

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS

2.1 Digestores

El sistema de tratamiento anaerobio es un proceso natural mediante el cual la naturaleza regresa hacia la tierra, los recursos contenidos en los residuos de la materia orgánica, a través del tiempo de manera natural (Guevara, 1996).

El tratamiento anaerobio es un proceso natural microbiano que ocurre en forma espontánea en la biomasa en ausencia de oxígeno. Genera una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como biogás y una suspensión acuosa (bioabono) que contiene los componentes no degradados o parcialmente degradados y restos inorgánicos inicialmente presentes en la biomasa (Last, 2008).

Una fórmula aproximada de los residuos sólidos domiciliarios es $C_6H_{10}O_4$ y partiendo de ésta como sustrato, las reacciones químicas subsecuentes serán (Ostrem, 2004):

1. Hidrólisis
 - a. $C_6H_{10}O_4 + H_2O \rightarrow C_6H_{10}O_6 + 2H_2$
2. Acidogénesis
 - a. $C_6H_{10}O_6 \leftrightarrow 2CH_3CH_2OH + CO_2$
 - b. $C_6H_{10}O_6 + 2H_2 \leftrightarrow 2CH_3CH_2COOH + 2H_2O$
3. Acetogénesis
 - a. $CH_3CH_2COO^- + 3H_2O \rightarrow CH_3COO + H^+ + HCO_3^- + 3H_2$
Otras reacciones importantes en la misma fase
 - b. $C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \leftrightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2$
 - c. $CH_3CH_2OH + 2H_2O \leftrightarrow CH_3CH_2COO + 2H_2 + H^+$
 - d. $2HCO_3^- + 4H_2 + H^+ \leftrightarrow CH_3COO + 4H_2O$
4. Metanogénesis
 - a. $2CH_3CH_2OH + CO_2 \leftrightarrow 2CH_3COOH + CH_4$
 - b. $CH_3COOH \leftrightarrow CH_4 + CO_2$
 - c. $CH_3OH + H_2 \leftrightarrow CH_4 + 2H_2O$
 - d. $CO_2 + 4H_2 \leftrightarrow CH_4 + 2H_2O$
Mineralización de Azufre y Nitrógeno
 - e. $CH_3COO + SO_4 + H \rightarrow 2HCO_3^- + H_2S$
 - f. $CH_3COO + NO + H_2O \rightarrow 2HCO_3^- + NH_4$

En la Figura 2.1 se explica con más detalle cada una de las etapas del proceso del tratamiento anaerobio. Los digestores son depósitos o tanques cerrados herméticamente. A grandes rasgos se pueden definir como recipientes o tanques que permiten la carga (influyente) de sustratos y descarga (efluente) de bioabono-biol y poseen un sistema de recolección y almacenamiento de biogás para su aprovechamiento energético.

Los digestores se clasifican por el proceso o modo de operación, llenado y vaciado. La clasificación general los define en digestores de régimen estacionario o lotes, de régimen semi continuo, horizontales de desplazamiento y de régimen continuo. En el diagrama de

