

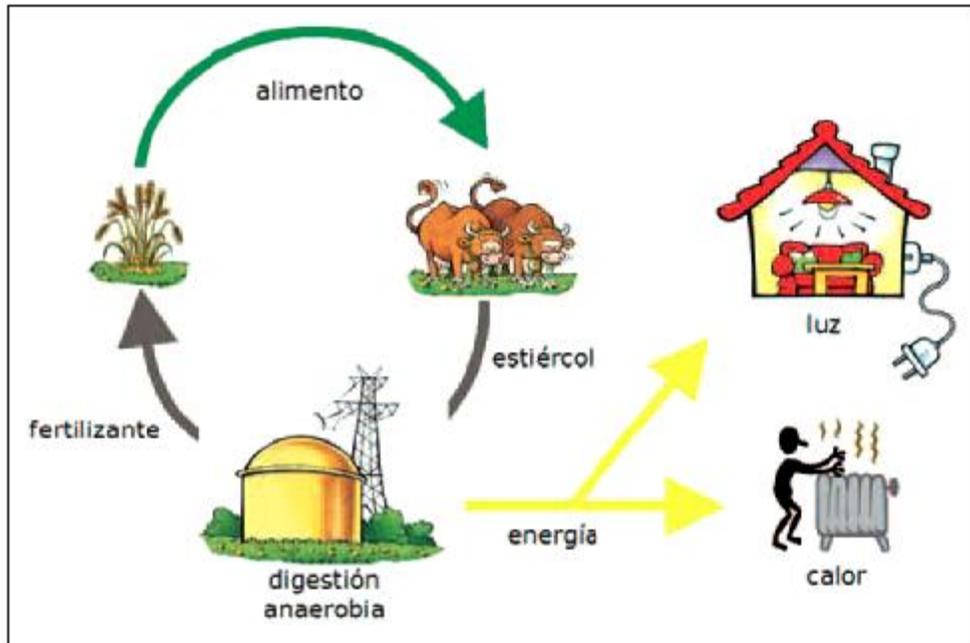
## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. PRINCIPIOS DE LA FERMENTACIÓN ANAERÓBICA**

La generación de biogás, mezcla constituida fundamentalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), y pequeñas cantidades de hidrógeno (H), sulfuro de hidrógeno ( $\text{SH}_2$ ) y nitrógeno (N) constituye un proceso vital dentro del ciclo de la materia orgánica en la naturaleza (Figura 2.1).

Las bacterias metanogénicas en efecto constituyen el último eslabón de la cadena de microorganismos encargados de digerir la materia orgánica y devolver al medio los elementos básicos para reiniciar el ciclo. Se estima que anualmente la actividad microbiológica libera a la atmósfera entre 590 y 880 millones de toneladas de metano.



**Figura 2.1:** Generación de Biomasa.<sup>1</sup>

### 2.1.1 Metanogénesis

“La metanogénesis es el paso final en la descomposición de la materia orgánica. Durante el proceso de descomposición, aceptores de electrones (como el oxígeno, hierro, sulfato, nitrato y manganeso) se reducen, mientras que se acumulan hidrógeno (H<sub>2</sub>) y dióxido de carbono. También se acumulan compuestos orgánicos ligeros por fermentación. Durante las fases avanzadas de la descomposición orgánica, todos los aceptores de electrones quedan reducidos excepto el dióxido de carbono. El dióxido de carbono es un producto de la mayoría de los procesos catabólicos, por lo que no se reduce como otros aceptores de electrones potenciales.”<sup>2</sup>

<sup>1</sup> <http://www.puc.cl/agronomia/> pags 29-31

<sup>2</sup> <http://es.wikipedia.org/wiki/metanogenesis>

### **2.1.2 PREREQUISITOS NECESARIOS PARA INICIAR EL PROCESO**

La fermentación anaeróbica involucra a un complejo número de microorganismos de distinto tipo los cuales pueden ser divididos en tres grandes grupos principales.

La real producción de metano es la última parte del proceso y no ocurre si no cuando han actuado los primeros dos grupos de microorganismos.

Las bacterias productoras del biogás son estrictamente anaeróbicas y por lo tanto sólo podrán sobrevivir en ausencia total de oxígeno atmosférico.

Otra característica que las identifica es la sensibilidad a los cambios ambientales debido a lo cual será necesario un mantenimiento casi constante de los parámetros básicos como la temperatura.

Las dificultades en el manejo de estas delicadas bacterias explican que la investigación sistemática tanto de su morfología como de la bioquímica fisiológica sólo se halla iniciado hace cincuenta años.

Hoy en día gracias a estudios muy recientes podemos conocer mejor el mecanismo y funcionamiento de este complejo sistema microbiológico involucrado en la descomposición de la materia orgánica que la reduce a sus componentes básicos  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ .

### **2.1.3 ETAPAS QUE INTERVIENEN EN LA DESCOMPOSICIÓN ANAERÓBICA**

A continuación se detalla cada una de las diferentes etapas y sus principales características que intervienen en la descomposición anaeróbica.

### **2.1.3.1 Hidrólisis o Licuefacción**

En esta etapa la materia orgánica es metabolizada por los microorganismos. En esta fase se descompone las cadenas de materia orgánica en otras más cortas, obteniéndose los productos intermedios.

La materia orgánica es descompuesta por la acción de un grupo de bacterias hidrolíticas anaeróbicas que hidrolizan las moléculas solubles en agua, tales como grasas, proteínas y carbohidratos y las transforma en polímeros más simples. Los compuestos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas que actúan el exterior celular por lo que consideran exoenzimas. La hidrólisis es por lo tanto, la conversión de polímeros en sus respectivos monómeros<sup>3</sup>

### **2.1.3.2 Acetogenesis**

Esta etapa la llevan a cabo las bacterias acetogénicas y realizan la degradación de los ácidos orgánicos llevándolos al grupo acético

$\text{CH}_3\text{-COOH}$  y liberando como productos Hidrógeno y Dióxido de carbono.

Esta reacción es endoenergética pues demanda energía para ser realizada y es posible gracias a la estrecha relación simbiótica con las bacterias metanogénicas que sustraen los productos finales del medio minimizando la concentración de los mismos en la cercanía de las bacterias acetogénicas. Esta baja concentración de productos finales es la que activa la reacción y actividad de estas bacterias, haciendo posible la degradación manteniendo el equilibrio energético.

---

<sup>3</sup> ROMERO Moncayo Gabriel, Dimensionamiento y diseño de biodigestores y plantas de biogás, 2008, volume 1 ,página 55

### 2.1.3.3 Metanogénica

Las bacterias intervinientes en esta etapa pertenecen al grupo de las achibacterias y poseen características únicas que las diferencian de todo el resto de las bacterias por lo cual, se cree que pertenecen a uno de los géneros más primitivos de vida colonizadoras de la superficie terrestre.<sup>4</sup>

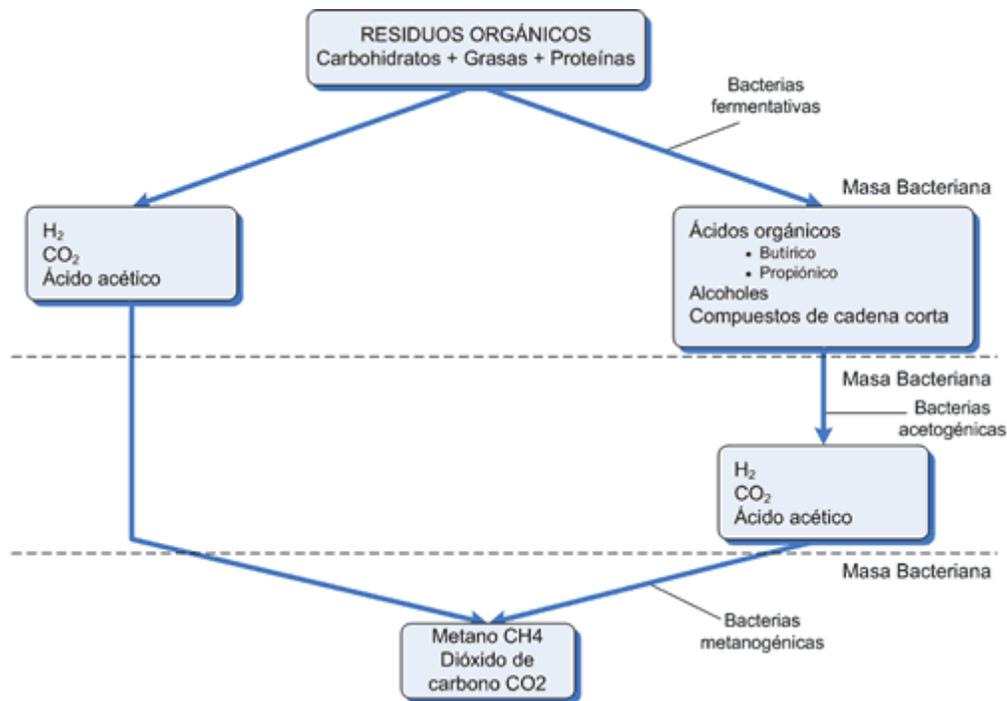


Figura 2.2: Características de Cada una de las Etapas.<sup>5</sup>

La transformación final cumplida en esta etapa tiene como principal substrato el acético junto a otros ácidos orgánicos de cadena corta y los productos finales liberados están constituidos por el metano y el dióxido de carbono.

<sup>4</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A - Castelar, página 5

<sup>5</sup> <http://www.textoscientificos.com/energia/fermentacion>

La Figura 2.2 resume las distintas características de cada una de las etapas vistas que por simplificación se han agrupado en dos fases (ácida que involucra la de hidrólisis y acetogénica y la metanogénica), con los principales compuestos químicos intervinientes.

Los microorganismos intervinientes en cada fase tienen propiedades distintas que son muy importantes y se las debe conocer para lograr comprender el equilibrio y funcionamiento óptimo de un digestor.

Estas características han sido resumidas en la Tabla 2.1 para su mejor comprensión.

**Tabla 2.1** Propiedades de la Fases Acidogénica y Metanogénica.<sup>6</sup>

FASE ACIDOGENICA	FASE METANOGENICA
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bacterias facultativas (pueden vivir en presencia de bajos contenidos de oxígeno).</li> <li>- Reproducción muy rápida (alta tasa reproductiva).</li> <li>- Poco sensibles a los cambios de acidez y temperatura.</li> <li>- Principales metabolitos, ácidos orgánicos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bacterias anaeróbicas estrictas (No pueden vivir en presencia de oxígeno).</li> <li>- Reproducción lenta (baja tasa reproductiva).</li> <li>- Muy sensibles a los cambios de acidez y temperatura.</li> <li>- Principales productos finales, metano y dióxido de carbono</li> </ul>

Como vemos el proceso ha sido simplificado aún más reduciendo el mismo a dos fases principales la ácida generadora de productos intermedios y la metanogénica.

---

<sup>6</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A - Castelar, página 6

De la Tabla 2.1 se desprende que una alteración en los parámetros de funcionamiento incidirá negativamente sobre la fase metanogénica preponderantemente, lo cual significará una merma importante en la producción de gas y una acidificación del contenido pudiéndose llegar al bloqueo total de la fermentación.

Debido a la lenta velocidad de recuperación de las bacterias metanogénicas, la estabilización de un digestor “agriado” será muy lenta, de allí la importancia del cuidado de los parámetros que gobiernan el proceso y que veremos a continuación en detalle.

#### **2.1.4 PRINCIPALES FACTORES QUE AFECTAN LA PRODUCCIÓN DE GAS**

La actividad metabólica involucrada en el proceso metanogénico se ve afectada por diversos factores. Debido a que cada grupo de bacterias intervinientes en las distintas etapas del proceso responde en forma diferencial a esos cambios no es posible dar valores cualitativos sobre el grado que afecta cada uno de ellos a la producción de gas en forma precisa. Por lo tanto nos limitaremos a dar una valoración cualitativa y en algunos casos se darán cifras y cuadros que deben tomarse como orientativos ya que los valores pueden sufrir importantes variaciones.

Entre los factores más importantes a tenerse en cuenta se desarrollarán los siguientes: el tipo de sustrato (nutrientes disponibles); la temperatura del sustrato; la carga volumétrica; el tiempo de retención hidráulico; el nivel de acidez (pH); la relación Carbono/Nitrógeno; la concentración del sustrato; el agregado de

inoculantes; el grado de mezclado; y la presencia de compuestos inhibidores del proceso

#### **2.1.4.1 Tipo de Materia Prima**

Las materias primas fermentables incluyen dentro de un amplio espectro a los excrementos animales y humanos, aguas residuales orgánicas de las industrias (producción de alcohol, procesado de frutas, verduras, lácteos, carnes, alimenticias en general), restos de cosechas y basuras de diferentes tipos, como los efluentes de determinadas industrias químicas.

El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores).

Normalmente las sustancias orgánicas como los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas. Sin embargo en la digestión de ciertos desechos industriales puede presentarse el caso de ser necesaria la adición de los compuestos enumerados o bien un post tratamiento aeróbico

Las sustancias con alto contenido de lignina no son directamente aprovechables y por lo tanto deben someterse a tratamientos previos (cortado, macerado, compostado) a fin de liberar las sustancias factibles de ser transformadas de las incrustaciones de lignina.

En lo atinente a estiércoles animales la degradación de cada uno de ellos dependerá fundamentalmente del tipo de animal y la alimentación que hayan recibido los mismos.

Los valores tanto de producción como de rendimiento en gas de los estiércoles presentan grandes diferencias entre distintos autores. Esto es debido al sinnúmero de factores intervinientes que hacen muy difícil la comparación de resultados por lo tanto los valores brindados en la Tabla 2.2 deben ser tomados como orientativos.

Como norma se deberá tomar en cuenta que a raíz de estar trabajando en un medio biológico sólo los promedios estadísticos de una serie prolongada de mediciones serán confiables siempre y cuando figuren las condiciones en las cuales fueron realizadas las pruebas.

En cuanto al volumen de estiércol producido por las distintas especies animales son variables de acuerdo fundamentalmente al peso y al tipo de alimentación y manejo de los mismos. Cuando se encare un proyecto específico se recomienda realizar una serie de mediciones en el lugar donde se emplazará el digestor.

A modo ilustrativo se expone a continuación un cuadro indicativo sobre cantidades de estiércol producido por distintos tipos de animales y el rendimiento en gas de los mismos tomando como referencia el kilogramo de sólidos volátiles.

**Tabla 2.2** Cuadro Indicativo de Cantidades de Estiércol Producido por Distintos Animales.<sup>7</sup>

Especie	Peso Vivo	Kg Estiércol/día	1Kg.S.V.	%CH <sub>4</sub>
Cerdos	50	4,5 – 6	340 – 550	65 – 70
Vacunos	400	25 – 40	90 – 310	65
Equinos	450	12 – 16	200 – 300	65
Ovinos	45	2,5	90 – 310	63
Aves	1,5	0,06	310 – 620	60
Caprinos	40	1,5	110 - 290	--

#### 2.1.4.2 Temperatura del Sustrato

Para que se inicie el proceso se necesita una temperatura mínima de 4º a 5º C y no se debe sobrepasar una máxima de alrededor de 70ºC. Se realiza generalmente una diferenciación en tres rangos de temperatura de acuerdo al tipo de bacterias que predominan en cada una de ellas (ver Tabla 2.3).

**Tabla 2.3** Rangos de Temperatura de Acuerdo al Tipo de Bacteria.<sup>8</sup>

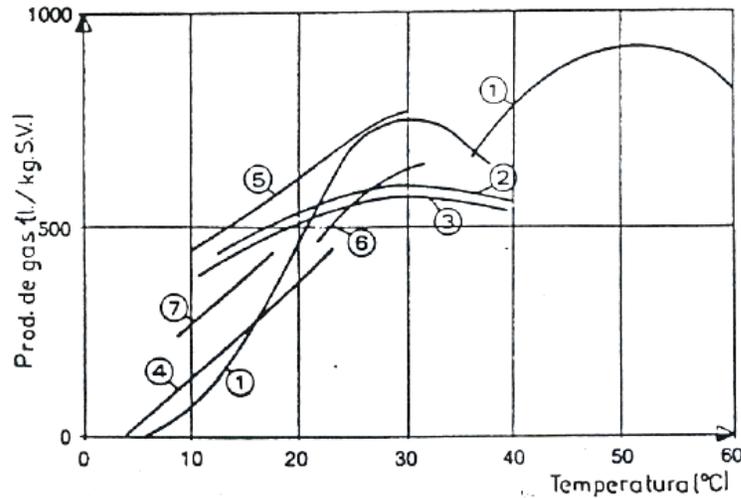
Bacterias	Rango de Temperaturas	Sensibilidad
Psicrofílicas	menos de 20ºC	+ - 2ºC/hora
Mesofílicas	entre 20ºC y 40ºC	+ - 1ºC/hora
Termofílicas	más de 40ºC	+ - 0,5ºC/hora

La actividad biológica y por lo tanto la producción de gas aumenta con la temperatura (Figura 2.3). Al mismo tiempo se deberá tener en cuenta que al no generar calor en el proceso la temperatura deberá ser lograda y mantenida mediante energía exterior. El cuidado en el mantenimiento también debe

<sup>7</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 8

<sup>8</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 8

extremarse a medida que aumentamos la temperatura, dada la mayor sensibilidad que presentan las bacterias termofílicas a las pequeñas variaciones térmicas.



