran las experiencias por varios investigadores.

- Se ha encontrado, por ejemplo , que la aplicación del efluente de biodigestores que operan con estiércol de res, en ensayos comparativos con uso directo del estiércol, ha mejorado los rendimientos agrícolas del maíz, en un 28%, del arroz en 10 a 14%, del algodón en 24.7% y del trigo en 12.5 a 16%. Ello se debe en parte a la mayor facilidad de absorción de los nutrientes, y a la mayor riqueza del efluente: contiene 1.5% de nitrógeno contra 0.75% del estiércol, y 0.7% de  $K_2O$  contra 0.4% de la materia prima. Esta situación hace que el efluente sea más efectivo que muchos de los abonos orgánicos químicos utilizados normalmente.

## CONCLUSIONES

- El presente trabajo ha mostrado que la tecnología de biogás es económicamente y técnicamente viable.
- El biogás se produce mediante un proceso de fermentación anaerobia de la materia orgánica en ausencia de aire quedando como residuo un lodo estabilizado que es un excelente abono para suelos con un alto valor fertilizante.
- Los factores que influyen directamente en la formación de metano son: temperatura, tiempo de retención, relación carbono/ nitrógeno, porcentaje de sólidos, pH y agitación.
- La demanda del biogás se beneficiará de los siguientes factores:
  - Incremento de las posibilidades técnicas para la construcción de digestores en comparación con la década pasada.
  - Conciencia de la población acerca de la calidad ambiental aumento en el número de entidades que apoyan.
  - Programas federales que apoyan con el costo del desarrollo e investigación de estos sistemas.
  - La emergencia de nuevas políticas de estado diseñadas para la expansión del mercado de energías renovables.
- La producción de energía se ha desarrollado a un ritmo más acelerado que hace algunos pocos años.
  - Reducción de la emisión de gases de invernadero.
  - Ahorro en el consumo de leña, previniendo deforestación y aportando energía.
  - Control de la contaminación, disminución de malos olores.
  - Mejor control de plagas, reducción de patógenos y semillas de maleza.

## RECOMENDACIONES

- Incluir el estudio teórico-práctico de la generación de biogás en el contenido de algunas materias de Ingeniería Química, como por ejemplo:
  - Energéticos.
  - Ingeniería de Reactores.
  - Ingeniería Ambiental.
  - Procesos de Separación.
- Impulsar actividades como talleres y mesas de discusión con el fin de abordar el tema de la generación de biogás desde diferentes puntos de vista.
- Promover proyectos para el desarrollo de plantas pilotos de generación de biogás en donde participen estudiantes de todas las carreras de la Facultad de Química.
- Buscar convenios de colaboración con el Gobierno del Distrito Federal para el apoyo en la investigación en el tratamiento de la basura orgánica.

## ANEXOS

### ***Normas de referencia para plantas de almacenamiento y suministro de biogás, diseño y construcción.***

- Norma Pemex 2.451.01 Instrumentos y dispositivos de control.
- Norma Pemex 2.411.01 Sistemas de protección anticorrosiva a base de recubrimientos.
- Norma Pemex 3.411.01 Aplicación e inspección de Recubrimientos de Protección Anticorrosiva.
- Norma Pemex 4.411.01 Recubrimientos para protección anticorrosiva.
- Norma Pemex-Refinación DG-GPASI-SI-2330, 1999 Norma sobre distancias mínimas y distribución de instalaciones industriales.
- Especificación general IMP K-201, Rev. 3, Nov-2000 Instrumentos y dispositivos de protección general.
- Especificación IMP K-202, 1973 Instalación de instrumentos y dispositivos.
- Dictamen Normativo de Pemex DN.09.0.10, 1989 Utilización de muretes (Diques) de seguridad en áreas de almacenamiento de gas licuado de petróleo en tanques esféricos.
- Manual de diseño de obras civiles de la CFE, 1993.
- ANSI B-16.5 Pipe flanges and flanged fittings.
- ANSI B-2.1 Taper pipe threads
- ANSI/ASME B-31.3 Chemical plant and petroleum refinery piping.
- ANSI/ISA S-5.1 Instrumentation, symbols and identification.
- ANSI/ISA S-5.4 Instrument loop diagrams.

