

### 3 Conceptos preliminares.

#### 3.1 Digestores anaerobios.

La energía contenida en la biomasa puede ser liberada mediante diversos procesos<sup>2</sup>, entre éstos se considera que tiene un gran potencial para la generación de energía, la fermentación anaeróbica de los desechos orgánicos provenientes de las unidades ganaderas, para la producción de biogás.

Los procesos de biodegradación se realizan dentro de una instalación conocida como digestor, o, reactor anaerobio, dentro de la cual se dan las condiciones adecuadas para la fermentación anaeróbica. Debe asegurarse que esté herméticamente sellado, para evitar la entrada de oxígeno, debe tener conductos que permitan la entrada del estiércol y la salida del biogás y el subproducto: fertilizante, además de elementos extra como válvulas de seguridad y sistema de mezclado.

El digestor tipo hindú se distingue por el uso de una campana móvil, que asciende al aumentar la presión del gas dentro de ella. La base de éste digestor es un tanque de almacenamiento en forma cilíndrica parcialmente bajo tierra, que puede ser construido de piedra, ladrillo, hormigón o metálico.

El diseño del tipo chino utiliza para el almacenamiento del biogás una cúpula fija unida al tanque de almacenamiento, que puede ser de ladrillo o de elementos prefabricados de hormigón, también se construyen enterrados.

Estas dos instalaciones llamadas tradicionales, tienen como ventaja su elevada vida útil, siempre que se realice un mantenimiento constante, pero poseen como desventaja el alto costo de la inversión inicial.

Los digestores de polietileno logran disminuir considerablemente los costos iniciales de éstas instalaciones. Los componentes fundamentales de este digestor son: una bolsa de polietileno de película delgada donde se almacenan los desechos mezclados con agua, válvulas de corte, de seguridad, tuberías y adaptadores. Estas unidades, son fáciles de transportar y sencillas de instalar.

Diseño/Criterio	Digestor hindú	Digestor chino	Digestor de polietileno
Sustratos más adecuados	Estiércol animal con o sin residuos vegetales	Estiércol animal con residuos vegetales	Estiércol animal
Vida útil	8 a 12 años	12 a 20 años	2 a 5 años
Volumen del digestor	6 a 100 m <sup>3</sup>	6 a 20 m <sup>3</sup>	4 a 100 m <sup>3</sup>
Producción diaria de biogás	0.3-0.6	0.2-0.5	0.3-0.8
	m <sup>3</sup> de biogás por m <sup>3</sup> de digestor		

Tabla 3.1 Comparación entre digestores [5].

<sup>2</sup> Estos procesos pueden ser físico-químicos: combustión, pirólisis, gasificación o biológicos utilizando microorganismos en: la digestión anaeróbica, o la fermentación alcohólica.

Otro modelo de digester que logra reducir el costo de instalación sin sacrificar el tiempo de vida del digester, consiste en un tanque de almacenamiento de piedra y ladrillo, como los digestores tradicionales, pero con una cúpula semiesférica de polietileno de película delgada.

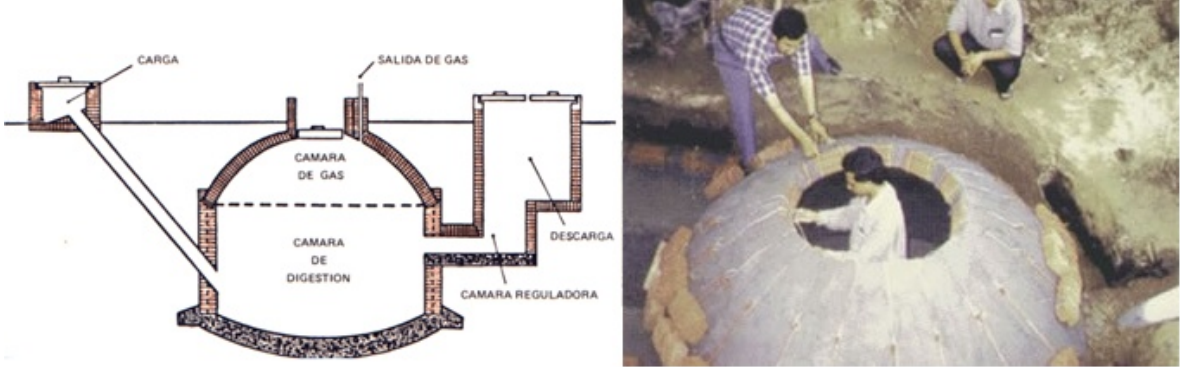


Figura 3.1 Digester tipo chino [6].