**Figura 2.3:** Producción de Gas en Relación a la Temperatura (1 a 7) Diferentes Autores.<sup>9</sup>

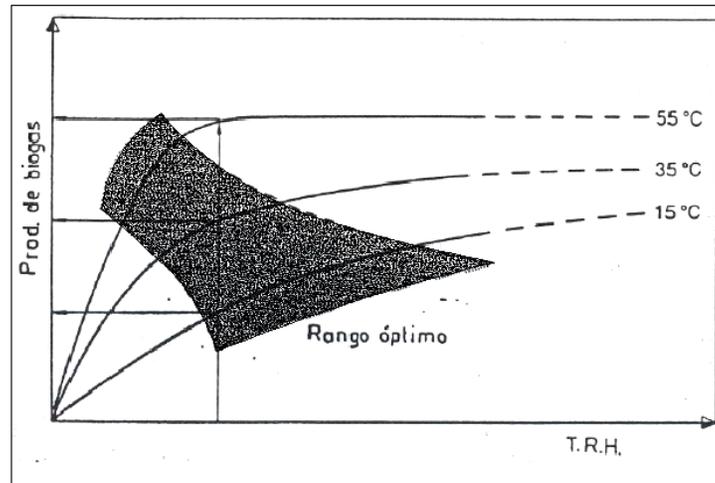
Todas estas consideraciones deben ser evaluadas antes de escoger un determinado rango de temperaturas para el funcionamiento de un digestor ya que a pesar de incrementarse la eficiencia y producción de gas paralelamente aumentará los costos de instalación y la complejidad de la misma.

Los digestores que trabajan a temperaturas meso y termofílicas poseen generalmente sistemas de calefacción, aislación y control los cuales son obviados en digestores rurales económicos que trabajan a bajas temperaturas.

La temperatura está íntimamente relacionada con los tiempos que debe permanecer la biomasa dentro del digestor para completar su degradación (Tiempo de retención Hidráulica, TRH). A medida que se aumenta la temperatura

<sup>9</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 9

disminuyen los tiempos de retención y en consecuencia se necesitará un menor volumen de reactor para digerir una misma cantidad de biomasa, (Figura 2.4).



**Figura 2.4:** Rango Óptimo de Tiempo de Retención.<sup>10</sup>

### 2.1.4.3 Velocidad de Carga Volumétrica

Con este término se designa al volumen de sustrato orgánico cargado diariamente al digestor. Este valor 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 digestor.

Las cantidades de sólidos y sólidos volátiles se extraen afectando a las cantidades en kg de material cargado con los porcentajes de sólidos o sólidos volátiles que se

<sup>10</sup> ROMERO Moncayo Gabriel, Dimensionamiento y diseño de biodigestores y plantas de biogás, 2008, volumen 1, página 81

obtiene por análisis. (Porcentaje de sólidos sometiendo al sustrato a desecación, 105°C hasta peso constante y extrayendo el siguiente coeficiente: (peso húmedo - peso seco)/peso húmedo. El porcentaje de sólidos volátiles se obtiene sometiendo la muestra seca a la mufla, 560°C durante tres horas y extrayendo el siguiente coeficiente:

$$1 - \frac{((\text{peso seco} - \text{peso ceniza}))}{\text{peso seco}} \quad (2.1)$$

Un factor importante a tener en cuenta en este parámetro es la dilución utilizada, debido a que una misma cantidad de material degradable podrá ser cargado con diferentes volúmenes de agua.

#### 2.1.4.4 Tiempos de Retención

Este parámetro sólo puede ser claramente definido en los “sistemas discontinuos o Batch” donde el T.R. coincide con el tiempo de permanencia del sustrato dentro del digestor.

En los digestores continuos y semicontinuos el tiempo de retención se define como el valor en días del cociente entre el volumen del digestor y el volumen de carga diaria:

$$TR = \frac{\text{Volumen del digestor (m}^3\text{)} * \text{Contenido de sólidos en la carga (Kg/m}^3\text{)}}{\text{Sólidos Cargados (Kg/día)}} \quad (2.2)$$

De acuerdo al diseño del reactor, el mezclado y la forma de extracción de los efluentes pueden existir variables diferencias entre los tiempos de retención de líquidos y sólidos debido a lo cual suelen determinarse ambos valores.

El T.R. está íntimamente ligado con dos factores: el tipo de sustrato y la temperatura del mismo.

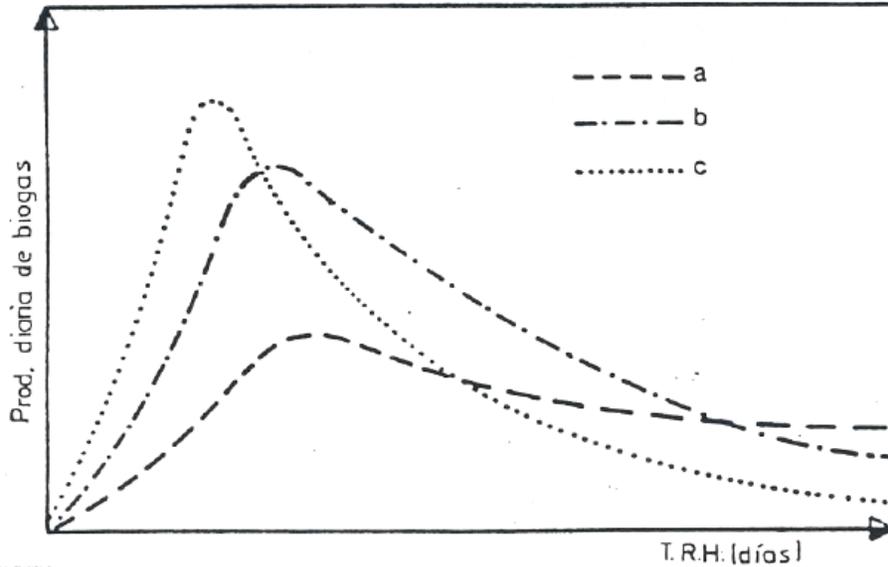
La selección de una mayor temperatura implicará una disminución en los tiempos de retención requeridos y consecuentemente serán menores los volúmenes de reactor necesarios para digerir un determinado volumen de material.

La relación costo beneficio es el factor que finalmente determinará la optimización entre la temperatura y el T.R., ya varían los volúmenes, los sistemas paralelos de control, la calefacción y la eficiencia.

Con relación al tipo de sustrato, generalmente los materiales con mayor proporción de carbono retenido en moléculas resistentes como la celulosa demandarán mayores tiempos de retención para ser totalmente digeridos. En la Figura 2.5 podemos observar cómo se distribuye en función al tiempo de retención la producción diaria de gas para materiales con distintas proporciones de celulosa.<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A - Castelar, página 10



**Figura 2.5:** Producción de Biogás – Tipos de Biomasa.<sup>12</sup>  
 a) Pasto Verde; b) Estiércol Vacuno; c) Paja

A modo de ejemplo se dan valores indicativos de tiempos de retención usualmente más utilizados en la digestión de estiércoles a temperatura mesofílica (Tabla 2.4). El límite mínimo de los T.R. está dado por la tasa de reproducción de las bacterias metanogénicas debido a que la continua salida de efluente del digestor extrae una determinada cantidad de bacterias que se encuentran en el líquido. Esta extracción debe ser compensada por la multiplicación de las bacterias que pertenecen dentro del reactor.

**Tabla 2.4** Valores Indicativos de T.R en Temperatura Mesofísica.<sup>13</sup>

Materia Prima	T.R.H.
Estiércol vacuno liquido	20 – 30 días
Estiércol porcino liquido	15 – 25 días
Estiércol aviar liquido	20 – 40 días

<sup>12</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 6

<sup>13</sup> <http://www.textoscientificos.com/energia/biogas/factores>

Por esta razón en los últimos años se han buscado diseños de cámaras de digestión que procuran lograr grandes superficies internas sobre las cuales se depositan como una película las bacterias u otros sistemas que logran retener a las metanogénicas pudiéndose lograr de este modo T.R. menores

#### **2.1.4.5 Relación Carbono/Nitrógeno**

La cantidad y la calidad del biogás producido por la materia orgánica al ser sometida a un proceso anaerobio dependen de la composición del desecho utilizado como podemos ver en la Tabla 2.5

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de nutrientes para las bacterias formadoras de metano (metanogénicas). El carbono es la fuente de energía y el nitrógeno contribuye a la formación de nuevas células en el proceso.<sup>14</sup>

La relación ideal de éstos es de 30:1 hasta 20:1. Si el nitrógeno presente es menor al necesario, se ve limitada la velocidad de producción de biogás; por otra parte, si está en exceso, se produce más amoníaco del requerido, el cual es tóxico e inhibidor del proceso.

Los desechos animales presentan una relación C: N menor a la óptima, debido a su alto contenido de nitrógeno; los residuos agrícolas, en cambio, contienen poco nitrógeno por lo que suele mezclarse con las excretas para obtener de este modo una óptima relación.

---

<sup>14</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A - Castelar, página 5

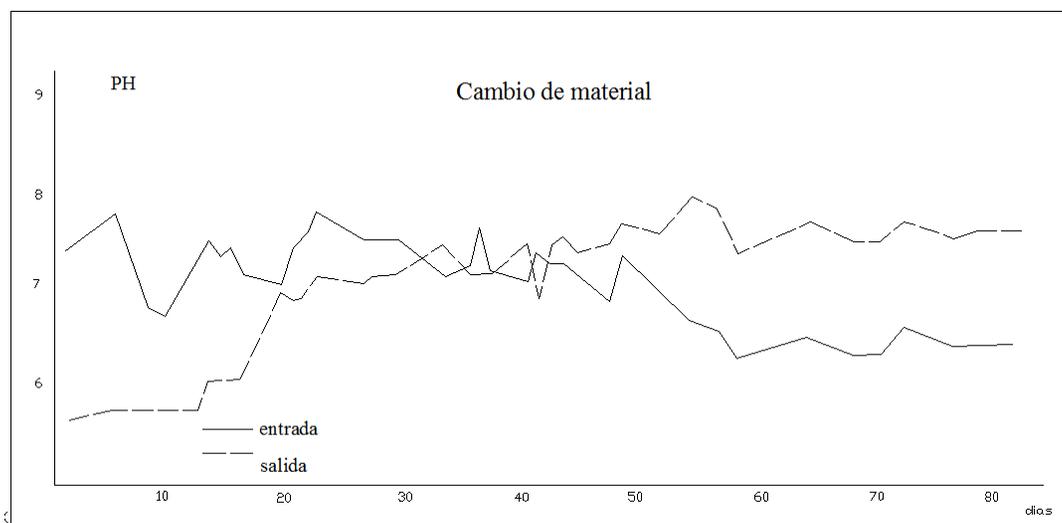
**Tabla 2.5** Composición del Desecho Utilizado para la Producción de Biogás.<sup>15</sup>

<b>Materia</b>	<b>Nitrógeno (% peso seco)</b>	<b>C/N</b>
Orina	15-18	0.8
Sangre	6.3	3.0
huesos machacados	-	3.5
excrementos nocturnos	5.5-6.5	6-10
Pollo	10-14	15
Carnero	3.8	
Cerdo	3.8	
Caballo	2.3	25
Vaca	1.7	25-18
Residuos activados	5	6
Residuos frescos	-	11
Hierba cortada	4	12
Hierbas mezcladas	2.4	19
Heno, hierba fresca	4	12
Heno, alfalfa	2.8	17
Heno, hierba azul	2.5	19
Vegetales no leguminosos	2.5-4	11-19
Alga marina	1.9	19
Clavo	1.8	27
Mostaza	1.5	26
Patatas	1.5	25
Espigas de trigo	0.5	150
Aserrín	0.1	200-500

#### **2.1.4.6 Valor de Acidez (pH)**

Una vez estabilizado el proceso fermentativo el pH se mantiene en valores que oscilan entre 7 y 8,5. Debido a los efectos buffer que producen los compuestos bicarbonato-dióxido de carbono ( $\text{CO}_2\text{-HCO}_3$ ) y Amonio-Amoníaco ( $\text{NH}_4\text{-NH}_3$ ) el proceso en sí mismo tiene capacidad de regular diferencias en el pH del material de entrada.

<sup>15</sup> MARCHAIN, U. (1992). Biogas Processes for Sustainable Development. Rome, pp.



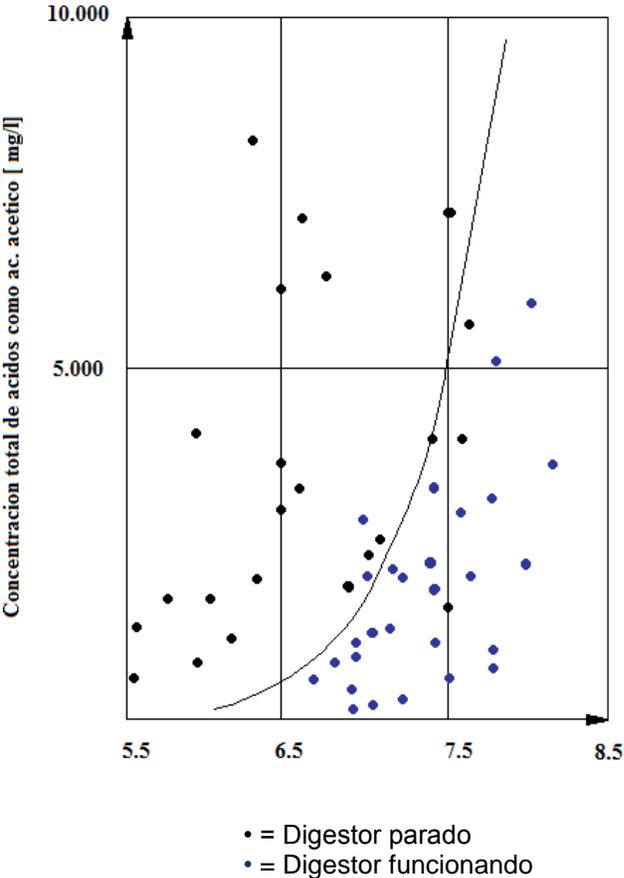
**Figura 2.6:** Nivel de Acidez (pH) en Relación al T.R.<sup>16</sup>

Las desviaciones de los valores normales es indicativo de un fuerte deterioro del equilibrio entre las bacterias de la faz ácida y la metanogénica provocado por severas fluctuaciones en alguno de los parámetros que gobiernan el proceso.

La Figura 2.6 muestra la evolución de los niveles de acidez (pH) de un digestor continuo desde su arranque hasta la estabilización. Puede observarse la diferencia entre los valores de entrada y salida; en un primer momento antes de la estabilización los niveles de salida que indican que ocurre dentro del digestor son muy bajos, indicando una preponderancia de la faz ácida. Una vez estabilizado a pesar de que baja y sube le pH del material introducido al digestor éste es capaz de amortiguar los cambios.

<sup>16</sup> ROMERO Moncayo Gabriel, Dimensionamiento y diseño de biodigestores y plantas de biogás, 2008, volumen 1, página 66

La Figura 2.7 muestra la línea límite de inhibición entre digestores en operación y los “agriados” (30 mg/l de ac. volátiles no ionizados). Debe recordarse que cuando un digestor se descompensa tarda de 30 a 60 días en volver a la normalidad



**Figura 2.7:** Concentración Total de Ácidos en Relación al Nivel de Acidez (pH).<sup>17</sup>

<sup>17</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 7

#### **2.1.4.7 Contenido de Sólidos**

La movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se ve crecientemente limitada a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto puede verse afectada la eficiencia y producción de gas. Por otro lado podemos encontrar en la literatura datos de producciones de gas importantes logradas en rellenos sanitarios con un alto contenido de sólidos.