- ANSI/ISA RP-12.6 Installation of intrinsically safe instrument systems in class I hazardous locations.
- ANSI/ISA S-12.13, Part I Performance requirements, combustible gas detectors.
- ASME Boiler pressure vessels code Sections II, V y VIII.
- ASME Section IX Welding and brazing qualifications.
- ASTM A 53 Standard specification for pipe, steel, black and hot dipped, zinc-coated, weld and seamless.
- ASTM A 516 Standard specification for pressure vessel plates, carbon steel for moderate and lower temperature service.
- NFPA 10 Standard for portable fire extinguishers.
- NFPA 14 Standard for installation of standpipe, private hydrant, and hose systems
- NFPA 15 Standard for water spray fixed systems for fire protection.
- NFPA 20 Standard for the installation of stationary pumps for fire protection.
- NFPA 22 Standard for water tanks for private fire protection.
- NFPA 24 Standard for installation of private fire service mains and their appurtenances.
- NFPA 58 Standard for the storage and handling of liquefied petroleum gases.
- NFPA 59 Utility LP-gas plant code.

***Artículos de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos relacionados con los recursos energéticos.***

Artículo 27:

El Gobierno Federal tiene la facultad de establecer reservas nacionales y suprimirlas. Las declaratorias correspondientes se harán por el Ejecutivo en los casos y condiciones que las leyes prevean. Tratándose del petróleo y de los carburos de hidrógeno sólidos, líquidos o gaseosos o de minerales radiactivos, no se otorgarán concesiones ni contratos, ni subsistirán los que en su caso se hayan otorgado y la Nación llevará a cabo la explotación de esos productos, en los términos que señale la Ley Reglamentaria respectiva. **Corresponde exclusivamente a la Nación generar, conducir, transformar, distribuir y abastecer energía eléctrica que tenga por objeto la prestación de servicio público.** En esta materia no se otorgarán concesiones a los particulares y la Nación aprovechará los bienes y recursos naturales que se requieran para dichos fines.

Artículo 28:

No constituirán monopolios las funciones que el Estado ejerza de manera exclusiva en las siguientes áreas estratégicas: correos, telégrafos y radiotelegrafía; petróleo y los demás hidrocarburos; petroquímica básica; minerales radiactivos y generación de energía nuclear; electricidad y las actividades que expresamente señalen las leyes que expida el Congreso de la Unión.

***Índice de tablas***

No.	Tabla	Página
1.1	Desechos agrícolas y animales con potencial para producir metano.	10
1.2	Composición del biogás.	10
1.3	Valores promedio del poder calorífico de diferentes combustibles y su equivalente referido al biogás.	11
3.1	Tecnologías de digestión anaeróbica más comunes.	24
4.1	Producción total de biogás por año calculado para un biodigestor cargado anualmente con un total de 7,885 kg de excrementos frescos de cerdo.	29
4.2	Producción total de biogás y su equivalente en MJ para un total de 7,885 kg de excrementos de cerdo al año.	30
4.3	Disminución en la emisión de CO <sub>2</sub> por el uso de biogás producido por un biodigestor de 7.2 m <sup>3</sup> como alternativa a la combustión de diesel.	30
4.4	Beneficios directos de la aplicación de un sistema de gestión anaeróbica utilizando un BDP de 7.2 m <sup>3</sup> con una carga anual de 7885 kg de excrementos frescos de cerdo.	32
5.1	Proyección de población por delegación en el Distrito Federal, 1995-2010.	49
5.2	Proyección de población por delegación del Estado de México, 1995-2010.	50
5.3	Precios ofrecidos por Metrogas al sector residencial.	53
5.4	Precios ofrecidos por Metrogas al sector comercial.	53
5.5	Precios ofrecidos por Metrogas al sector industrial.	54
5.6	Características de las Plantas de Composta del Distrito Federal.	58
5.7	Matriz usada para la selección de la planta generadora de biogás.	62
5.8	Costo del equipo.	63
5.9	Cálculo de la inversión.	64
5.10	Insumos / Consumos / Costos unitarios.	65
5.11	Costos anuales.	66
5.12	Estado proforma de resultados.	67
5.13	Capital de trabajo.	68
5.14	Flujo de efectivo.	69
7.1	Lista de equipos con predimensionamiento.	96