Figura 3.2 Digester polietileno [7].



Figura 3.3 a) Digester hindú [6]. b) Digester con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno [5].

### 3.2 Producción de biogás.

El biogás resulta del desarrollo de procesos de biodegradación del estiércol que contiene sólidos volátiles orgánicos en forma de grasas, carbohidratos, proteínas y otros nutrientes disponibles para el desarrollo y reproducción de bacterias en condiciones anaeróbicas (sin oxígeno); y está compuesto por una mezcla de gases en donde predomina el CH<sub>4</sub> y el CO<sub>2</sub>.

GAS	PORCENTAJE
Metano, CH <sub>4</sub>	55 a 70%
Dióxido de carbono, CO <sub>2</sub>	35 a 40%
Hidrógeno, H <sub>2</sub>	1 a 3%
Nitrógeno, N <sub>2</sub>	0.5 a 3%
Sulfuro de hidrógeno, H <sub>2</sub> S	0.10%
Vapor de agua	Trazas

Tabla 3.2 Composición del biogás [6].

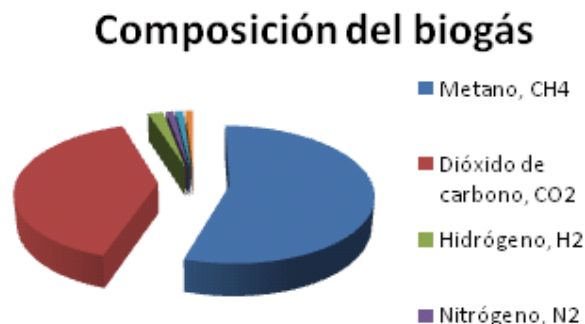


Figura 3.4 Composición del biogás [6].

#### 3.2.1 Fermentación anaeróbica.

La fermentación anaeróbica puede dividirse en cuatro fases de degradación: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Cada fase depende de distintos tipos de bacterias que poseen una estrecha relación simbiótica y que requieren de ciertas características del ambiente donde se encuentren.

##### 3.3.1.1 Fase de hidrólisis.

Las bacterias de esta primera etapa toman la materia orgánica con sus largas cadenas de estructuras de carbón y las van rompiendo y transformando en cadenas más cortas y simples (ácidos orgánicos) liberando H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. Este trabajo es llevado a cabo por un complejo de microorganismos de distinto tipo que son en su gran mayoría anaerobios facultativos<sup>3</sup>. La hidrólisis de carbohidratos toma lugar en unas cuantas horas, mientras que la hidrólisis de proteínas y lípidos tarda unos días [8].

##### 3.3.1.2 Fase de Acidogénesis.

Esta etapa también llamada fermentación ácida, se efectúa por la acción de las bacterias acidogénicas que convierten los productos solubles de la etapa de hidrólisis en ácidos orgánicos de cadena corta. Azúcares simples, aminoácidos y ácidos grasos son degradados en acetatos, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> (70%) así como en ácidos grasos volátiles (VFA) y alcoholes (30%) [8].

##### 3.3.1.3 Fase de acetogénesis.

Las bacterias acetogénicas producen H<sub>2</sub>. Los alcoholes, ácidos grasos y compuestos aromáticos obtenidos en la etapa anterior se degradan produciendo el 54% del hidrógeno

<sup>3</sup> Pueden soportar bajos niveles de oxígeno

que se utilizará en la formación de CH<sub>4</sub>.

Los microorganismos productores de acetatos y de CH<sub>4</sub> son simbióticos. Los organismos metanogénicos sólo pueden sobrevivir con una alta presión de H<sub>2</sub>, por lo que durante la baja concentración de H<sub>2</sub> perviven los microorganismos acetogénicos, pero cuando la concentración de H<sub>2</sub> sube, el ambiente es más propicio para los metanogénicos [8].