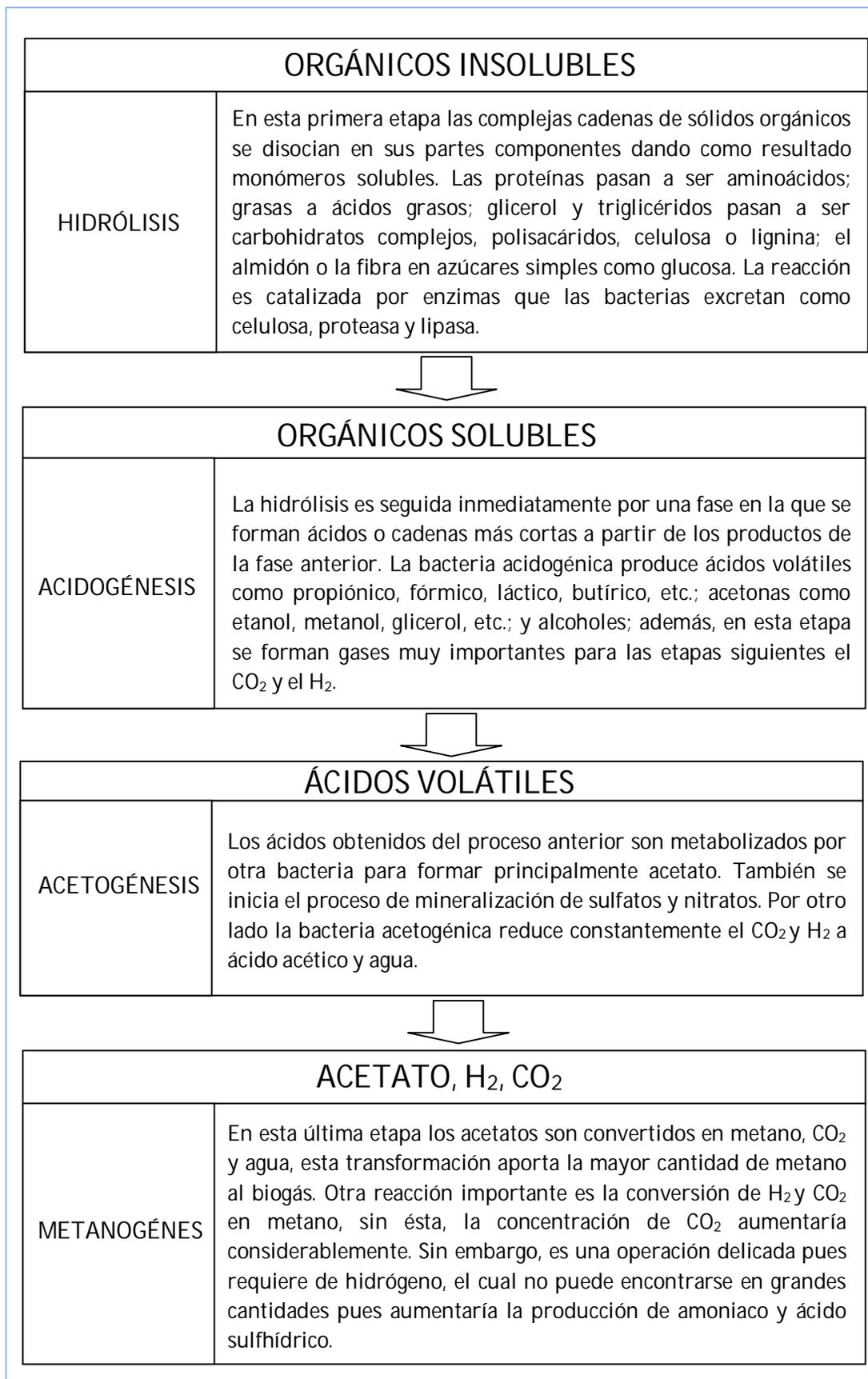


Figura 2.1 Etapas del proceso de tratamiento anaerobio (Dubanowitz, 2000)

la Figura 2.2 se expone la clasificación general de los digestores por su forma de operación. La fermentación en húmedo es la más utilizada en Europa y Latino América.

Digestores en operación intermitente

Se cargan una vez en forma total o por intervalos durante varios días. La descarga se efectúa cuando se ha degradado la totalidad de la materia orgánica y ya no se produce biogás.

Es aplicable cuando se presenten problemas operativos (falta de personal) o cuando la materia orgánica no existe en forma continua. Pueden procesar una gran variedad de materiales. La carga puede acopiarse en campo abierto porque, aunque tenga tierra u otro inorgánico mezclado, no entorpece la operación del digestor. Su trabajo en ciclos, los hace especialmente aptos para los casos en que la disponibilidad de la materia prima no sea continua, sino periódica. No requiere prácticamente ninguna atención diaria. Las principales desventajas son: La carga y descarga requiere un considerable y paciente trabajo.

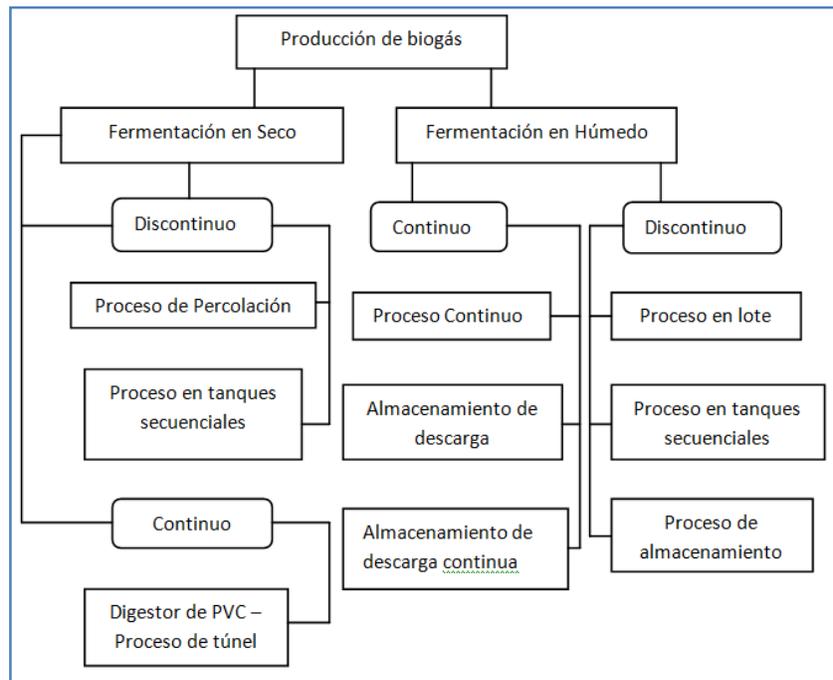


Figura 2.2 Clasificación general de los digestores (Speece, 1996)

Digestores horizontales o de desplazamiento

Generalmente se construyen enterrados, son poco profundos y alargados, asemejando un canal. Utilizan el sistema de operación semi-continuo, entrando la carga por un lado y saliendo el lodo por el otro extremo de tal forma que la biomasa pasa el tiempo de retención hidráulico al tiempo que avanza en la carrera del tanque (Figura 2.3).