En este punto tampoco existen reglas fijas; mediciones realizadas utilizando mezclas de estiércoles animales en agua han determinado que para digestores continuos el porcentaje de sólidos óptimo oscila entre el 8% y el 12%.<sup>18</sup>

#### **2.1.4.8 Inclusión de Inoculantes**

El crecimiento bacteriano dentro de los digestores sigue desde su arranque la curva típica graficada en la Figura 2.8 en la cual puede distinguirse claramente tres etapas: La de arranque (I), la de estabilización (II) y la de declinación (III).

La primera etapa puede ser acortada mediante la inclusión de un determinado porcentaje de material de otro digestor rico en bacterias que se encuentran en plena actividad. Esto es particularmente importante en los digestores discontinuos que deben ser arrancados frecuentemente

---

<sup>18</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 12



**Figura 2.8:** Crecimiento Bacterial – T.R.<sup>19</sup>

Al llegarse en forma más rápida a la estabilización puede incrementarse la producción de gas por kg de estiércol

Los dos factores a tener en cuenta en la inoculación de un digestor son la proporción en que se agrega y la edad del mismo. Cuanto mayor sea la proporción y menor la edad mayor será la eficacia.

#### **2.1.4.9 Agitación – Mezclado**

Los objetivos buscados con la agitación son: remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanógenas, mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana, evitar la formación de costra que se forma dentro del

<sup>19</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 13

digestor, uniformar la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica.

En la selección del sistema, frecuencia e intensidad de la agitación se deberán realizar las siguientes consideraciones: El proceso fermentativo involucra un equilibrio simbiótico entre varios tipos de bacterias. La ruptura de ese equilibrio en el cuál el metabolito de un grupo específico servirá de alimento para el siguiente implicará una mema en la actividad biológica y por ende una reducción en la producción de gas.

Como conclusión en la elección de un determinado sistema se tendrá siempre presente tanto los objetivos buscados como el prejuicio que puede causar una agitación excesiva debiéndose buscar un punto medio óptimo.

Existen varios mecanismos de agitación utilizados desde los más simples que consisten en un batido manual o el provocado por la entrada y salida de los líquidos hasta sofisticados equipos que involucran agitadores a hélice, recirculadores de sustrato e inyectores de gas.

#### **2.1.4.10 Inhibidores**

“La presencia de metales pesados, antibióticos y detergentes en determinadas concentraciones pueden inhibir e incluso interrumpir el proceso fermentativo.

Cuando es demasiado alta la concentración de ácidos volátiles (más de 2.000 ppm para la fermentación mesofílica y de 3.600 ppm para la termofílica se inhibirá la

digestión. También una elevada concentración de Nitrógeno y Amoníaco destruyen las bacterias metanogénicas.”<sup>20</sup>

**Tabla 2.6** Concentración de Ciertos Inhibidores Comunes.<sup>21</sup>

INHIBIDORES	CONCENTRACION INHIBIDORA
SO <sub>4</sub>	5.000 ppm
NaCl	40.000 ppm
Nitrato (según contenido de Nitrógeno)	0,05 mg/ml
Cu	100 mg/l
Cr	200 mg/l
Ni	200-500 mg/l
CN (Después que se han domesticado las bacterias metanogénicas a 2-10 mg/ml).	25 mg/l
ABS (Detergente sintético)	20-40 mg/l
Na	3.500-5.500 mg/l
K	2.500-4.500 mg/l
Ca	2.500-4.500 mg/l
Mg	1.000-1.500 mg/l

En la Tabla 2.6 se dan valores de concentraciones de ciertos inhibidores comunes. Valores que se deben tomar como orientativos, puesto que las bacterias intervinientes pueden con el tiempo adaptarse a condiciones que en un principio las afectaba marcadamente.

## 2.2. TECNOLOGIA EMPLEADA EN LA DIGESTION ANAEROBICA

El hombre de acuerdo a la aplicación de gas, las características del material a ser digerido, a las exigencias en cuanto a niveles de descontaminación a lograr y a la

<sup>20</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 14

<sup>21</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 14

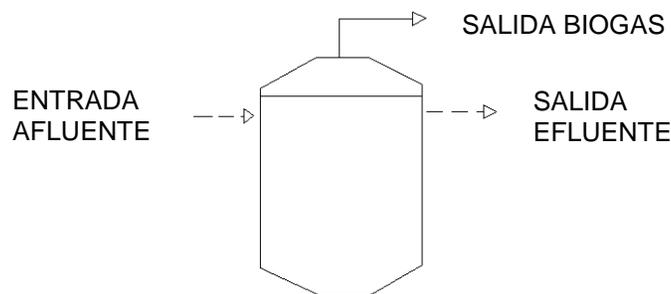
relación costo-inversión-beneficio a diseñado y probado a lo largo del desarrollo de esta tecnología diversos tipos de digestores.

A fin de simplificar el análisis y comprensión de los distintos tipos de digestores en utilización se agruparan los mismos en la Tabla 2.7 desde los más sencillos hasta la última generación de reactores de alta eficiencia, complejidad y costo; clasificando los mismos de acuerdo a diferentes criterios.

**Tabla 2.7** Tipos de Biodigestores.<sup>22</sup>

1.- Carga	a) Sistema Batch b) Sistema Continuo o Semicontinuo
2.- Intensidad de Mezcla	a) Mezcla Completa b) Mezcla Parcial o Nula
3.- Manejo del Sustrato	a) Contacto Anaeróbico b) U.A.S.B. : (Upflow Anaerobic Sludge Blanket c) Lecho Fluidizado d) Filtro Anaeróbico
4.- Manejo Bioquímico	a) Una Etapa b) Dos Etapas

**1-a) Sistema Batch:**



**Figura 2.9:** Biodigestor de Sistema Bach.<sup>23</sup>

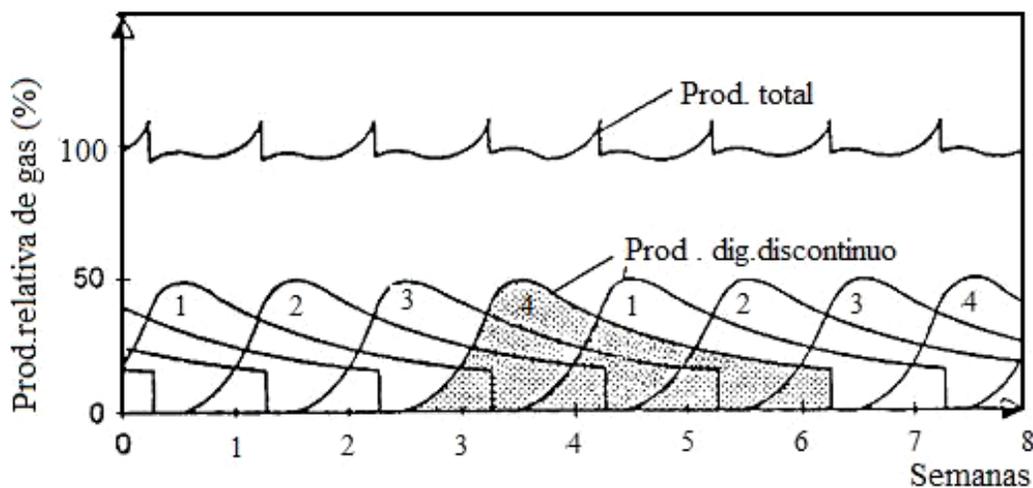
<sup>22</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 15

<sup>23</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 15

Se caracterizan por una carga y vaciado total de la cámara de digestión. De uso en laboratorios y en el tratamiento de materias vegetales. Con o sin agitación. Requieren para acelerar su arranque de una proporción de inóculo 20%. Su curva de producción de gas sigue la característica (arranque-estabilización-agotamiento).

Esto obliga a fin de mantener una producción de gas estable a lo largo del tiempo a poseer por lo menos tres o cuatro digestores de este tipo cada uno de los cuales se hallará operando en las distintas etapas. Lo que permite mantener la producción de biogás en un cierto nivel uniforme.

La Figura 2.10 nos muestra la historia de la producción de gas en función del tiempo de un sistema Batch de 4 reactores.

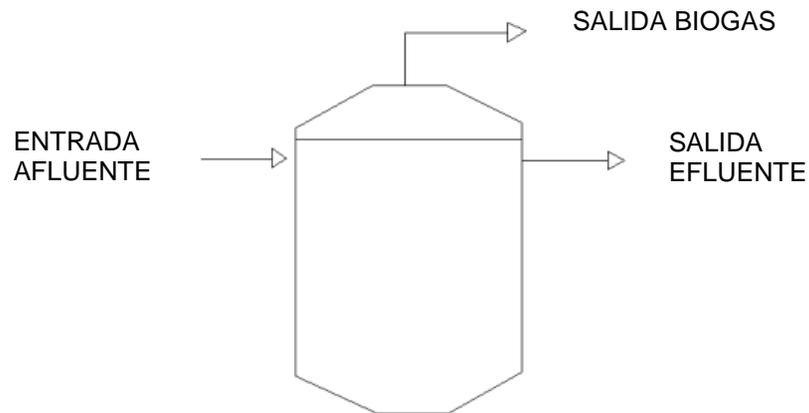


**Figura 2.10:** Producción Relativa de Gas – T.R.<sup>24</sup>

<sup>24</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 15

Este tipo de digestores son eficaces para la digestión de materiales celulósicos que no pueden ser tratados en los digestores de tipo continuo debido al posible taponamiento de los conductos de alimentación y salida. Su utilización no está muy difundida.

#### 1-b) Sistema Continuo o Semicontinuo:



**Figura 2.11:** Biodigestor de Sistema Continuo o Semicontinuo.<sup>25</sup>

En este tipo de digestores el volumen que ingresa desplaza una cantidad equivalente de efluente que se evacua por la salida. De este modo el volumen del substrato en la cámara de digestión se mantiene constante. Los continuos se cargan generalmente en forma diaria, a diferencia de los semicontinuos se descargan totalmente una o dos veces por año que generalmente coincide con el período de siembra para aprovechar el poder fertilizante de los residuos de la digestión y de los lodos fermentados, parte de estos últimos es utilizada en el nuevo arranque. (Sistema muy difundido en China).

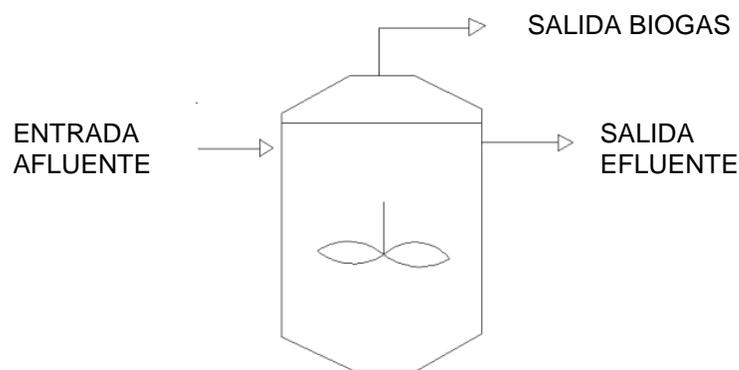
---

<sup>25</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 16

El tiempo de permanencia de la biomasa dentro del digestor estará dado por el cociente entre el volumen de la cámara de digestión y el de la carga diaria. Dicho valor no es exacto debido a que la parte del material introducido puede salir en un período más corto, lo que se trata de minimizar mediante un adecuado diseño de la cámara.

La mayor parte de los digestores difundidos a lo largo de todo el mundo pertenecen a esta categoría y existen dentro de ella enormes variaciones sobre el mismo principio.

#### 2-a) Mezclado completo:



**Figura 2.12:** Biodigestor de Mezclado Completo.<sup>26</sup>

En estos digestores se busca que el substrato en fermentación dentro de la cámara se mezcle en forma total, en general diariamente. En el caso de los reactores calefaccionados, esta acción asegura una distribución uniforme de la temperatura en todo el volumen. Existen diversos medios para lograr este fin,

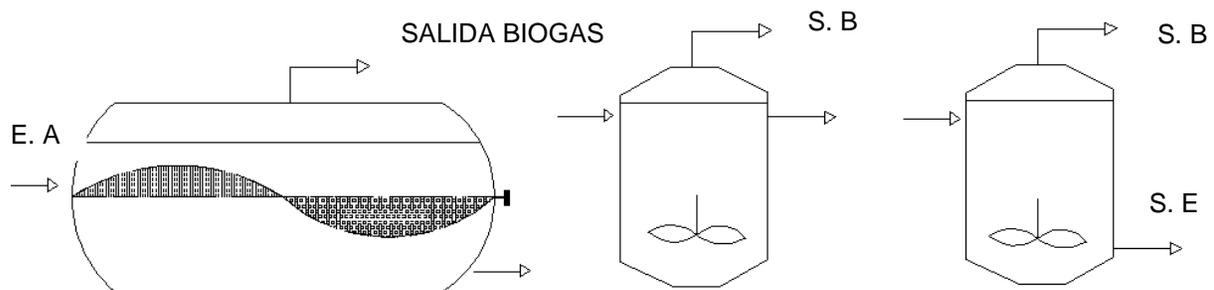
---

<sup>26</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 16

entre los que podemos mencionar: la agitación de líquidos mediante bombas internas o externas al digestor y la reinyección de biogás dentro de la cámara produciendo un intenso burbujeo.

Se debe tener mucho cuidado en la intensidad y periodicidad de la agitación, para no afectar el delicado equilibrio bacteriano.

## 2-b) Mezclado parcial:



**Figuras 2.13:** Mezclado Parcial<sup>27</sup>

**Figuras 2.14:** Biodigestor de Mezclado Parcial con Flujo Ascendente

**Figuras 2.15:** Biodigestor de Mezclado Parcial con Flujo Descendente

En este grupo se encuentran los pequeños digestores rurales en los cuales los métodos de agitación son muy rudimentarios (agitadores del tipo manual o rotación de la campana gasométrica). Los que se realizan con el fin de evitar la formación de la perjudicial costra.

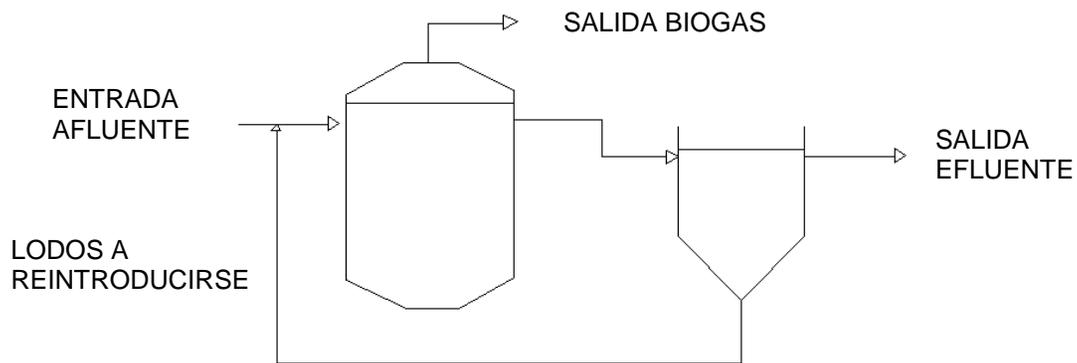
En otros casos como los digestores del tipo horizontal la agitación se logra mediante la circulación del substrato dentro de la cámara de digestión provista de una serie de tabiques (Figura 2.13).

<sup>27</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 17

El flujo puede ser también ascendente (Figura 2.14) o bien descendente (Figura 2.15), lo que dependerá de la ubicación de las cañerías de entrada y salida del substrato.<sup>28</sup>

### 3-a) Contacto Anaeróbico:

Tanto en este como en los siguientes sistemas se ha buscado algún medio para retener la mayor cantidad de bacterias activas dentro de la cámara de digestión a fin de lograr menores tiempos de retención y consecuentemente menores volúmenes de digester para tratar la misma cantidad de biomasa.



**Figura 2.16:** Biodigestor de Contacto Anaeróbico<sup>29</sup>

En estos digestores la piletta de sedimentación a la salida de los mismos le da la posibilidad a las bacterias que han salido con el efluente a asentarse y decantar para luego ser reintroducidas en forma de lodo, mezclado con material de carga como inóculo.