### 3.3.1.4 Fase metanogénica.

Esta fase sólo es posible bajo estrictas condiciones anaeróbicas. El 70% del CH<sub>4</sub> formado proviene de acetatos, mientras el 30% restante es producido por la conversión de H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. La formación de CH<sub>4</sub> puede tener lugar por dos vías diferentes: la ruptura de las moléculas de ácido acético para generar CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, o la reducción del CO<sub>2</sub> con H<sub>2</sub> [8].

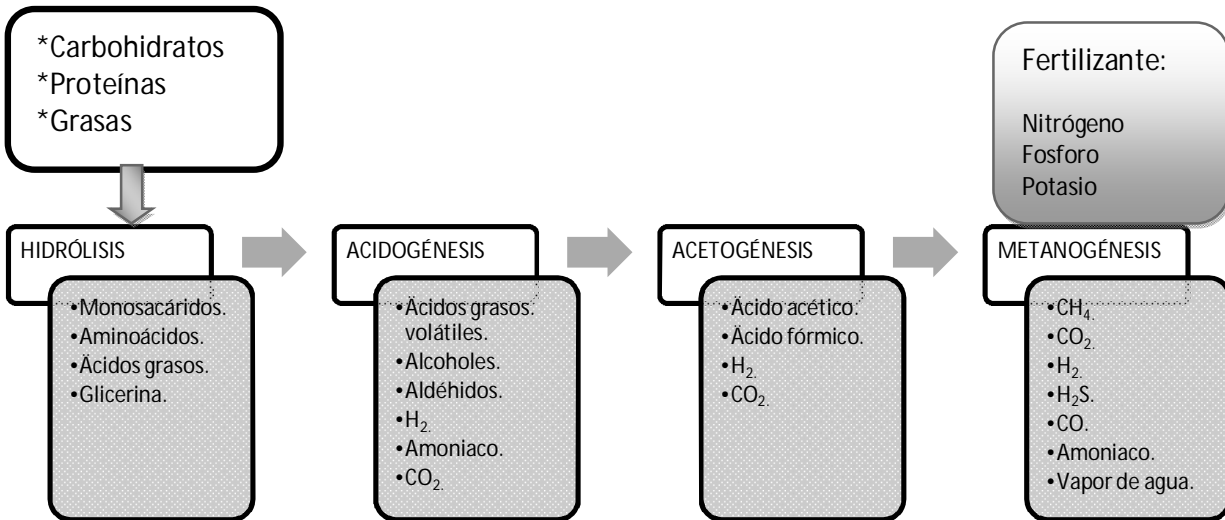


Figura 3.5 Etapas de la digestión anaerobia.

### 3.2.2 Factores de influencia en el proceso metanogénico.

#### 3.2.2.1 Tipo de sustrato.

La producción de biogás dependerá fundamentalmente de estiércol producido, que a su vez depende del tipo de animal y de la calidad de los alimentos, el peso promedio de los mismos y el sistema de recolección de las excretas que se utilice. En cuanto al volumen por las distintas especies animales, se tiene por ejemplo [8].

Especie	Peso vivo	kg estiércol/ día	%CH <sub>4</sub>
<b>Cerdos</b>	100	4.5-6	65-70
<b>Vacunos</b>	400	25-40	65
<b>Equinos</b>	450	12-16	65

Tabla 3.3 Cantidad de estiércol y metano por especie animal.

No se tiene un valor estandar de cuanto biogás se produce por cerdo. Po ejemplo en [8] se menciona que 5 kg de desechos de un cerdo producen 0.165 m<sup>3</sup> de biogás al día, mientras que [9] maneja que por cada 2 a 3 Kg. de estiércol/día se producen 0.15 m<sup>3</sup> biogás diarios. Haciendo un promedio se tiene:

<b>Estiércol diario (1 cerdo)</b>	<b>m<sup>3</sup> de biogás/día min.</b>	<b>m<sup>3</sup> de biogás/día máx.</b>	<b>Promedio m<sup>3</sup> de biogás/día.</b>
<b>5 Kg</b>	0.165	0.3	0.2325

Tabla 3.4 Promedio de producción de biogás al día para un cerdo.