**Figura 2.3 Digestor horizontal
(Ostrem, 2004)**

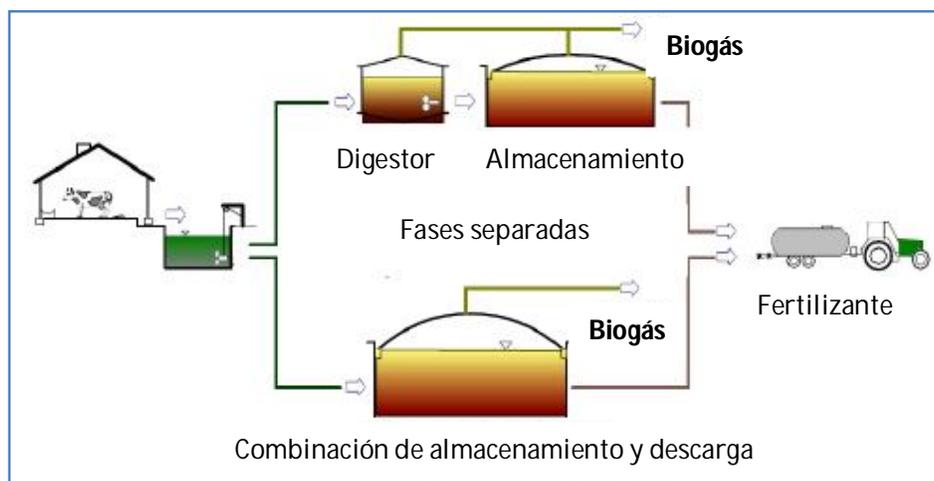
Digestores de régimen semi-continuo

Se utilizan generalmente en áreas rurales y en pequeñas granjas agrícolas. Son sistemas de uso doméstico. Se cargan por gravedad una vez al día con volúmenes de mezcla que dependen del tiempo de retención. Producen una cantidad de biogás y fertilizante constante durante todo el día.

Digestores de régimen continuo

Este tipo de digestor se desarrolló principalmente para el tratamiento de aguas residuales y en la actualidad su uso se ha extendido al manejo de todo tipo de sustratos (Figura 2.4). Se les utiliza para plantas de biogás para la producción de energía eléctrica. Son digestores de gran tamaño en los que se emplean equipos comerciales para su alimentación, para la agitación y control. Este tipo de digestor es el más utilizado en Europa y en plantas industriales en Latinoamérica. Éstas, se cargan diariamente en forma periódica, la biomasa debe ser fluida y homogénea y se pueden automatizar con facilidad.

Este tipo de digestor permite controlar la digestión, con el grado de precisión que se quiera. Permite corregir cualquier anomalía que se presente en el proceso, en cuanto es detectada. Permite manejar las variables relacionadas, carga orgánica volumétrica, tiempo de retención y temperatura, a largos periodos. La tarea de “puesta en marcha” sólo se vuelve a repetir cuando hay que vaciarlo por razones de mantenimiento. Las operaciones de carga y descarga de biomasa y fertilizante no requieren ninguna operación especial.



**Figura 2.4 Flujo esquemático de digestores para el tratamiento de desecho
(Nichols, 2004)**

Digestores completamente mezclados

A diferencia de los anteriores, estos sistemas requieren menores tiempos de retención (10 a 30 días). Son aplicados a residuos con alto porcentaje de sólidos totales, a fin de lograr un mayor contacto entre la población microbiana y el sustrato en cuestión. Las principales desventajas de estos digestores la constituyen las bajas velocidades de carga con que pueden ser operados, los relativamente altos tiempos de retención requeridos, unidos con la complejidad del sistema de mezclado, sobre todo en su construcción y mantenimiento. Este tipo de digestores se les construye en acero u hormigón (Figura 2.5). Son mezclados por agitadores y trabajan en rangos de temperatura mesofílica y termofílica, así se utilizan muy eficientemente para degradar desechos sólidos. Tienen altos costos de construcción y operación pero un elevado rendimiento de metano. La mayoría de las plantas industriales para la producción de biogás que se construyen en Europa se basan en este sistema.