**Índice de figuras.**

No.	Figura	Página
1.1	Esquema general de la obtención de biogás a partir de biomasa y posibles usos.	13
2.1	Planta de biogás diseñada por Singh.	21
2.2	Planta de biogás familiar tipo "Circular pequeño y achatado" usado en la República Popular de China.	21
2.3	Digestor de 40m <sup>3</sup> .	23
3.1	Análisis del ecosistema para un biodigestor de polietileno basado en 7,885 kg de excrementos frescos.	29
3.2	Proceso Pfeffer de conversión de residuos sólidos para producir metano.	35
3.3	Proceso de separación de la mezcla de metano y dióxido de carbono.	35
3.4	Ejemplos de plantas de biogás Nord.	36
3.5	Laguna de la Tecnología Biogas Nord usada en una destilería en Cuba.	37
3.6	Tecnología Biogas Nord usada en una destilería en Cuba.	38
3.7	Casco Inc. Planta de azúcar, almidón y alimento para animales	39
3.8	Haubenschild Farms Inc., Princeton Minnesota.	41
3.9	Operación diaria y sistema de digestión de la granja Haubenschild.	41
4.1	Celda de combustible hidrógeno-oxígeno, en la cual la corriente es transportada internamente por medio de iones móviles hidronio.	45
4.2	Comportamiento de la demanda nacional de energéticos.	51
4.3	Comportamiento de la oferta nacional de energéticos.	52
4.4	Manejo de residuos sólidos en el Distrito Federal.	55
4.5	Vehículos de doble compartimiento adquiridos por las delegaciones en el período 2004-2006.	56
4.6	Ubicación de las estaciones de transferencia y plantas de selección del DF.	57
4.7	Etapas del relleno sanitario Bordo Poniente.	59
4.8	Localización de la planta.	62
5.1	Diagrama de flujo de proceso (DFP).	71
6.1	Diagrama general de un proceso químico.	72
6.2	Diagrama de un reactor químico usado en la producción de biogás.	78
6.3	Trituradora de un solo rodillo dentado.	80
6.4	Diagrama de flujo para molienda en circuito cerrado.	81
6.5	Clasificador de sedimentación húmeda con flujo cruzado.	83
6.6	Mezclador sin movimiento.	89
6.7	Filtro rotatorio continuo de vacío.	90
6.8	Diagrama de flujo para filtración continua de vacío.	91
6.9	Absorbedor de platos con una sección de recuperación del disolvente volátil.	93
6.10	Intercambio de calor con tubos concéntricos: (a) esquema; (b) circuito térmico para la transferencia de calor global.	94
6.11	Absorbedor rehervidor.	95

## REFERENCIAS

### Libros

- a. Denbigh & Turner "Introducción a la teoría de los reactores químicos". Limusa. México. 1990.
- b. Froment, G.F., Bischoff, K.B.. "Chemical reactor analysis and design". Wiley. New York. 1990.
- c. Holman. Heat Transfer 8ª Edición, McGraw-Hill Companies, Inc. Nueva York, 1998.
- d. Levenspiel, O. "Ingeniería de las reacciones químicas". Reverté. México. 1998.
- e. McCabe, Smith & Harriot. Operaciones unitarias en Ingeniería Química 4ª. Edición. España. 1991.
- f. Schmidt. The Engineering of Chemical Reactions. Nueva York 1998.
- g. Treybal. Operaciones de transferencia de masa 2ª. Edición. México 1990.
- h. Food And Agriculture Organization Of The United Nations El biogás 2: Construcción de unidades perfeccionadas. Italia. 1986.
- i. Staff of Compost Science. Biogas and alcohol fuel production: proceedings of a Seminar on Biomass Energy for City Farm, and Industry. Estados Unidos. 1980.
- j. Mandujano A. Biogás: energía y fertilizantes a partir de desechos orgánicos. Instituto de Investigaciones Eléctricas - Organización Latinoamericana de Energía. México. 1981.
- k. Werner Uli. Biogas plants in animal husbandry: A practical guide. Alemania. 1989.
- l. Demuyck, M. Biogás plants in Europe: A practical handbook. Commission of the European Communities. 1984.