Estos valores son solo representativos, se requiere un estudio previo para conocer la cantidad y calidad específica del biogás en la granja.

### 3.2.2.2 Temperatura.

Para que se inicie el proceso se necesita una temperatura mínima de 4<sup>o</sup> a 5<sup>o</sup>C y no se debe sobrepasar una máxima de alrededor de 70<sup>o</sup>C. Se realiza generalmente una diferenciación en rangos de temperatura de acuerdo al tipo de bacterias que predomina en cada una de ellas [8]. La SAGARPA recomienda una temperatura de trabajo de entre 35 a 38 °C.

<b>Bacterias</b>	<b>Rango de temperatura</b>	<b>Sensibilidad</b>
<b>Mesofílica</b>	20°C – 40°C	+ - 1°C/hora
<b>Termofílica</b>	>40°C , <70°C	+ - 0.5°C/hora

Tabla 3.5 Rango temperaturas para cada bacteria.

La actividad biológica y por lo tanto la producción de gas aumenta con la temperatura. Al mismo tiempo se debe tener en cuenta que al no generar calor el proceso, la temperatura deberá ser lograda y mantenida mediante energía exterior. A medida que se aumenta la temperatura disminuyen los tiempos de retención, y como resultado se necesitará un menor volumen de digester para tratar una misma cantidad de biomasa [10].

### 3.2.2.3 Velocidad de carga volumétrica.

Volumen de sustrato orgánico cargado diariamente al digester. Este tiene una relación de tipo inversa con el tiempo de retención, dado que a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de retención. Existen diferentes formas de expresar este parámetro siendo los más usuales los siguientes: kg de material/día; kg de materia seca/día; kg de sólidos volátiles/día todos expresados por metro cúbico de digester.

### 3.2.2.4 Tiempo de retención hidráulico (T.R.H.).

Como se había mencionado, el tipo de sustrato y la temperatura del mismo tienen una influencia directa en el T.R.H. Con relación al tipo de sustrato. El límite mínimo de los T.R.H. está dado por la tasa de reproducción de las bacterias metanogénicas, debido a que la continua salida de efluente del digester extrae una determinada cantidad de bacterias. La SAGARPA recomienda tiempos de retención de 25 a 30 días. El primer gas de una planta recién cargada contiene muy poco metano, por esa razón se recomienda que el gas

producido en los primeros 3 a 5 días se deje escapar sin utilizarlo.

### **3.2.2.5 Valor de pH.**

Una vez estabilizado el proceso fermentativo, el pH se mantiene en valores que oscilan entre 7 y 8.5. Las bacterias formadoras de ácidos que se desarrollan rápidamente frente a exceso de materia orgánica, producen exceso de ácidos que se acumulan y pueden disminuir el nivel pH necesario para las formadoras de CH<sub>4</sub>. Añadir cal ayuda a disminuir la acidez en el digestor para conservar el pH óptimo [11].

### **3.2.2.6 Contenido de sólidos.**

La SAGARPA recomienda que los sistemas de generación de biogás se realicen en granjas en donde el agua es suficiente, asumiendo que la limpieza de las instalaciones se realiza utilizando acarreo hidráulico, o bien en donde se considera el reciclado del agua obtenida. Se considera una mezcla de agua con 7 a 9% de sólidos totales para incorporarse al digestor, la cual se puede lograr a nivel de campo, mezclando 3.5 a 4 partes de agua por 1 de excreta de cerdo fresca [9] [12].

### **3.2.2.7 Mezclado.**

La eficiencia en la producción de biogás puede verse afectada por la movilidad delimitada de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato, a medida que crece el contenido de sólidos. La agitación o mezclado es importante pues evita la formación de costras en la superficie del sustrato, elimina espacios sin bacterias, además de que se debe hacer un mezclado del sustrato nuevo.

### **3.2.2.8 Inhibidores.**

La presencia de metales pesados como el Cu y el Zn para residuos porcinos, antibióticos y detergentes en determinadas concentraciones, puede inhibir e incluso interrumpir el proceso fermentativo [9].