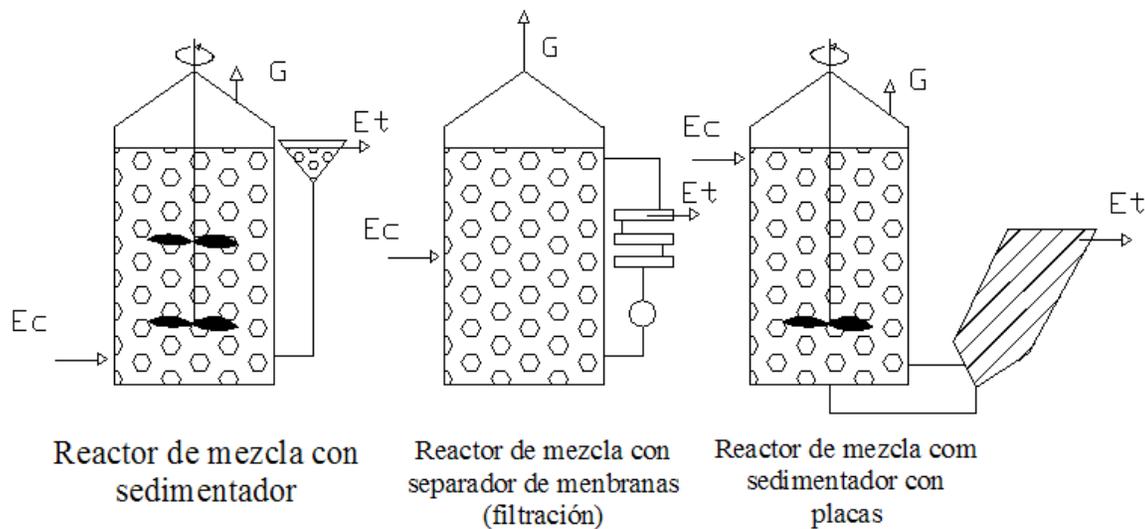
<sup>28</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 17

<sup>29</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 17

Existen también otros dos métodos para retener la masa bacteriana a la salida del reactor, como puede ser un sedimentador externo (Figura 2.17) en el cual las partículas más pesadas son recirculadas.

Otro puede ser un separador de membranas (Figura 2.18), que no hace otra cosa que filtrar las bacterias, proceso que se realiza mediante un bombeo externo del lodo de la parte inferior hacia la superior.

El tercero es una variación del primero, ya que el sedimentador es con placas (Figura 2.19).



Referencia.  $E_c$ . Entrada del efluente crudo,  $E_t$  salida del efluente tratado,  $G$ : salida del gas

**Figura 2.17:** Biodigestor de Mezcla con Sedimentador.

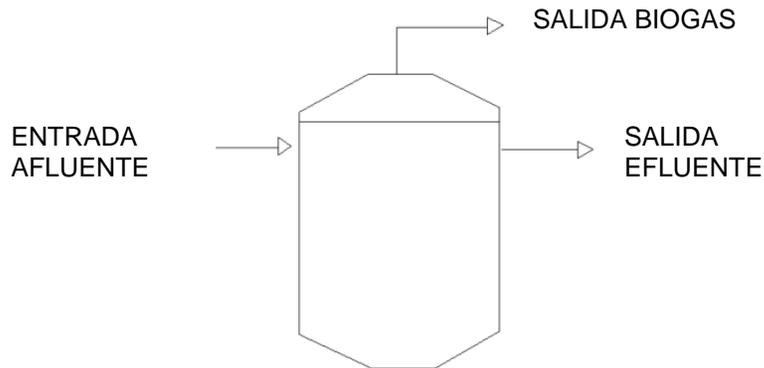
**Figura 2.18:** Biodigestor de Mezcla con Separador de membrana (Filtración).

**Figura 2.19:** Biodigestor de Mezcla con Sedimentador con Placas.<sup>30</sup>

<sup>30</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 18

### 3-b) U.A.S.B.:

En su interior posee separadores y mamparas estratégicamente ubicadas las que generan zonas de tranquilidad en las cuales las bacterias han conformado glomérulos (floculación) que sedimentan y así se evita que salgan con el efluente que es sacado por la parte superior de la cámara de carga.



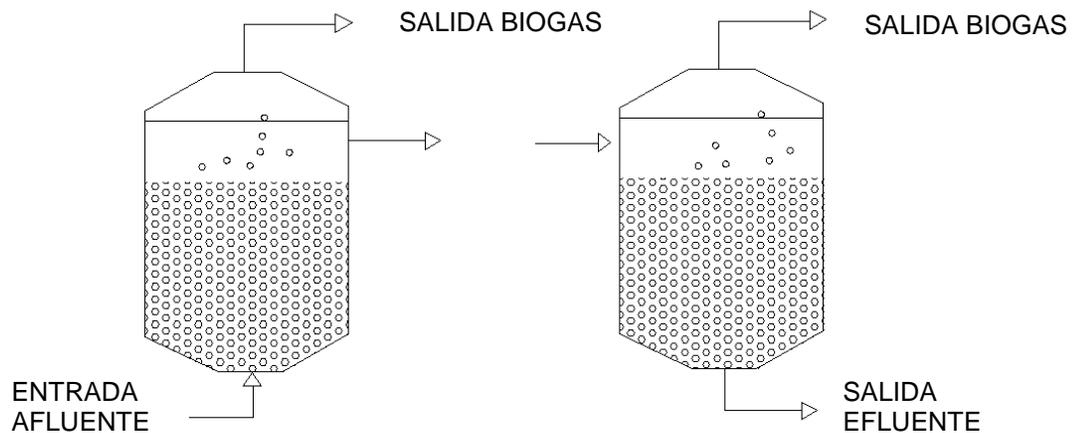
**Figura 2.20:** Biodigestor U.A.S.B. (Upflow Anaerobic Sludge Blanket).<sup>31</sup>

Este tipo de digester es especialmente apto para el tratamiento de desechos agroindustriales como la vinaza, no admite partículas insolubles.

---

<sup>31</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 18

### 3-c) Lecho Fluidizado:



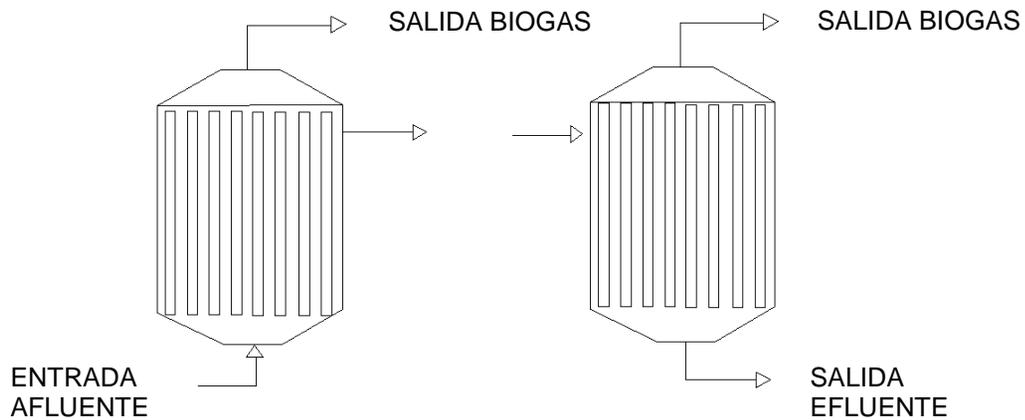
**Figura 2.21:** Biodigestor Lecho Fluidizado.

En este tipo de reactor unas pequeñas partículas se mantienen en suspensión dentro de la cámara de digestión. Las bacterias se adhieren a estas partículas, que no son atacadas y salen con ellas. Mediante el filtrado del efluente se pueden recuperar estas partículas juntamente a las bacterias y se reintroducen en el digestor. Este tipo de reactor está poco difundido y las mayores referencias son de plantas a nivel laboratorio o piloto. Los hay de flujo ascendente y descendente.

### 3-d) Filtro Anaeróbico:

Estos reactores tienen la particularidad de ser alargados (relación alto/diámetro mayor a 1), últimamente se está experimentando con filtros horizontales, pero los verticales siguen siendo más eficientes, en su interior poseen un medio fijo que puede estar constituido por cañerías reticuladas, piedra caliza, formas plásticas de gran relación superficie/volumen, etc. Sobre estos materiales no atacables se adhieren las bacterias y así se evita su pérdida, que disminuye notablemente los

tiempos de retención. Existen dos variantes: de flujo ascendente y de flujo descendente.



**Figura 2.22:** Biodigestor de Filtro Anaeróbico.<sup>32</sup>

Debido a estos elementos filtrantes ubicados dentro de la cámara de digestión, no admiten líquidos con material insoluble en suspensión ya que dichos sólidos bloquearían el pasaje del sustrato. Este tipo de digestores está difundiendo últimamente para determinados usos.

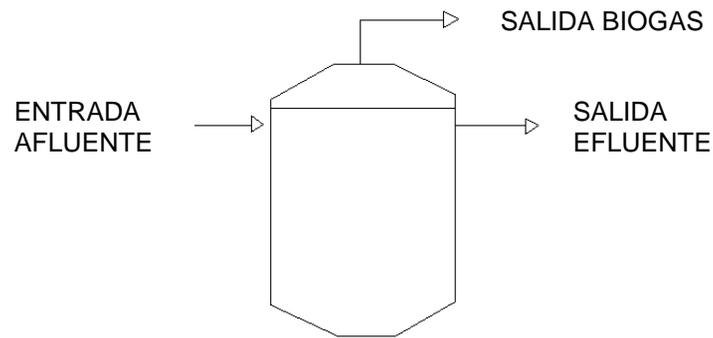
Tanto este digestor, como los dos anteriores admiten tiempos de retención muy bajos (0,5 a 3 días) con muy altos niveles de eficiencia (se han llegado a valores de producción de biogás de 7 veces el volumen del reactor por día). Existen de flujo ascendente y descendente.

---

<sup>32</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 19

#### 4-a) Una Etapa:

Todos los tipos de digestores vistos hasta este momento se agrupan en esta categoría debido a que todas las etapas de la digestión anaeróbica se cumplen en una única cámara, en la cual todas las bacterias están sometidas a las mismas condiciones.



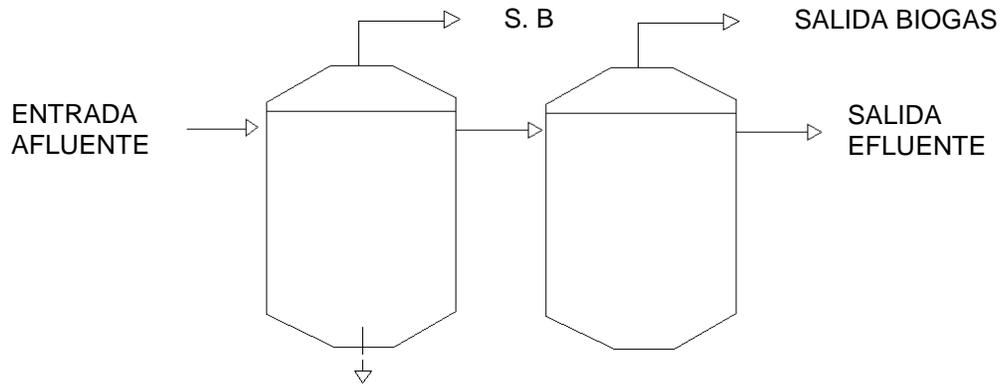
**Figura 2.23:** Biodigestor de Una Etapa.<sup>33</sup>

#### 4-b) Dos Etapas:

En estos reactores se ha dividido en dos cámaras de digestión separadas, donde en la primera se desarrolla la etapa acidogénica y en la segunda la acética y la metanogénica. Esto permite optimizar las condiciones de desarrollo de cada tipo de bacterias y extraer los sólidos indigeribles antes que pasen a la etapa metanogénica.

---

<sup>33</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 20



**Figura 2.24:** Biodigestor de Dos Etapas.<sup>34</sup>

Estos digestores no han sobrepasado la etapa experimental y de plantas piloto y aún resta solucionar una serie de problemas de funcionamiento a gran escala para llegar a una amplia difusión.

Se ha dejado intencionalmente para comentar en esta última parte los **Rellenos Sanitarios (Landfills)**, puesto que son un tratamiento anaeróbico diferente o cámara de digestión especialmente construida para tal fin, sino que sólo se hacen excavaciones las cuales serán rellenas generalmente con residuos urbanos, en su mayoría sólidos, y de los cuales no se obtendrá ningún efluente tratado, sólo quedará la porción de sólidos que no se pudo degradar y el lixiviado. El biogás puede o no recolectarse, para hacerlo será menester instalar cañerías agujereadas en lechos de piedras. Generalmente tramos horizontales dispuestos en diferentes niveles que convergen a uno vertical, que llega a la superficie exterior.

---

<sup>34</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 20

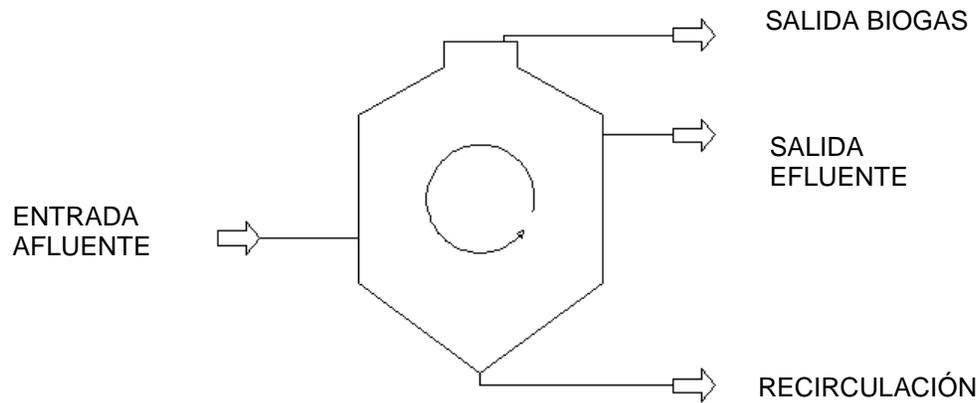
Este tratamiento es muy utilizado en Europa por los sectores municipales en el saneamiento de ciudades, con recuperación de grandes volúmenes de gas. En América Latina, Chile, Brasil y Argentina son unos de los países pioneros en aplicar con éxito este método.

### **2.2.1 Otro Tipo de Clasificación**

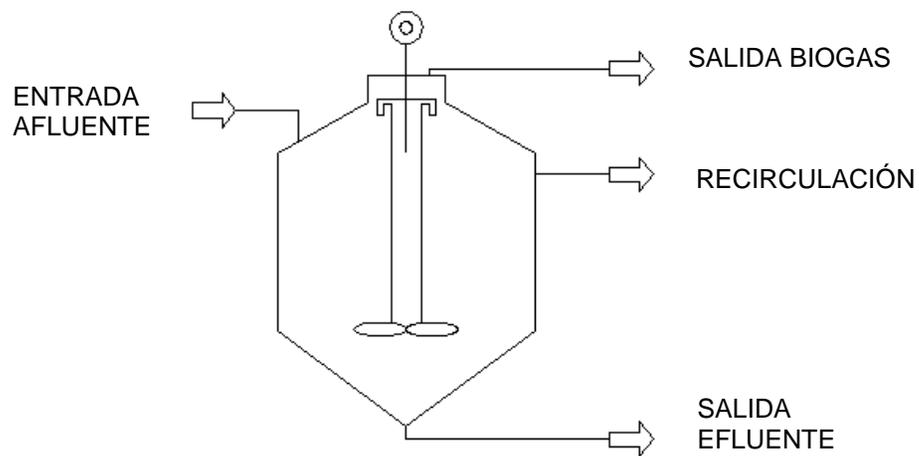
W. Baader en 1990 dentro de su publicación para la “International conference on biogas” dividió en tres sectores el campo de utilización del biogas, el Municipal (oficial), el Industrial y el Agricultor o Rural. Dentro de los cuales explicó las razones de la utilización y las distintas tecnologías aplicadas. Todo referido a su país, Alemania. Siendo éste uno de los países más avanzado en esta área se considera provechoso tomarlo como parámetro de comparación.