- m. Price, Elizabeth C. Biogas production & utilization. Estados Unidos 1981.
- n. Chin-wo. Potencial de producción de biogás a partir de desechos agropecuarios. Dirección Sectorial de Energía. Costa Rica. 1986.
- o. Technology of biogas production and application in rural areas: report. Conferencia Mundial de la Energía. Inglaterra. 1989
- p. Wis. Bioconversion systems. Boca Raton. 1984.
- q. Khandelwal, K. C. Biogas technology: A practical handbook Vol. 1. McGraw Hill. Estados Unidos 1986.
- r. Lens Piet. Biofuels for fuel cells: renewable energy from biomass fermentation. Inglaterra. 2005
- s. Chynoweth. Anaerobic digestion of biomass. Inglaterra. 1987.

#### Tesis

- a. Gamillo. Estudio de la viabilidad de cogeneración de biomasa en la comunidad indígena de San Juan Parangaricutiru Michoacán. Maestría en Ingeniería Eléctrica. UNAM. México. 2005.
- b. Madariaga. Aprovechamiento de la energía solar y biomasa. Ingeniero Civil. UNAM. México. 1981.
- c. López. Impacto ambiental de las tecnologías de cogeneración de energía a partir de biomasa. Ingeniería Química. México. UNAM. 2006.
- d. Gómez. Construcción de un biodigestor para el aprovechamiento de residuos de origen orgánico, como alternativa ecológica y de obtención de energía. Ingeniería Agrícola. UNAM. México. 2002.

## Artículos y Reportes

- a. Purvis & Craig. A small scale biomass fueled gas turbine power plant. BioEnergy '98 - The Eighth Biennial National Bioenergy Conference. Estados Unidos. 1998.
- b. Neill and Gunter. Atlantic Engineering Competitios 2007. Consulting Engineering Category. Combined Heat and Power Study for Edmundston Energy. Canada. 2007.
- c. Análisis del mercado de los residuos sólidos municipales reciclables y evaluación de su potencial de desarrollo. Gobierno del Estado de México. DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR TECHNISCHE ZUSAMMENARBEIT GmbH. México. 1999.
- d. Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal 2006. Gobierno del Distrito Federal. México. 2006.
- e. Castro et al. Eliminación de óxido de azufre de corrientes gaseosas: estado de arte. Tecnología, Ciencia y Educación, julio-diciembre, año/vol. 16, número 002. pp 89-100. Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos, México, 2002.
- f. Support for development of national biogas programme (FAO/TCP/NEP/4451-T). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Nepal. 1996.
- g. Aguilar & Botero. Los beneficios económicos totales de la producción de biogás utilizando un biodigestor de polietileno de bajo costo. Tierra Tropical (2006) 2 (1): 15-25. Costa Rica. 2006.
- h. Weiland. Biogas technologies in Germany: Feedstocks and Technology. Institut für Technologie und

Biosystemtechnik Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL). Alemania. 2004.

- i. Jingming. Rural biogas development in China. Division of Energy, Ecology and Environment Center for Science and Technology Development Ministry of Agriculture. China. 2006.
- j. Najib. The Development of Biogas Technology in Denmark: Achievements & Obstacles. Department of Environment, Technology and Social Studies, Roskilde University RUC, Denmark. Dinamarca. 2008.
- k. Chanakya et al. Evolving biomass-based biogas plants: The ASTRA experience. Centre for Sustainable Technologies and Department of Chemical Engineering, Indian Institute of Science. Current Science, Vol. 87, No. 7, 10 October 2004.

#### Internet

- a. Energy Information Administration, [www.eia.org](http://www.eia.org)
  - . Renewables in Global Energy Supply.
  - . Renewables information.
  - . Renewables energy-priorities.
- b. Natural Resources Canada's Renewable Energy Network, [www.canren.gc.ca](http://www.canren.gc.ca)
  - . Discover the production and uses of biogas.
- c. Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal, [www.sma.df.gob.mx](http://www.sma.df.gob.mx).
- d. Comisión Reguladora de Energía, [www.cre.gob.mx](http://www.cre.gob.mx)
  - . Estadísticas, gas natural.
- e. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)
  - . Simbad.
  - . XII Censo General de Población y Vivienda 2000.
  - . Censo Económico 2004.