### **3.2.2.9 Relación carbono/nitrógeno C/N.**

Las bacterias necesitan para su crecimiento fuentes de carbono y nitrógeno. Debe existir una relación adecuada entre nutrientes, es decir, entre carbohidratos y proteína. La relación óptima de C/N es de 30:1, cuando la relación es muy estrecha (10:1), hay pérdidas de nitrógeno asimilable, lo cual reduce la calidad del material digerido. Si la relación es muy amplia (40:1) se inhibe el crecimiento debido a la falta de nitrógeno [8] [10].

### **3.2.2.10 Metano y dióxido de carbono.**

La composición del gas (referida a la relación entre CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>) sólo puede ser parcialmente controlada. Depende de los siguientes factores [5]:

1. La adición de compuestos con largas cadenas de hidrocarburos, por ejemplo, grasas pueden ayudar a incrementar la calidad del gas adicionando cantidades

- apropiadas, no deben ser demasiado grandes para evitar la acidez.
2. El proceso de fermentación es más rápido y más equitativo si el material en el digestor está húmedo y se suministra homogéneamente.
  3. Un alto contenido de líquido en un digestor resulta en un alto contenido de CO<sub>2</sub> disuelto en agua, reduciendo el contenido de CO<sub>2</sub> del biogás.
  4. El aumento de temperatura durante el proceso de fermentación disminuye la concentración de CO<sub>2</sub> disuelto en agua.
  5. Es importante que el material de descarga esté totalmente descompuesto.

### 3.2.3 Modelo de producción de CH<sub>4</sub>.

Se llevó a cabo un estudio sobre la duración de la digestión que permite el agotamiento de los sólidos volátiles, trabajando a diferentes temperaturas con un mismo sustrato, según se presenta en la Figura 3.6 [Dr. Schulz H.,1996 citado por Sogari Noemi, 2003].

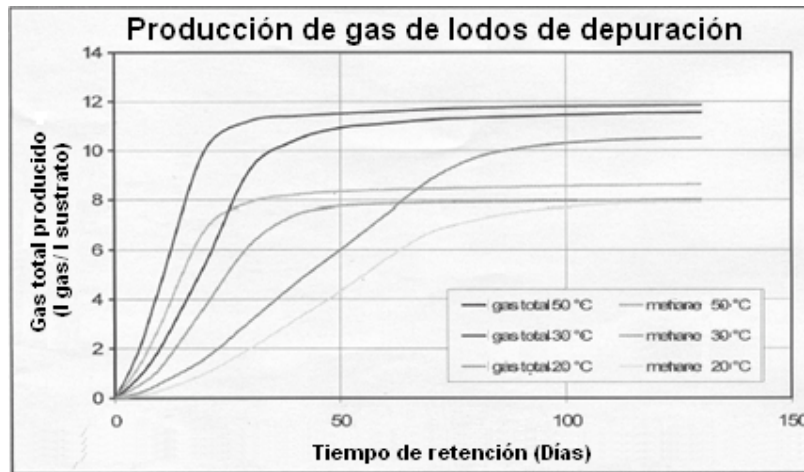


Figura 3.6 Cantidad total de gas producido por litro de materia, para diferentes temperaturas.

Cómo se había mencionado se observa que, conforme se incrementa la temperatura, la conversión de materia orgánica en biogás aumenta. En todos los casos, la forma de las curvas se asemeja a la de una función exponencial, a medida que aumenta el valor del tiempo, la curva crece hasta un tiempo determinado, para el cual la generación de gas permanece constante.

Puede expresarse de la siguiente manera:

$$M_{gen} = M_{max} * (1 - e^{-t/A}) \dots \dots \dots A$$

Donde:

$M_{gen}$  es la cantidad de CH<sub>4</sub> acumulado durante el proceso de fermentación.

$M_{max} = \frac{V_{CH4}}{S_{org. total}}$  es la máxima cantidad de metano que se puede producir

$V_{CH4}$  es el volumen de metano generado

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

t es el tiempo considerado.

A es una constante que depende de la temperatura de trabajo, el contenido de materia orgánica existente en el producto que se degrada, etc.