Dentro del sector municipal y para el tratamiento de “lodos cloacales” se están usando reactores de una etapa y de mezcla completa. En pequeña y mediana escala el líquido es mezclado hidráulicamente en combinación con un calentamiento por medio de un intercambiador de calor externo, el cuál es instalado en la cañería de recirculación; o por una inyección de biogás junto con un mecanismo interno de calentamiento (Figura 2.25). En la mayoría de los digestores a gran escala es instalado un tubo central con un rotor tipo tornillo el cual fuerza al líquido a realizar una circulación (Figura 2.26). La materia en flotación es descargada en forma discontinua por la parte superior del digestor. Todos los digestores están trabajando a temperaturas mesofílicas. Alrededor del 25% de los lodos cloacales son diseminados sobre terrenos arados; en esos el efluente debe estar libre organismos patógenos, para cumplir esta disposición en varias plantas

el lodo es tratado en un proceso aeróbico - termofílico como un paso previo al tratamiento anaeróbico



**Figura 2.25:** Biodigestor con Mecanismo Interno de Calentamiento con Intercambiador<sup>35</sup>



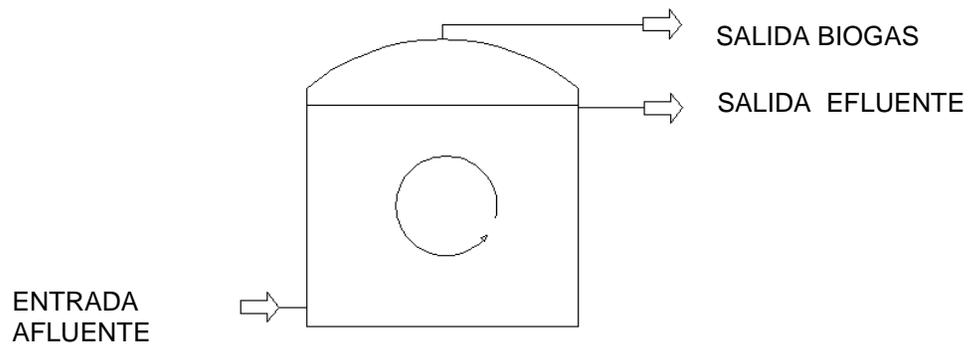
**Figura 2.26:** Biodigestor con un Rotor Tipo Tornillo<sup>36</sup>

<sup>35</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 21

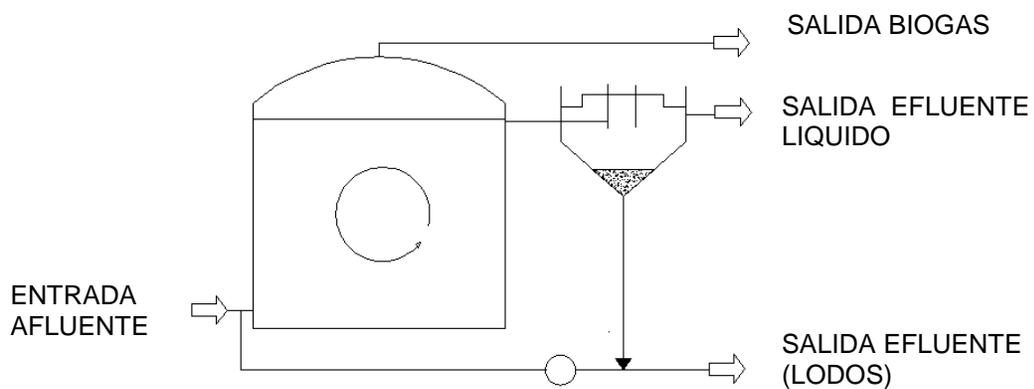
<sup>36</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 21

Desde hace años la mayoría de los digestores del sector industrial que están en funcionamiento son de mezcla completa (Figura 2.27) y sistemas de contacto anaeróbico (Figura 2.28).

La agitación en estos reactores se realiza por bombeo (hidráulicamente) o bien por inyección de gas (ver Figura 2.26).



**Figura 2.27:** Biodigestor Industrial de Mezcla Completa<sup>37</sup>

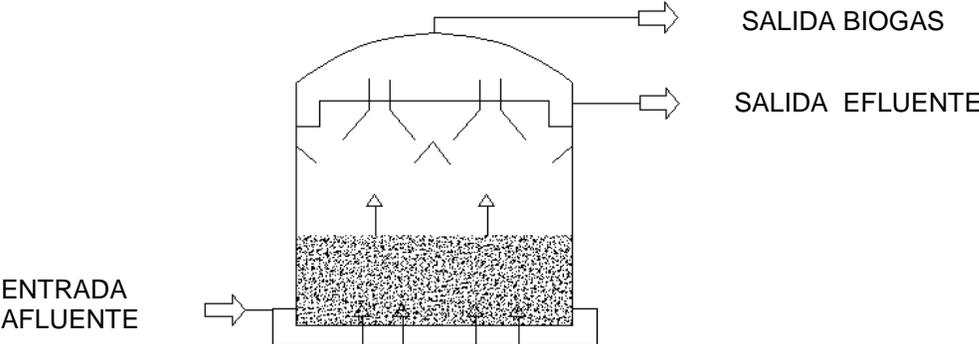


**Figura 2. 28:** Biodigestor Industrial de Mezcla Completa con Sistema de Contacto Anaeróbico<sup>38</sup>

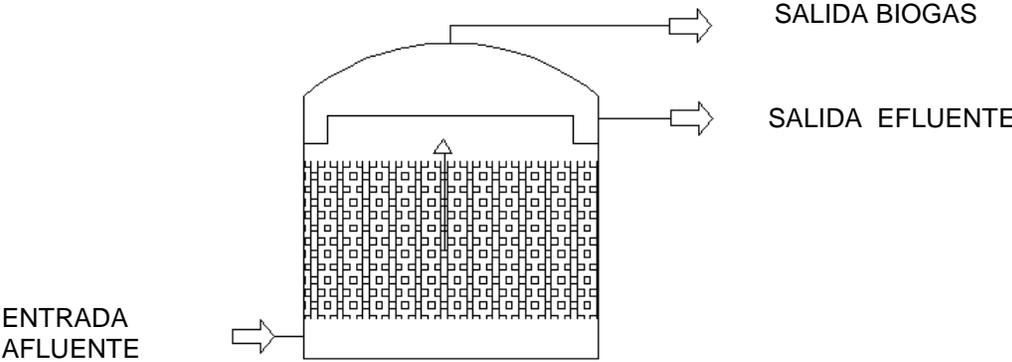
<sup>37</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 21

<sup>38</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 21

Desde 1982 ha predominado la instalación de digestores con acumulación interna de biomasa, en igual número se han instalado también los del tipo retención de biomasa, también llamados de lecho de lodos (U.A.S.B.) (Figura 2.29), y los del tipo de inmovilización de biomasa (fixed carrier) llamados filtros anaeróbicos (Figura 2.30).



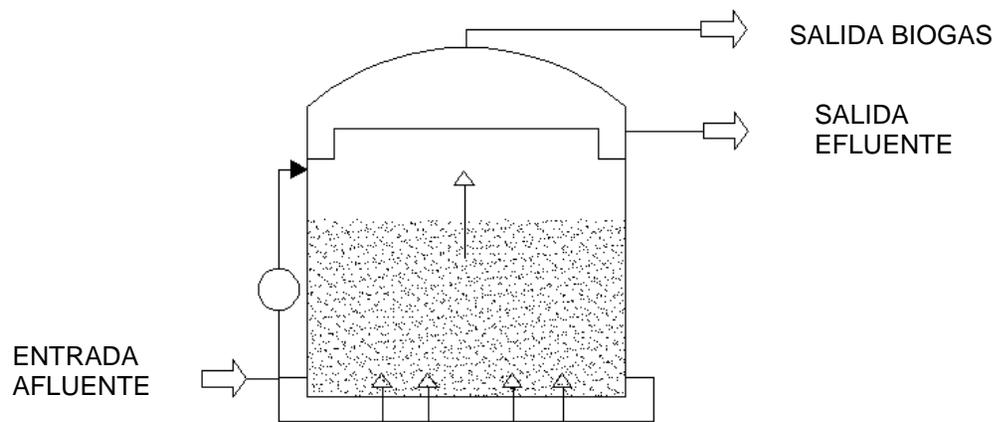
**Figura 2.29:** Biodigestor de Retención de Biomasa (U.A.S.B)<sup>39</sup>.



**Figura 2.30:** Biodigestor de Inmovilización de Biomasa (Filtros Anaeróbicos).

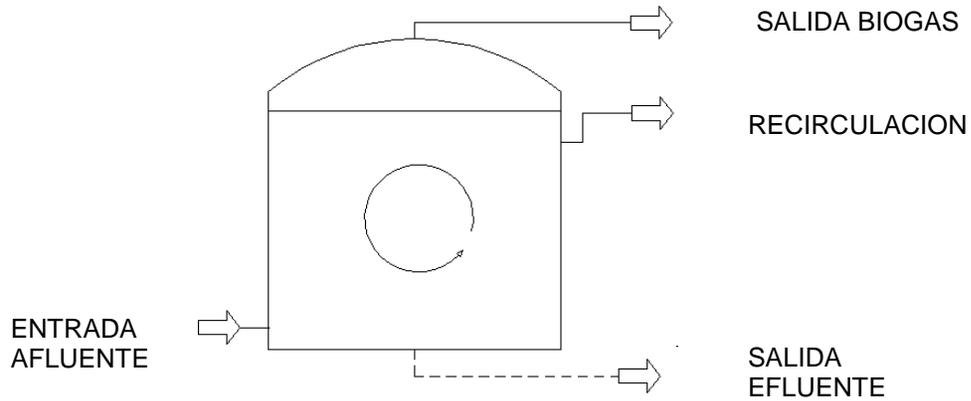
<sup>39</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 21

Diferentes materiales son usados como filtros dependiendo del sustrato y de los costos. Digestores en los cuales la biomasa es inmobilizada en filtros de lecho fluidizado (Figura 2.31) solo existen pocas plantas. En la mayoría de los casos el efluente es tratado en un proceso de dos etapas.



**Figura 2.31:** Biodigestores de Inmovilización de Biomasa en Filtros de Lecho Fluidizado.

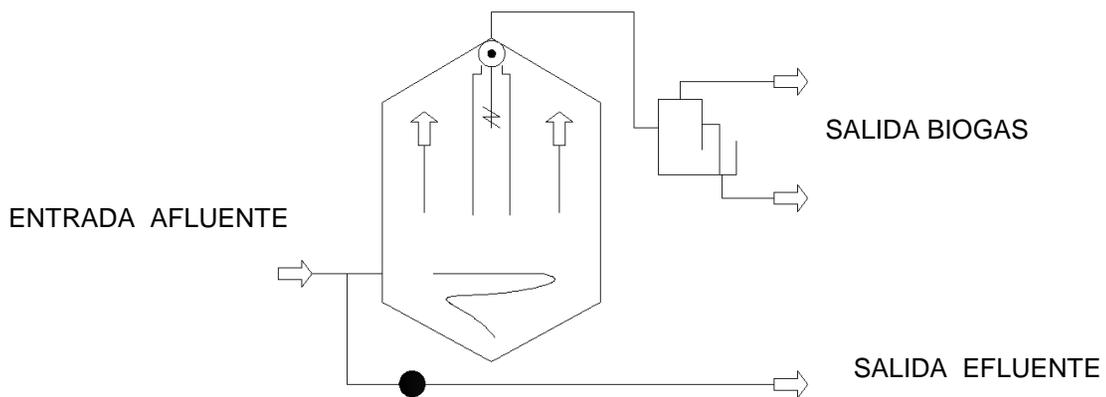
En el sector rural la mayoría de las plantas en todas las escalas son sistemas de tanques de flujo pasante con menor o mayor intensidad de mezclado. La mayoría de los digestores están equipados con un mecanismo hidráulico de mezcla el cual es accionado por una bomba instalada externamente, donde absorbe el líquido de la parte inferior del tanque y expulsado cerca del nivel superior, o por encima de él, con el fin de destruir o prevenir la formación de la perjudicial costra.



**Figura 2.32:** Biodigestor de Mezcla Completa

La mezcla completa es preferida, debido a que la misma provee una distribución uniforme de la temperatura en el digestor (Figura 2.32).

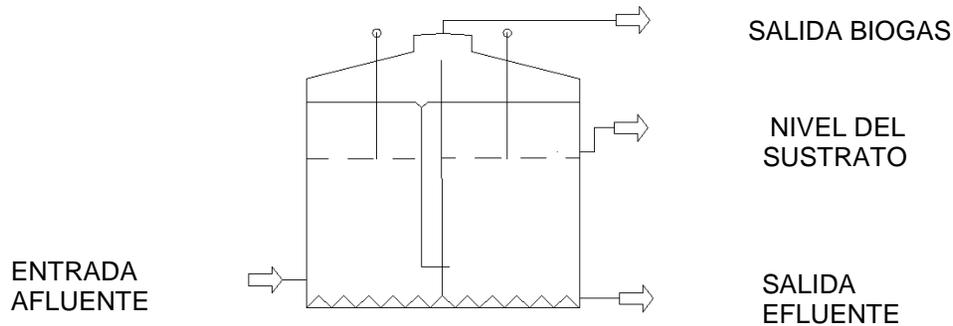
Los sistemas de agitación mecánica e inyección de gas son instalados sólo en unos pocos tanques digestores. Mientras que estos sistemas convencionales tienen una mediana eficiencia en el tratamiento de substratos conteniendo pocos o sin sólidos en suspensión; los digestores del tipo de mezcla parcial y totalmente llenos (Figura 2.33) han probado ser eficientes en el procesamiento de substratos ricos en sólidos comunes y fibrosos.



**Figura 2.33:** Biodigestores de Mezcla Parcial y Totalmente Llenos

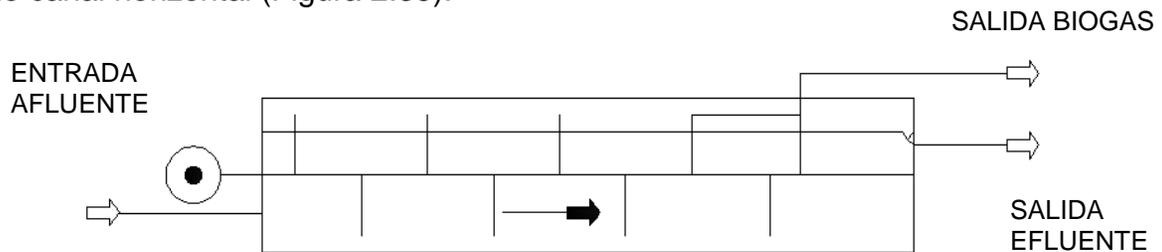
La materia es forzada a una circulación por medio de una agitación rotativa y lenta o bien por el sistema de tornillo dentro de un tubo central. De este modo la costra superficial no se producirá.

En el nuevo digestor de una etapa, Sistema FhG/SCHWARTING (Figura 2.34), el sustrato pasa a través de dos secuencias por distintos compartimientos verticales del digestor gracias a una grilla oscilante, en la cual los sólidos son retenidos, en tanto no sean degradados, por la misma grilla.



**Figura 2.34:** Nuevo Biodigestor de una Etapa

Además de los digestores del tipo tanque vertical existe un gran número del tipo de canal horizontal (Figura 2.35).



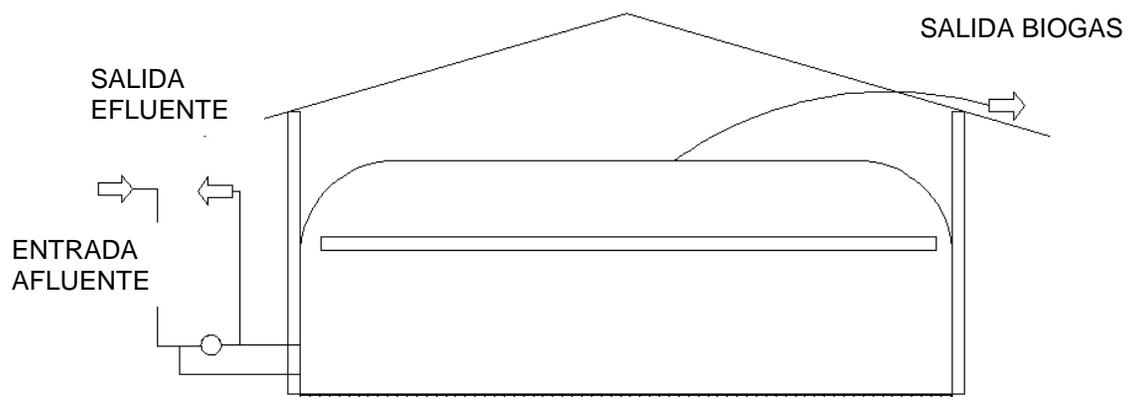
**Figura 2.35:** Biodigestor del Tipo Canal Horizontal.<sup>40</sup>

<sup>40</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 23

Equipados con paletas de movimientos lentos con el objeto de proporcionarles una agitación suave, estos digestores de una sola etapa son también apropiados para el tratamiento de substratos ricos en sólidos comunes. El volumen de los digestores instalados de este tipo es mayor a los 100 m<sup>3</sup>.

En algunas granjas, donde por razones de reglamentación en la contaminación del aire, el tanque de almacenamiento de excrementos líquidos debe estar cerrado y cubierto, ésta prevención es acompañada con una instalación adicional para transformar el sistema de almacenamiento previo en una planta de producción de biogás de bajo costo.

Los elementos principales de ésta son: una cubierta flexible del tipo globo para coleccionar el gas y una aislación flotante de poliuretano expandido (PU) la que estará ubicada por encima del nivel del líquido.