En un caso particular de las mediciones para estiércol de cerdo [12] a una temperatura de 35°C se tiene:

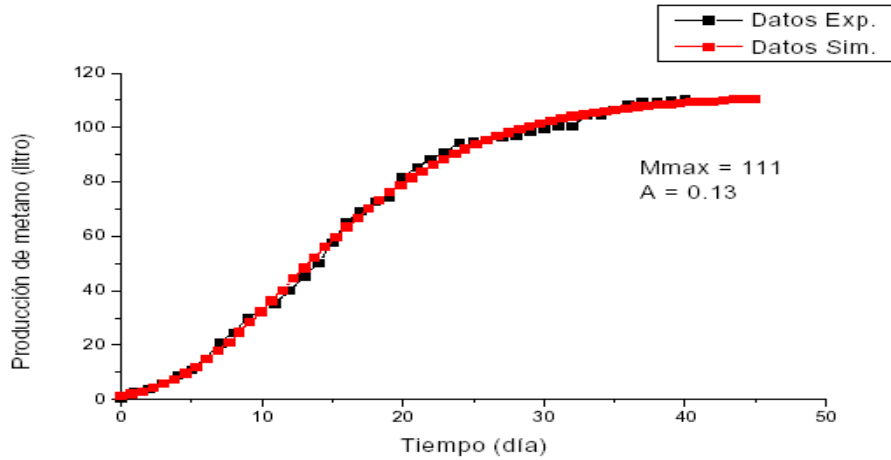


Figura 3.7 Producción de metano generado por la fermentación de estiércol de cerdo.

En este estudio se comprobó que los datos experimentales resultan muy cercanos a los datos simulados con la ecuación A. El porcentaje de  $CH_4$  depende del material de fermentación: el estiércol de cerdo alcanza aproximadamente el 67% de contenido.

El biogás es un poco más liviano que el aire y posee una temperatura de auto-ignición de alrededor de los 700°C (Diesel 350°C, Gasolina cerca de los 500°C). Con un contenido de  $CH_4$  mucho menor del 50%, el biogás deja de ser inflamable [8].

<b>EQUIVALENCIA ENERGÉTICA DEL BIOGÁS</b>
1 m <sup>3</sup> de biogás (60% de metano) equivale a:
0.71 litros de gasolina
0.55 litros de diesel
0.45 litros de gas licuado de petróleo
1.85 kilos de leña con 10% de humedad

Tabla 3.6 Potencial energético Biogás. Fuente: FIRCO

### 3.2.4 Almacenamiento, conducción, combustión y fertilizante.

Podemos hablar de 4 procesos en una planta de biogás:

- Transporte, almacenamiento y pre-tratamiento de estiércol.
- Producción de biogás.
- Almacenamiento de abono, acondicionamiento y utilización.
- Almacenamiento de biogás, acondicionamiento y utilización.



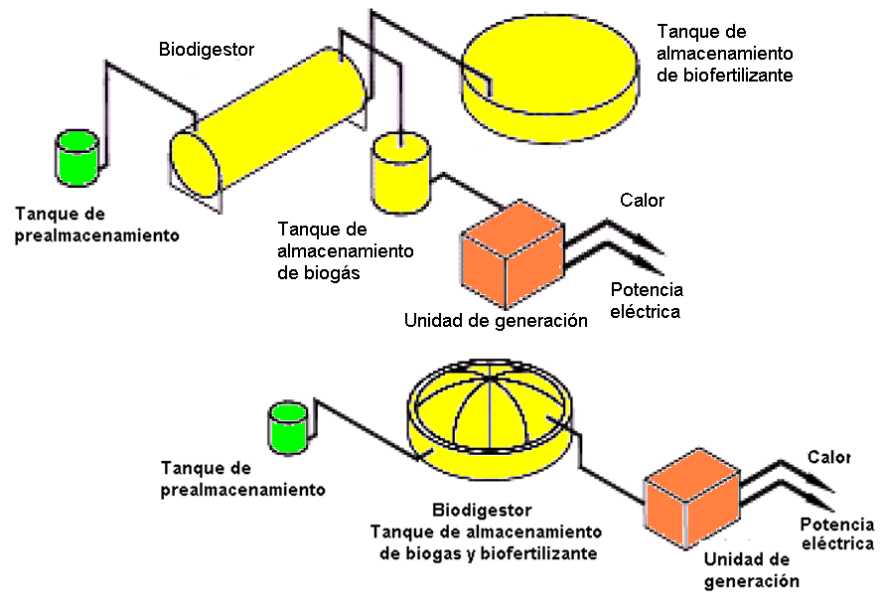


Figura 3.8 Esquemas generales de una planta de producción y aprovechamiento de biogás [5].