**Figura 2.36:** Biodigestor de Alimentación Discontinua con Cubierta

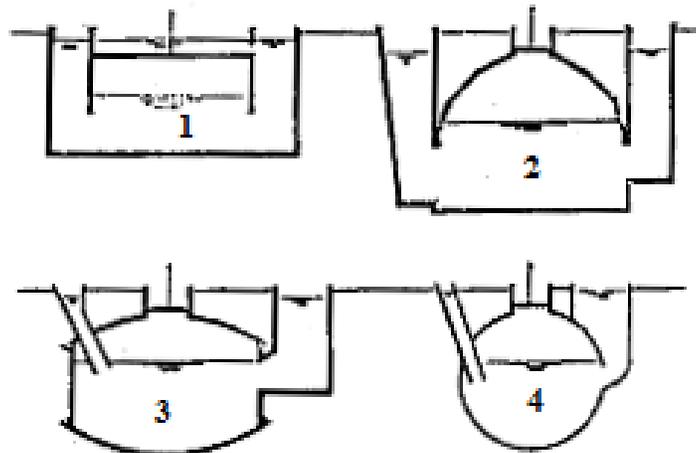
## 2.2.2 Modelos de Digestores más Difundidos

Más del 80 % de las plantas de biogás difundidas en el mundo pertenecen a dos tipos de diseño, cuyos nombres derivan de los países en los cuales se realizaron los primeros modelos y posteriormente se les dio una difusión masiva. Estos modelos son el tipo Chino e Hindú.

### 2.2.2.1 Modelo Chino

Este tipo de digestor fue concebido respetando las condiciones imperantes en su país de origen. Su diseño responde a una maximización del ahorro de material sin entrar en el cálculo de la demanda de la mano de obra.

Su forma se asemeja a una esfera (ver Figura 2.37) y el gas se almacena dentro de la campana fija a presión variable, la cual se obtiene desplazando el líquido en digestión hacia una cámara llamada de hidropresión.



**Figura 2.37:** Diferentes Modelos de Digestor Chino 1.Planta Rectangular de los Años 60; 2. Digestor de Piedra; 3. Digestor de Sichuan (Pequeño, Redondo y Achatado); 4. Digestor Esférico de Shanghai.

Estos digestores se cargan en forma semicontinua realizándose una primera carga con material celulósico y estiércol, además del inóculo correspondiente, hasta un 70% de la capacidad luego se sigue cargando como un digestor continuo; a los 120 a 180 días se descarga en forma total y se reinicia el ciclo. Fuera de China generalmente se maneja estos digestores en forma continua.

### **2.2.2.2 Modelo Hindú**

Este tipo de digestor del cual han derivado infinidad de variaciones, posee una cámara de digestión de forma cilíndrica sobre la cual flota la campana gasométrica generalmente construida en hierro (Figura 2.38). La salida del efluente se efectúa por rebalse.

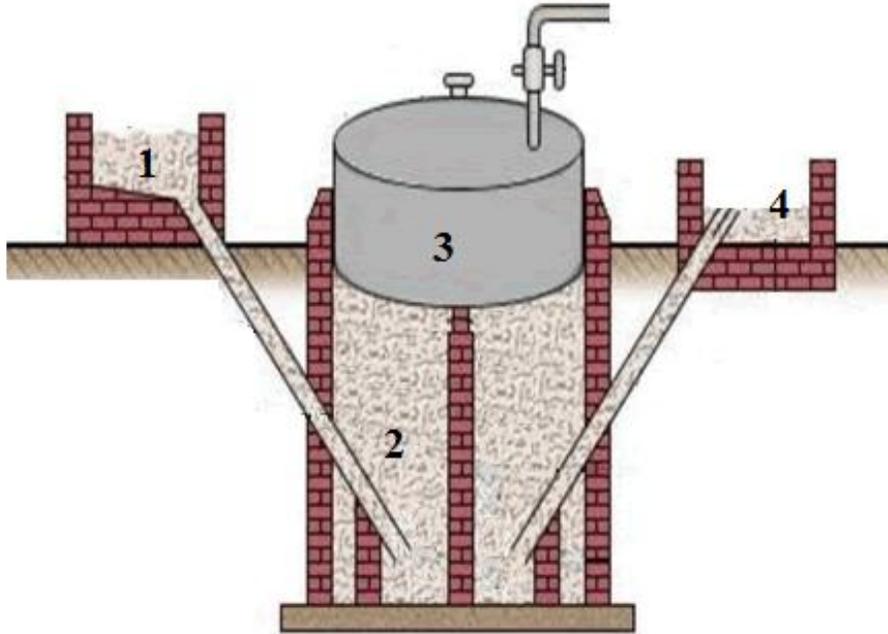
Este digestor funciona en forma continua realizándose por lo general una carga diaria o cada dos o tres días. El vaciado completo sólo se realiza en el caso de requerir alguna reparación o limpieza.<sup>41</sup>

El gas gracias al gasómetro flotante se almacena a presión constante y volumen variable. Esta presión de salida puede ser incrementada con la adición de contrapesos.

Este digestor demanda un mayor gasto de materiales y la campana gasométrica es generalmente lo más caro del equipo. Su funcionamiento es muy sencillo y no presenta serios inconvenientes en el área rural.

---

<sup>41</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 25



**Figura 2.38:** Digestor Hindú Típico. 1. Cámara de Carga; 2. Cámara de Digestión; 3. Campana Gasométrica; 4 Salida del Efluente.

### 2.3. COMPONENTES DEL SISTEMA

La selección de los materiales de construcción tiene una gran importancia y por lo tanto deben satisfacer los siguientes requerimientos:

- Resistencia a los esfuerzos de origen mecánico y térmico.
- Resistencia al ataque químico.
- Posibilidad de ser moldeado y/o construido localmente.
- Disponibilidad local.
- Compatibilidad ambiental.

Las características físicas de los materiales son fácilmente calculables no así los aspectos de disponibilidad y de posibilidad de operar con ellos pues varía según el

país o región. Por este motivo se deberá realizar un análisis particular para cada caso antes de tomar una determinación definitiva.

Este último punto es de decisiva importancia debido a que la construcción y reparación deberán ser realizadas por gente idónea de la zona.

### **2.3.1 Sistema de Acarreo o Alimentación:**

Deben ser tales que aseguren una provisión de materia prima en forma rápida evitando su descomposición aeróbica y la pérdida de su temperatura (efluentes industriales). De este modo se tendrá un material con su pleno potencial.

### **2.3.2 Cámaras de Carga:**

El sustrato generalmente se almacena en una cámara de carga antes de su ingreso. Dependiendo del digestor esta cámara deberá ser capaz de almacenar un volumen equivalente a dos días de carga.

Estará provisto de un sistema de alimentación de agua para realizar las diluciones del material y algún mecanismo o instrumento de agitación para homogeneizar la carga.

### **2.3.3 Conductos, Canales:**

Podemos diferenciar claramente la existencia de dos fluidos muy distintos en el proceso anaeróbico, a saber el biogás (gaseoso) y el sustrato (semi líquido); antes, durante y después de la digestión.

### 2.3.3.1 Manejo del Sustrato

Este involucra la recolección y transporte de la materia orgánica a digerir, la alimentación del sistema de fermentación y el vaciado del digestor. En la (Figura 2.39) se puede ver un diagrama de flujo del sustrato, donde se pueden apreciar las diferentes etapas.

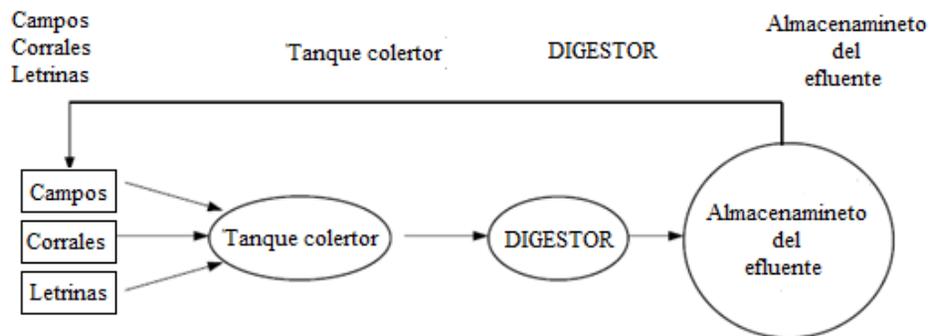


Figura 2.39: Diagrama de Flujo del Sustrato<sup>42</sup>

Dependiendo del tipo de sistema usado, alguna o todas las etapas serán efectuadas en forma continua o intermitente pudiendo ser estas ejecutadas en forma manual o bien automáticamente. Los requerimientos para el manejo y transporte del sustrato varían de acuerdo a la naturaleza del mismo y a la clase del proceso utilizado.

Independientemente del sistema usado, se deberá siempre tener cuidado que la alimentación se realice en el menor tiempo posible, puesto que en dicho intervalo disminuirá la producción de biogás, como consecuencia de una incipiente

<sup>42</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 26

descomposición aeróbica; particularmente en el caso de los sistemas calefaccionados, donde las pérdidas de calor deben ser reducidas al máximo.

### **2.3.3.1.1 Sistemas de Transporte**

Las propiedades físicas del sustrato fresco son raramente comparables a las del agua, en otras palabras los fluidos involucrados son No Newtonianos. Los líquidos residuales de las granjas, tienen sus propias reglas sobre las propiedades del fluido, las cuales no son calculadas por fórmulas establecidas.

La selección y/o diseño del equipo de transporte se fundamenten en los siguientes parámetros:

- viscosidad
- tipo, tamaño y proporción de sólidos
- contenido de sólidos totales
- proporción de agua pura
- caudales requeridos

El esfuerzo y dinero que serán dispuestos para el sistema de transporte, como las propiedades del flujo del sustrato en el alcantarillado y la cañería, dependerán de la consistencia y el contenido de fibras del sustrato y del caudal de salida requerido. Este último es producto de la altura manométrica a vencer y la sumatoria de las pérdidas producidas por fricción. Estas pueden ser estimadas para curvas, té, y válvulas como las pérdidas producidas en un caño de 5 m de longitud del mismo diámetro del accesorio considerado. Es recomendable evitar la instalación de codos de 90°.

Las pérdidas de carga también dependen del caudal y pueden ser obtenidas de la Figura 2.40. Los valores del estiércol líquido son naturalmente mayores que los del agua.

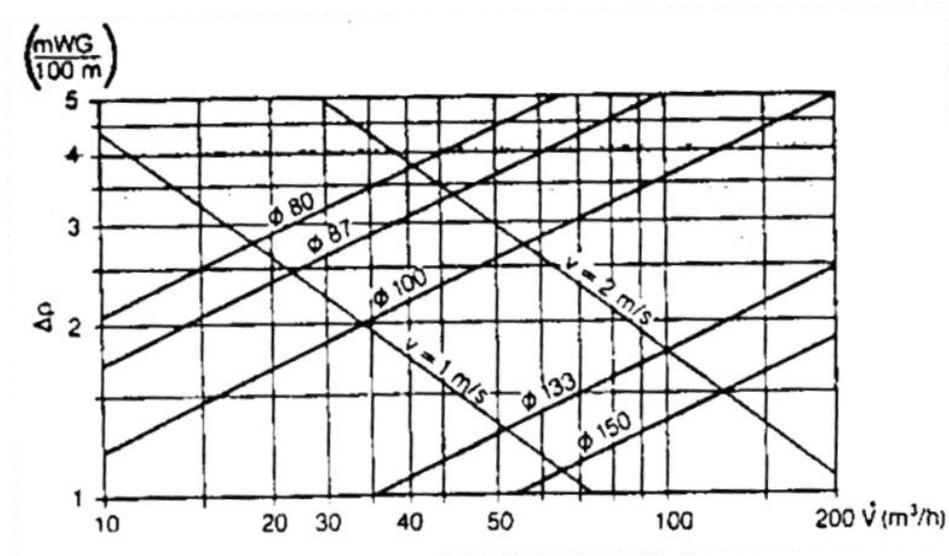


Figura 2.40: Pérdidas del Caudal en Tuberías<sup>43</sup>

A modo de ejemplo, se presenta la tabla para calcular las pérdidas por rozamiento, conociendo el caudal o velocidad del fluido y el diámetro de la cañería.

La Figura 2.40 está referida para estiércol porcino líquido con un 7% de S.T.

### 2.3.4 Cámara de Digestión

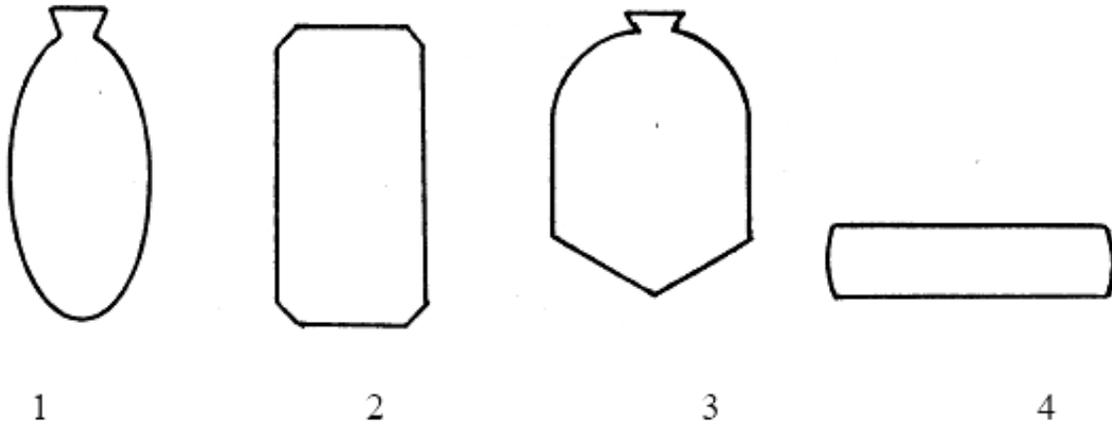
No importa cuál sea el sistema a utilizar, la cámara de digestión deberá cumplir los siguientes requisitos:

<sup>43</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 26

- Impermeable al agua y al gas para evitar las pérdidas del líquido en digestión, con el consecuente peligro de contaminación; y la pérdida de gas que disminuirá la eficiencia y provocaría el riesgo de explosiones en las cercanías del digestor.
- Aislante, las pérdidas de calor deben ser evitadas al máximo, puesto que el mantenimiento de la temperatura de digestión es logrado con el aporte de calor externo y por lo tanto todo ahorro en este sentido redundará en una mayor cantidad de energía neta disponible. Este aspecto es particularmente importante para los digestores que trabajan a temperaturas meso y termofílicas.
- Mínima relación superficie/volumen, a fin de ahorrar material y mano de obra, como así también reducir la superficie de intercambio de calor.
- Estabilidad estructural, capaz de soportar cargas estáticas y dinámicas; incluyendo un cuidadoso estudio del suelo, especialmente en los que serán construidos bajo tierra, donde se pueda afectar alguna capa freática.

Los formatos son muy variables pero existen cinco formas básicas de las cuales derivan todo el resto (Figura 2.41). Cada una de las cuales tiene ventajas y desventajas, como por ejemplo los digestores del tipo horizontal se adaptan mejor a las zonas con algún tipo de impedimento en el subsuelo. Con respecto a la producción de gas no existen hasta el momento evidencias de peso que hayan demostrado que la forma de la cámara de carga tenga importancia en la producción de gas, sin embargo los digestores de última generación, de mayores

rendimientos, son propensos a las formas de cilindros o paralelepípedos verticales.



**Figura 2.41:** Formas de Digestores. 1 Ovoide; 2 Cilindro o Paralelepípedo Vertical; 3 Domo; 4 Cilindro o Paralelepípedo Horizontal.

Los materiales de construcción más usualmente empleados son el hierro, cemento armado, mampostería (ladrillos y cemento), plásticos (OVC, PU, PRFV) y la madera en contadas ocasiones. La elección dependerá fundamentalmente de los factores costo y disponibilidad.

La cámara de agitación debe estar provista de un mecanismo de agitación; éste puede ser muy variado.

Básicamente existen tres tipos: Los mecánicos (palas, hélices, tornillos sinfín), bombas de recirculación, inyectores de gas y circulación natural por desplazamiento de líquido interno, como se vio anteriormente.

### **2.3.5 Almacenamiento del Efluente**

El dimensionamiento y diseño de la cámara de descarga dependerá fundamentalmente del uso que se le dará al efluente. Como mínimo deberá tener un volumen 2 a 3 veces superior al de descarga diaria.

### **2.3.6 Almacenamiento del Biogás**

La producción de gas de un digestor anaeróbico es continua a lo largo de las 24 horas del día; no ocurre lo mismo con el consumo que por lo general está concentrado en una fracción corta de tiempo. Por este motivo será necesario almacenar el gas producido durante las horas en que no se consuma.

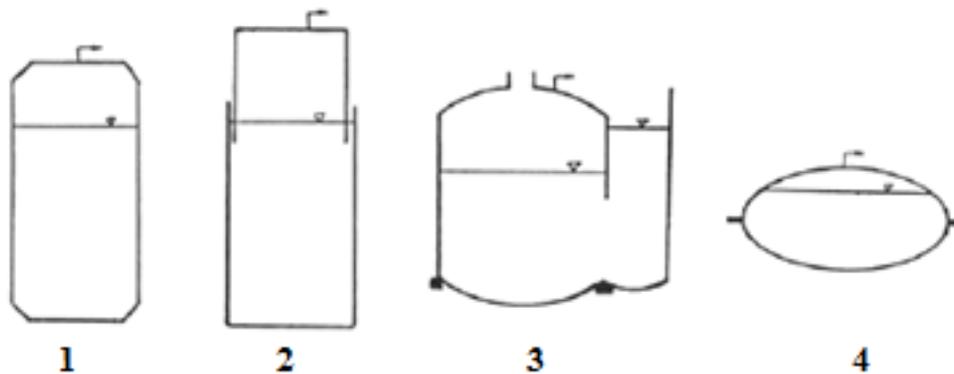
La dispersión del consumo y su intensidad determinará el volumen de almacenamiento requerido. Por lo tanto cuanto más concentrado esté el consumo en un período de tiempo corto, mayor será la necesidad de almacenaje. Por lo general el volumen de almacenamiento no baja del 50% de la producción diaria.

El contenido de energía de 1 m<sup>3</sup> de biogás (60% CH<sub>4</sub> y 40% CO<sub>2</sub>) es aproximadamente 6 kWh/m<sup>3</sup>. Esta energía puede ser almacenada en diferentes formas (gas a baja presión, media o alta), agua caliente o energía eléctrica.

Debido a que el gas en si mismo constituye la forma más directa de energía se debe intentar almacenarlo: para ello existen varias formas posibles.

La forma más simple es almacenar el gas tal cual se obtiene, a baja presión, para ello se utiliza generalmente gasómetros. Las posibilidades están representadas en la Figura 2.42 y son básicamente cuatro. Los digestores totalmente cerrados almacenan el gas a presión constante y presión variable. Su capacidad es reducida y son muy poco usados. Los digestores con campana gasométrica que

puede flotar sobre el líquido en fermentación o estar separado del digestor flotando sobre agua formando un sello hidráulico, muy usado en los reactores del tipo Hindú: en este caso el gas se almacena a presión constante (la que se puede variar colocando contrapesos sobre la campana) y a volumen variable. El tercer tipo posee una cúpula fija y una cámara de hidropresión que permite el desplazamiento del sustrato en fermentación a medida que se acumula el gas, este sistema es muy empleado en los digestores de tipo Chino; en este caso el gas se almacena a volumen y a presión variables. Por último se han difundido en años recientes almacenadores de gas del tipo gasómetro plástico inflable. Este contenedor plástico puede cubrir el digestor en su parte superior como una campana o estar separado, almacenando a presión constante y volumen variable. En este tipo también se puede variar la presión de la misma forma que en el de campana gasométrica.



**Figura 2.42:** Diferentes Formas de Gasómetros para Almacenaje del Biogás  
 1. Digestor Cerrado; 2. Gasómetro Flotante; 3. Campana Fija; 4 Balón Plástico.<sup>44</sup>

<sup>44</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 32

Todos los sistemas descritos no superan como presiones máximas los 100 cm de C.A. encontrándose la media alrededor de los 35, presión a la cual funcionan correctamente los artefactos domésticos.

A fin de reducir el volumen de almacenaje necesario se puede comprimir el gas y almacenarlo a presiones medias (0,5 a 1,5 bar) y altas hasta 300 bar. Este tipo de almacenamiento demanda un gasto extra de energía para comprimir el gas y además se lo debe purificar extrayendo el vapor de agua, el dióxido de carbono y el ácido sulfhídrico. Los contenedores de gas para estas presiones, cilindros en general, son caros debido a que deben tener la suficiente rigidez estructural para poder soportar los esfuerzos a los que se ve sometido.

El almacenaje a estas presiones se utiliza generalmente cuando se emplea el gas, como combustible de vehículos, donde el volumen ocupado es importante.

La energía también se puede almacenar en forma de calor, calentando agua la que se mantiene en un recipiente aislado hasta el momento de su utilización. Uno de los usos, como vimos puede ser el de calentar y mantener la temperatura interna del digestor, además de los otros usos que se le quiera dar.

Gracias a la gran capacidad calórica del agua se puede obtener una alta densidad energética, por ejemplo con una diferencia de temperatura de 20 a 40°C se puede obtener una densidad 4 veces mayor a la del gas (23 a 46 kWh/m<sup>3</sup>).

## 2.4. CAMPOS DE APLICACION DE LOS PRODUCTOS DEL SISTEMA

### 2.4.1 El Biogás

#### 2.4.1.1 Composición y Características

Se llama biogás a la mezcla constituida por metano CH<sub>4</sub> en una proporción que oscila entre un 50% a un 70% y dióxido de carbono conteniendo pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno. Sus características han sido resumidas en la Tabla 2.8.

**Tabla 2.8** Composición y Características del Metano con Otros Gases <sup>45</sup>

CARACTERISTICAS	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> S	Otros	Biogás 60/40
Proporciones % Volumen	55-70	27-44	1	3	100
Valor Calorífico MJ/m <sup>3</sup>	35.8	--	10.8	22	21.5
kCal/m <sup>3</sup>	8600	--	2581	5258	51.40
Ignición % en aire	5-15	--	--	--	6-12
Temp. Ignición en °C	650-750	--	--	--	650-750
Presión crítica en Mpa	4.7	7.5	1.2	8.9	7.5-8.9
Densidad nominal en g/l	0.7	1.9	0.08	--	1.2
Densidad relativa	0.55	2.5	0.07	1.2	0.83
Inflamabilidad Vol. En % aire	5-15	---	--	--	6-12

<sup>45</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 34

### 2.4.1.2 Usos

En principio el biogás puede ser utilizado en cualquier tipo de equipo comercial para uso de gas natural, en la Figura 2.43 resume las posibles aplicaciones.

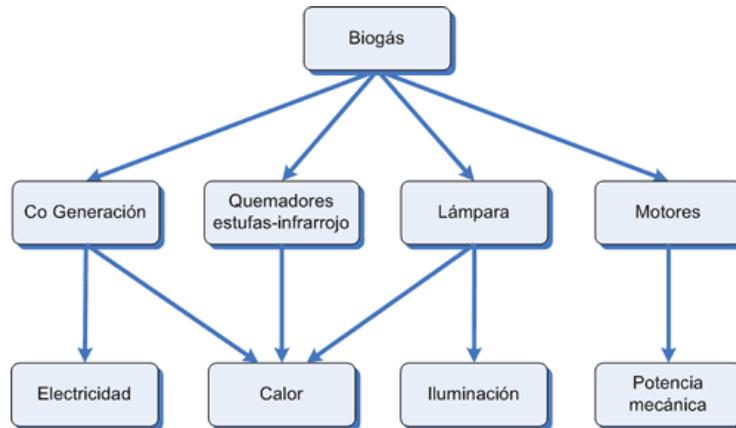


Figura 2.43: Posibles Aplicaciones del Biogás <sup>46</sup>

### 2.4.1.3 Principios de la Combustión

El biogás mezclado con aire puede ser quemado en un amplio espectro de artefactos descomponiéndose principalmente en CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. La combustión completa sin el exceso de aire y con oxígeno puro, puede ser representada por las siguientes ecuaciones químicas



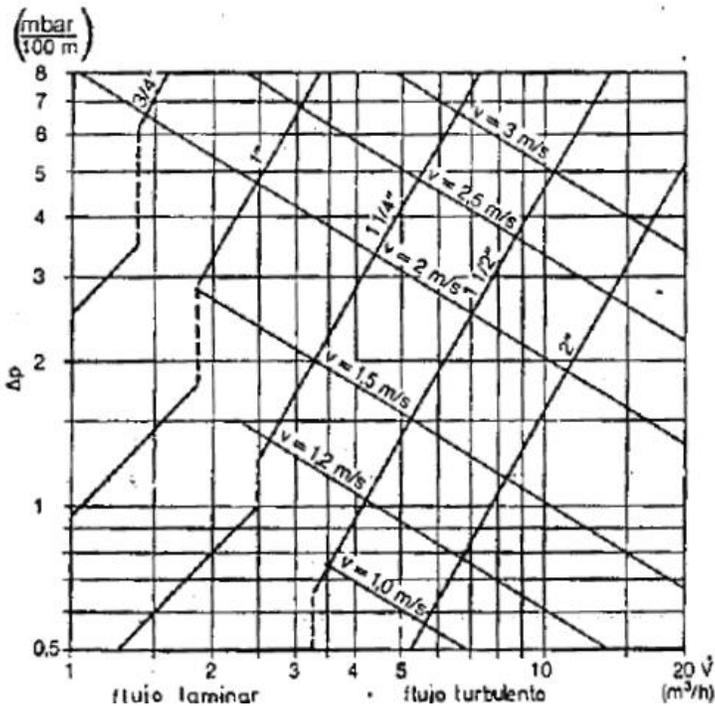
El requerimiento de aire mínimo sería del 21% pero esta cifra debe ser aumentada para lograr una buena combustión.

<sup>46</sup> <http://www.textoscientificos.com/energia/biogas/factores>

La relación aire-gas puede ser ajustada aumentando la presión del aire, incrementando la apertura de la válvula dosificadora de gas (el biogás requiere de una apertura 2 a 3 veces mayor a la utilizada por el metano puro y modificando la geometría del paso de aire desde el exterior).

Debido al contenido de dióxido de carbono, el biogás tiene una velocidad de propagación de la llama lenta, 43 cm/seg y por lo tanto la llama tiende a escaparse de los quemadores.

La presión para un correcto uso del gas oscila entre los 7 y los 20 mbar. Se debe tener especial cuidado en este aspecto debido a que se deberán calcular las pérdidas de presión de salida del gasómetro (adicionándole contrapesos en el caso de gasómetros flotantes). Para dicho cálculo se adjunta la Figura 2.44.



**Figura 2.44:** Pérdidas de Presión a la Salida del Gasómetro <sup>47</sup>

<sup>47</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 35

#### 2.4.1.4 Diferentes Aplicaciones

En la Tabla 2.9 se han listado los principales artefactos que utilizan biogás juntamente a su consumo medio y su eficiencia.

**Tabla 2.9** Consumo y Eficiencia de Artefactos que Utilizan Biogás.<sup>48</sup>

ARTEFACTO	CONSUMO	RENDIMIENTO (%)
Quemador de cocina	300 – 600 l/h	50 – 60
Lámpara a mantilla (60W)	120 – 170 l/h	30 – 50
Heladería de 100 L	-30 -75 l/h	20 – 30
Motor a gas	0.5 m <sup>3</sup> /Kwh o Hph	25 – 30
Quemador de 10 kW	2 m <sup>3</sup> /h	80 – 90
Infrarrojo de 220 W	30 l/h	95 – 99
Congelador	1kW elect. 0.5 m/kwh: :2kW térmica	hasta 90

Las cocinas y calentadores son fácilmente modificables, agrandando el paso del gas de los quemadores. La amplia disponibilidad de este tipo de equipos hace promisorio e interesante su utilización a gran escala.

Las lámparas a gas tienen una muy baja eficiencia y el ambiente donde se las utilice debe estar adecuadamente ventilado para disipar el calor que generan.

Las heladeras domésticas constituyen un interesante campo de aplicación directo del biogás debido a que tienen un consumo parejo y distribuido a lo largo de las 24 horas del día lo cual minimiza la necesidad de almacenaje del gas. Estos equipos funcionan bajo el principio de la absorción (generalmente de ciclo amoníaco refrigerante - agua absorbente). Recientemente se han desarrollado equipos para el enfriamiento de leche y/u otros productos agrícolas lo que abre un importante campo de aplicación directa y rentable del mismo.

<sup>48</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 35

Los quemadores infrarrojos comúnmente utilizados en la calefacción de ambientes (especialmente en criadores y parideras) presentan como ventaja su alta eficiencia lo cual minimiza el consumo de gas para un determinado requerimiento térmico.

El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto nafteros como diesel. El gas obtenido por fermentación tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110 lo cual lo hace muy adecuado para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión, por otro lado una desventaja es su baja velocidad de encendido.

En los motores de Ciclo Otto el carburador convencional es reemplazado por un mezclador de gases. Estos motores son arrancados con nafta y luego siguen funcionando con un 100% de biogás con una merma de la potencia máxima del 20% al 30%.

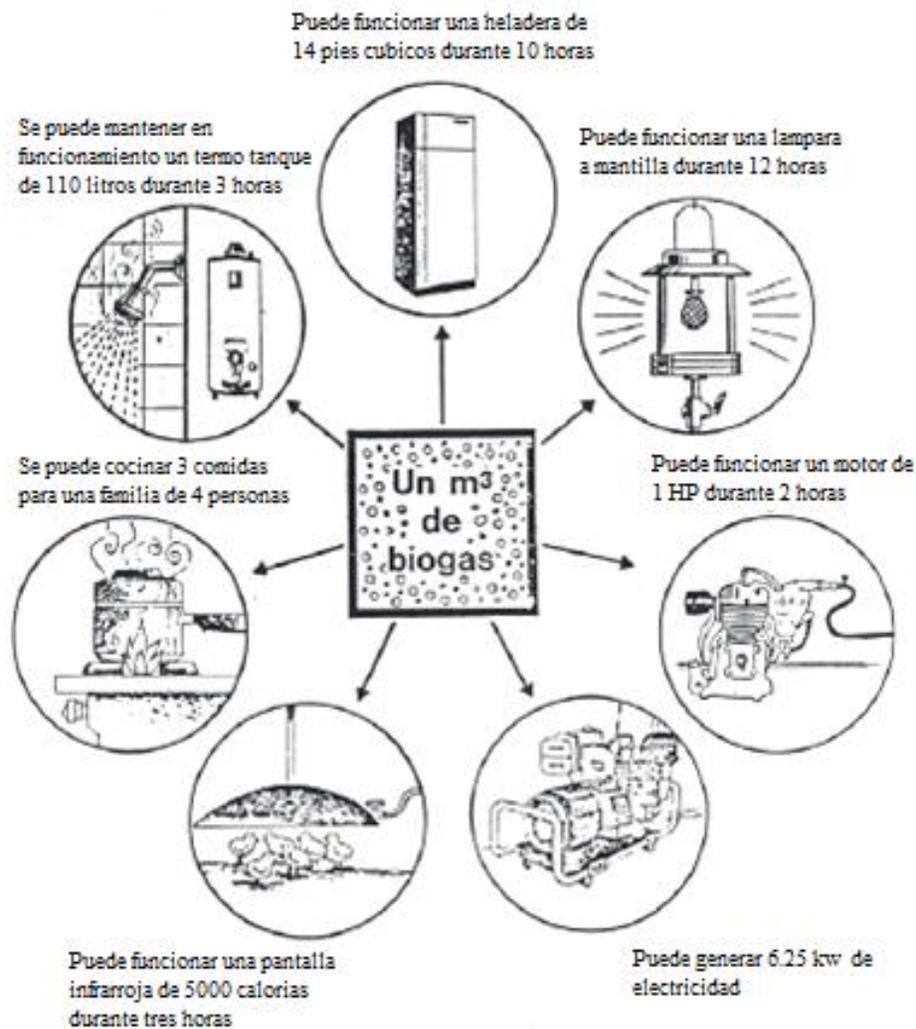
A los motores de Ciclo Diesel se les agrega un mezclador de gases con un sistema de control manteniendo el sistema de inyección convencional. De esta manera estos motores pueden funcionar con distintas proporciones de biogás diesel y pueden convertirse fácil y rápidamente de un combustible a otro lo cual los hace muy confiables.

El gasoil no puede ser reemplazado en los motores funcionando a campo del 85% al 90%, debido a que la autonomía conseguida menor comparada con la original.

La proporción de  $H_2S$  en el biogás causa deterioros en las válvulas de admisión y de escape de determinados motores obligando a un cambio más frecuente de los aceites lubricantes. El grado de deterioro en los motores varía considerablemente y los resultados obtenidos experimentalmente suelen ser contradictorios.