Figura 3.9 Planta de biogás en Alemania, procesadora de estiércol de cerdo [5].



Figura 3.10 Planta de biogás en Dinamarca [5].

### **3.2.4.1 Almacenamiento de estiércol.**

Los dispositivos para este efecto deben tener la capacidad de almacenar el estiércol por varios días. Siendo materia casi líquida puede ser bombeada posteriormente al digestor. Se puede evitar el uso de bombas si el tanque de almacenamiento está a más altura que el digestor. Debe tener un sistema de agitación.

### **3.2.4.2 Almacenamiento biogás.**

La forma de almacenar el biogás dependerá del tipo de digestor empleado. Se debe contar con válvulas de seguridad. La instalación de almacenamiento del biogás debe tener como mínimo la capacidad correspondiente a dos días de producción de biogás.

Tanques de baja presión.- Este tipo de almacenamiento es instalado al exterior, por ejemplo como domo encima del digestor. Se mantiene a un rango de presión de 5 Pa a 50 Pa y consiste en membranas especiales [5].

Tanques de media y alta presión.- Se mantienen a presiones de 500 KPa a 25 MPa. Como requieren cantidades adicionales de energía para mantener estas presiones no son muy usuales. Será necesaria sólo si existen excedentes de producción de biogás y se desea almacenarla por varios días [5].

### **3.2.4.3 Conducción.**

Para la conducción, las tuberías de gas pueden estar hechas de acero, cobre o plástico. Mientras más larga sea la tubería de gas mayor será la caída de presión presentándose la necesidad de adaptar bombas a la línea. La tubería de gas debe estar provista de un sistema que permita eliminar el agua de condensación [7].

### **3.2.4.4 Combustión.**

En caso de tener excedentes de biogás es necesario contar con un sistema de quemado del mismo. El biogás mezclado con aire puede ser quemado descomponiéndose principalmente en  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ .

El aire teórico es el 21% pero debe ser mayor para lograr una buena combustión. El gas obtenido por fermentación tiene un octanaje entre 100 y 110. La cámara de combustión y los quemadores deben estar hechos de acero colado, de acero especial o esmalte [8].

### **3.2.4.5 Fertilizante.**

La materia final que se extrae del digestor después de cumplido el tiempo de retención resulta un fertilizante con una fracción líquida y una sólida. En el caso del producido por desechos de cerdo está compuesto en general por nitrógeno, fósforo y potasio. Este no tiene mal olor, por lo que no atrae moscas, no deja residuos tóxicos en el suelo y eleva la calidad del mismo.

El efluente tiene una relación C/N baja en comparación con los desechos de animales no tratados. Esto se traduce en un tiempo más corto para actuar como fertilizante. Cuando la relación C/N es muy grande algunos micro-organismos son retenidos por el suelo de cultivo y compiten con las plantas por el nitrógeno [5].



Figura 3.11 Membrana instalada para almacenar biogás excedente [5].



Figura 3.12 Quemadores de biogás [8].



Figura 3.13 Aplicación de fertilizante directamente al suelo [8].

### 3.2.5 Filtros para acondicionamiento del biogás.

Aunque en las tecnologías del aprovechamiento del biogás no se pretende que exista un 100% de pureza de  $\text{CH}_4$ , con objeto de aminorar los daños que ciertos compuestos tóxicos, que reducen la calidad del biogás como combustible, pueden ocasionar en los equipos de los diferentes sistemas en los que se utilice el éste para la generación distribuida, existen procedimientos de filtrado del mismo que no solo eliminan los componentes dañinos, sino que en algunos casos aumentan la producción de  $\text{CH}_4$ .

El  $\text{CO}_2$  disminuye el poder calorífico, daña las celdas de combustible de baja temperatura, etc. El  $\text{H}_2\text{S}$  es altamente corrosivo al reaccionar con el agua, convirtiéndose en ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) que provoca corrosión. El valor recomendado de  $\text{H}_2\text{S}$  en el biogás es 200 ppm, para su uso en motores de combustión interna [8].