Los motores a biogás tienen amplio espectro de aplicación siendo los más usuales el bombeo de agua, el picado de raciones y el funcionamiento de ordeñadoras en el área rural. El otro uso muy generalizado es su empleo para activar generadores de electricidad.

En la (Figura. 2.45), se muestran distintas alternativas de utilización de un metro cúbico de biogás, con sus respectivos consumos.



**Figura 2.45:** Distintas Alternativas de Utilización de 1 m<sup>3</sup> de Biogás.<sup>49</sup>

<sup>49</sup> <http://es.wikipedia.org/wiki/Biodigestor>

El uso vehicular del biogás es posible y en la realidad se ha empleado desde hace bastante tiempo. Sin embargo su difusión está limitada por una serie de problemas:

A fin de permitir una autonomía razonable el gas por su volumen debe ser almacenado en contenedores cilíndricos de alta presión (200 a 300 bar); este tipo de almacenamiento implica que el mismo deba ser purificado antes de su compresión.

La conversión de los motores es cara (instalación similar a la del GNC) y el peso de los cilindros disminuye la capacidad de carga de los vehículos.

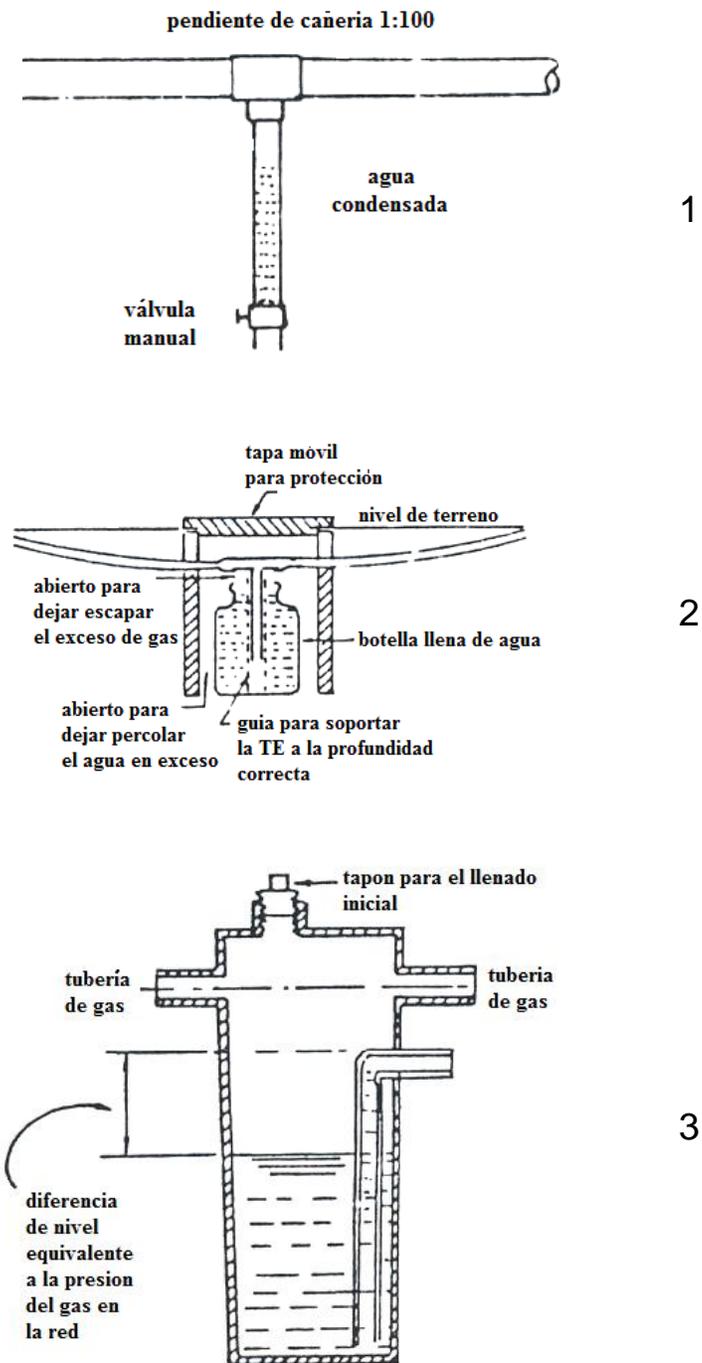
Por último la falta de una adecuada red de abastecimiento y la energía involucrada en la compresión a gran escala de este tipo de uso.

Problemas que están tomando relativa importancia debido a lo avanzado en la difusión de la tecnología del G.N.C.

#### **2.4.1.5 Acondicionamiento del Biogás**

El gas tal cual sale del digestor debe ser acondicionado a fin de asegurar un permanente y buen funcionamiento de los equipos que se alimentan de él. A pesar de que alguno de estos acondicionamientos no son necesarios en todos los casos, otros como el drenaje del agua de condensación deberá realizarse siempre.

### 2.4.1.5.1 Secado, drenaje



**Figura 2.46:** Tipos de Drenaje: 1) Simple Tipo "T"; 2) Automático Subterráneo; 3) Automático Tipo "Sifón"<sup>50</sup>

<sup>50</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 39

El biogás que sale del digestor está saturado de vapor de agua, a medida que se enfría el vapor se condensa en las cañerías y si no se lo evacua adecuadamente pueden bloquearse los conductos con agua. Por esta razón las cañerías de distribución deben ser instaladas con una pendiente mínima del 1% hacia un recipiente denominado trampa de agua donde ésta se almacena y se extrae. Existen diversos tipos de trampas de agua tanto manuales como automáticas (Figura 2.46), que son las recomendadas porque requieren de un mínimo mantenimiento.

#### **2.4.1.5.2 Eliminación del CO<sub>2</sub>**

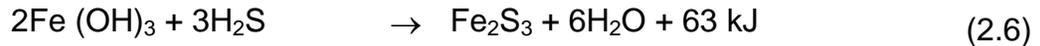
El dióxido de carbono no tiene ningún poder calorífico y debe ser calentado en la combustión. Su eliminación no es aconsejable salvo en los casos de almacenaje del biogás a altas presiones debido a que sería inútil gastar energía de compresión y volumen de almacenaje de alto costo en un gas que no daría ningún beneficio adicional.

Se utilizan varios sistemas entre los cuales los más difundidos son los que emplean su disolución en agua a presión y otros que usan mezclas químicas de gran complejidad.

#### **2.4.1.5.3 Eliminación del H<sub>2</sub>S**

Determinados equipos requieren que el gas a utilizar se encuentre libre de SO<sub>2</sub>, debido a que el mismo combinado con el agua da como resultado ácido sulfhídrico que corroe las partes vitales de algunas instalaciones. El método más utilizado es hacer pasar el gas por un filtro que contiene hidróxido de hierro. El H<sub>2</sub>S del gas se

combina con el hierro formando sulfuro de hierro según la fórmula descrita más abajo. Esta reacción es reversible y el hidróxido de hierro puede ser regenerado exponiendo el sulfuro al aire con cuidado debido a que la reacción es exotérmica, liberando 603 kJ.

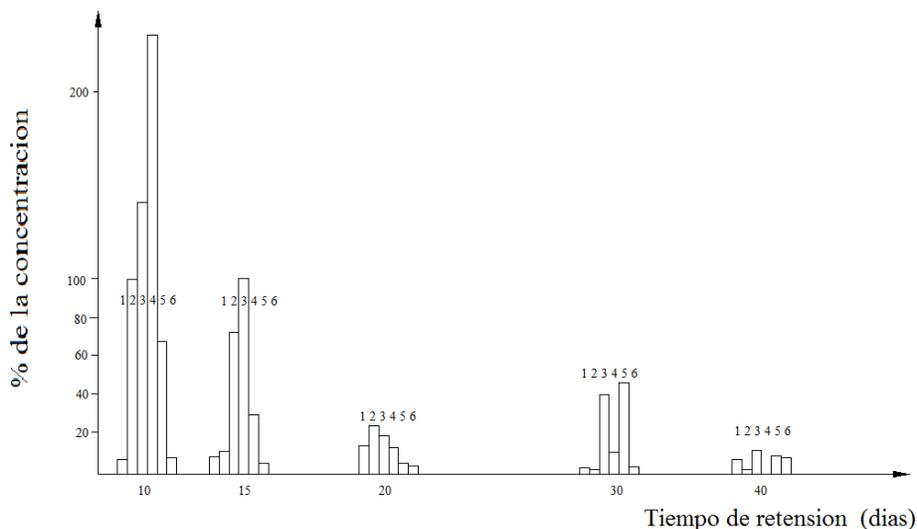


## 2.4.2 El Efluente

### 2.4.2.1 Características

El proceso fermentativo y de producción de biogás no extrae más que carbono, trazas de azufre, hidrógeno y algo de nitrógeno por reducción de  $\text{NH}_3$ . Para una alimentación media de 50 kg/día y una producción diaria de 1 m<sup>3</sup> de gas la masa se reducirá solamente en un 2%. La viscosidad del efluente se ve reducida drásticamente debido a la transformación de los sólidos volátiles (un 50% de los mismos son reducidos en un digestor en régimen). Esto hace al efluente mucho más manejable para su utilización.

El efluente carece prácticamente de olor debido a que las sustancias provocadoras del mal olor son reducidas casi en su totalidad en función al tiempo de retención tal como puede apreciarse en la Figura 2.47. La relación Carbono/Nitrógeno se ve reducida mejorando en forma general el efecto fertilizante del efluente.



**Figura 2.47:** Reducción de las Sustancias Provocadoras de Mal Olor:<sup>51</sup>  
 1 Fenol; 2 P-Cresol; 3 Etil-Fenol; 4 Indol; 5 Skatol; 6 Acido Acético.

La Tabla 2.10 da los valores aproximados de la composición en los principales macronutrientes pero se debe tener en cuenta que estos valores son sólo indicativos pues según el tipo de alimentación, raza, manejo, etc.; que tengan los animales y el tratamiento que sufran los estiércoles antes y después de su digestión estos valores pueden variar en forma significativa.

**Tabla 2.10** Composición Nutricional para Varios Tipos de Estiércol.<sup>52</sup>

ESTIERCOLES	COMPOSICION			RELACION NUTRITIVA		
	N <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Vacuno	0,46	0.2	0.5	2.3	1	2.5
Porcino	0.72	0.4	0.3	1.8	1	0.6
Aviar (seco)	3.60	4.6	2.5	0.8	1	0.6

<sup>51</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 41

<sup>52</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 20

Todos los nutrientes utilizados por los vegetales en forma importante (nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio) al igual que los elementos menores son preservados durante la fermentación. En el caso del fósforo su porción directamente asimilable no se ve afectada conteniendo los efluentes un 50% en esta forma. En contraste con los otros nutrientes el nitrógeno contenido en un 75% en macromoléculas orgánicas y un 25% en forma mineral en los estiércoles sufre una transformación reduciendo a un 50% el nitrógeno orgánico y aumentándose a un 50% el nitrógeno en forma mineral directamente asimilables por las plantas. Con respecto a este último nutriente es muy importante el tratamiento que se le dé al efluente después de que sale del digestor debido a que a medida que transcurren los días se incrementa la pérdida de nitrógeno mineral (5% en 11 días, 15% en 20 días). En el caso de secar el efluente la pérdida puede llegar al 90%.

#### **2.4.2.2 Efecto del Efluente Sobre el Suelo**

Debido a su rápida descomposición el efluente brinda rápidamente nutrientes disponibles. Los ácidos húmicos presentes en este material contribuyen a mejorar la estructura del suelo y su porosidad aumentando al mismo tiempo la capacidad de intercambio. La cantidad de humus estable duplica generalmente al que se consigue mediante la utilización de estiércoles incrementando al mismo tiempo en forma significativa la actividad biológica del suelo. El elevado contenido de nitrógeno en forma de amonio ( $\text{NH}_4$ ) presente en los efluentes ayuda a evitar la pérdida por lavado y lixiviación del nitrógeno del suelo al igual que las pérdidas por volatilización producidas por los procesos de denitrificación biológica.

### **2.4.2.3 Efecto Sobre los Cultivos**

Existen amplias evidencias del incremento en la producción de distintas especies provocada por la aplicación de efluentes al suelo. Tanto en este aspecto como en los anteriores, las aseveraciones y cifras son relativas debido a que se está trabajando con sistemas biológicos muy complejos como son: el material orgánico de carga, el digestor, el suelo y finalmente el cultivo. Esta interacción y variación provoca grandes diferencias en los resultados y hace difícil cuantificar los beneficios obtenibles de la aplicación así como también definir dosis y modos de aplicación.

### **2.4.2.4 Aspecto Sanitario**

A pesar que este aspecto no puede ser ubicado estrictamente como un uso, aporta indudables beneficios al reemplazar otros costosos sistemas para obtener el mismo grado de descontaminación.

El tratamiento de los desechos por vía anaeróbica elimina la acumulación de estos a la intemperie evitando la proliferación de moscas, mosquitos, otros insectos y roedores portadores de peligrosas enfermedades. El proceso en si mismo produce una reducción del 90% al 99% de los principales patógenos animales (estafilococos, salmonella, pseudo-monas). Esta reducción muy importante desde el punto de vista del saneamiento está regulado por la temperatura de fermentación y la cantidad de días que permanece la biomasa dentro del digestor (tiempo de retención). El proceso fermentativo también tiene un

efecto beneficioso si se lo emplea como biofertilizante ya que un gran porcentaje de semillas de las malezas se tornan inviables.<sup>53</sup>

#### 2.4.2.5 Otros Usos

El efluente de los digestores tiene otras aplicaciones entre las cuales merecen mencionarse: la preparación de compost, la alimentación de algas y peces y de animales en raciones balanceadas. Se han realizado numerosos ensayos y extendido sobre todo en Oriente, el uso del efluente como sustrato para el crecimiento de algas y peces en estanque cerrados. En otro tipo de estanques también se crían patos y peces, los que son aprovechados para confeccionar la ración de los animales conformando lo que se ha dado en denominar “*Granjas integradas*” Figura 2.48. Siendo estas la base para un pleno desarrollo sostenible.

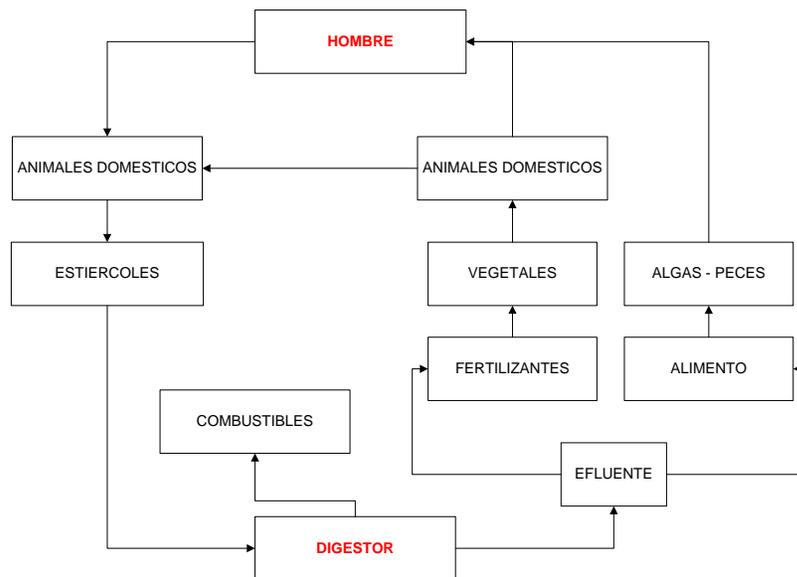


Figura 2.48: Granjas Integradas<sup>54</sup>

<sup>53</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 42

<sup>54</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 43

La utilización del efluente en mezcla con raciones ha sido empleada en numerosas especies y se cuenta con datos que aseguran un 30% de sustitución en cabras, 10%-20% en pollos parrilleros, 10% en cerdos y 10% en patos.

Como un aditivo al material vegetal para la confección de compost, el efluente es excelente ya que aporta una buena fuente de nitrógeno que acelera el proceso y enriquece al mismo tiempo el producto final con fósforo y otros elementos. Por otro lado el proceso de compostado completa la efectiva destrucción de patógenos lograda en la digestión anaeróbica<sup>55</sup>.

Esto completa los usos potenciales del efluente de los digestores, últimamente otros productos de la digestión están utilizándose a nivel experimental como es el caso del CO<sub>2</sub> obtenido de la purificación del gas. Estos usos sólo son posibles en grandes plantas industriales donde la rentabilidad del producto justifique las inversiones necesarias para implementar este uso<sup>56</sup>

---

<sup>55</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 42

<sup>56</sup> HILBERT Jorge A, Manual de producción de Biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar, página 43