En 2007 en Costa Rica se realizó un estudio en la Universidad EARTH para medir la eficacia del filtrado de biogás por medio de suspensiones en agua de  $\text{CaO}$  (óxido de calcio),  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (hidróxido de calcio) y  $\text{CaSO}_4$  (sulfato de calcio), para determinar el mejor compuesto a utilizar como filtro para capturar el  $\text{CO}_2$ , el  $\text{CO}$  y el  $\text{H}_2\text{S}$  del biogás. El aumento en la concentración de  $\text{CH}_4$  se relacionó directamente con la retención del  $\text{CO}_2$  y del  $\text{CO}$  por parte de las suspensiones [14].

Compuestos	Mediciones	CH <sub>4</sub> %	H <sub>2</sub> S ppm
		Antes de filtración	79.4
CaO	Sin agitación	86.6	11.5
	Con agitación	91.4	3.2
Ca(OH) <sub>2</sub>	Sin agitación	82.6	67.1
	Con agitación	84.0	2.4

Tabla 3.7 Resultados al utilizar filtros para capturar el CO, el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>S en el biogás.

Un estudio realizado en 2008 en la granja La Estrella en Guanajuato, con biogás en el que se comparó el empleo de un filtro de limaduras de hierro, contra métodos de absorción en fase líquida en agua, CaO, NaOH, y monoetanolamina, se observó que el filtro de limaduras de hierro elimina solo el 12% del H<sub>2</sub>S, muy deficientemente, mientras que el agua como solución absorbente resultó de un 20%, la monoetanolamina alcanza porcentajes de remoción de un 100% por un período de tiempo superior a 15 minutos. La solución de CaO alcanza un 99.7% de remoción de H<sub>2</sub>S, sin embargo, deja de ser funcional cuando ha pasado un tiempo aproximado de 15 minutos. La solución de NaOH remueve un 96.9%, e igualmente pierde su efectividad luego de 5 minutos [15].

En 2009 se realizó otro estudio en la Universidad EARTH, donde se evaluó la capacidad de retención de H<sub>2</sub>S, en dos tipos de sustratos orgánicos, EM-compost y lombricompost. El filtro que mostró mayor eficiencia en la retención de H<sub>2</sub>S es el EM-compost y el filtro de mayor eficacia utilizado con ambos sustratos fue el de 200 cm de longitud [16]. Los resultados se muestran en la Figura 3.14.

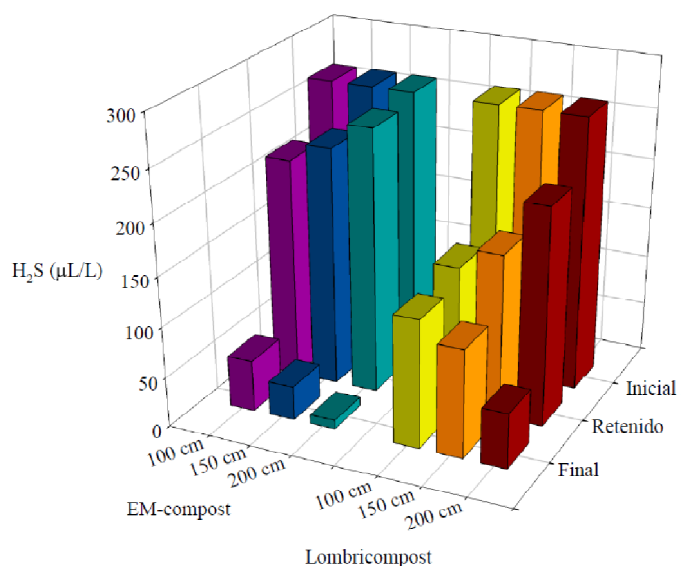


Figura 3.14 Retención de H<sub>2</sub>S en dos tipos de sustrato y tres longitudes de filtro

Comercialmente se utilizan cuatro métodos para la remoción del CO<sub>2</sub> del biogás:

- a) Lavado con agua
- b) Lavado con glicol polietileno
- c) Tamiz de carbón molecular
- d) Membranas.