Digestores de dos etapas

Existen múltiples combinaciones de digestores de dos etapas. La concentración de estos sistemas está basada en el hecho de que varios grupos de bacterias involucradas en el proceso de descomposición de la materia orgánica compleja requieren de diferentes condiciones de pH y tiempo de retención para su óptimo crecimiento. En estos sistemas, en el primer digestor ocurre la hidrólisis y acidogénesis de la materia orgánica compleja, mientras que en el segundo se realizan la acetogénesis y metanogénesis del material acidificado. Como desventaja de este sistema son los largos tiempos de retención hidráulicos, requeridos en la primera fase del tratamiento y las bajas eficiencias de conversión (Figura 2.6).



Figura 2.5 Digestor completamente mezclado
(Ostrem, 2004)

Digestión seca

Este tipo de digestión es referida al proceso de degradación de residuos orgánicos de sólidos totales del orden del 20% o superiores. La definición "seca" no es técnicamente muy clara ya que siempre se utiliza un medio acuoso para el tratamiento anaerobio. Las principales ventajas de este sistema son los bajos consumos de agua. Solamente se requiere una mínima cantidad de agua para llevar a cabo el proceso. El volumen del digestor es relativamente pequeño, debido a una alta densidad de la materia orgánica con

la que es operado. Los requerimientos energéticos, con el fin de mantener una temperatura controlada del sistema son bajos (producción endógena).

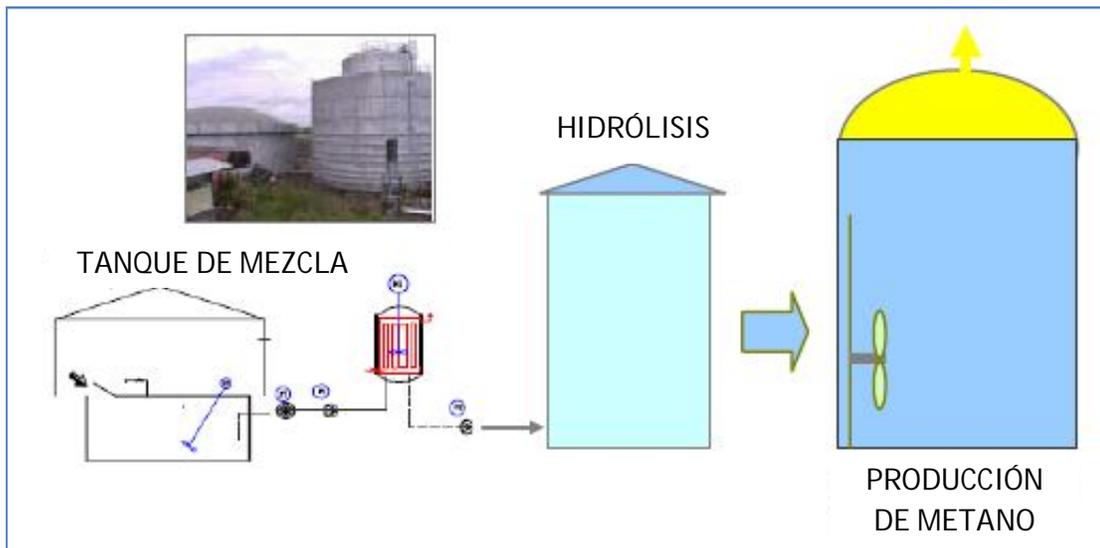


Figura 2.6 Distribución de operaciones unitarias en un digestor de dos etapas (Ostrem, 2004)

2.2 Experiencias internacionales y nacionales

Existe evidencia de la utilización del biogás que data del décimo siglo a. C.; donde éste era utilizado para calentar agua de baño en Asiria y en Persia en el siglo XVI. Jan Baptita Van Helmont determinó en el siglo XVII que una especie de gas inflamable emanaba de la materia orgánica en descomposición. Alessandro Volta determinó en 1776 que existía una relación directa entre la cantidad de residuos en descomposición y la cantidad de biogás generado. En 1808 Sir Humphry Davy probó que el metano estaba presente en el biogás que emanaba de los residuos en descomposición.

La primera planta de digestión fue construida en una colonia de Bombay, India en 1859. El desarrollo de la microbiología como ciencia hizo posible que Buswell y otros identificaran la bacteria anaerobia y las condiciones para producir metano. Después de la Segunda Guerra Mundial el uso del tratamiento anaerobio para producir energía comenzó a tomar fuerza debido al deficiente suministro de energía.

En 1999, la Unión Europea (UE) adoptó la Ley del Consejo Directivo 99/31/EC la cual entró en vigor en el 2001, que consiste en que la fracción orgánica de los residuos deberá ser reducida en 65%, respecto a lo dispuesto en rellenos en 1995, en los próximos 15 años.

Además en el Artículo 6° se dice los residuos que se dispongan deben ser tratados, con la excepción de los materiales inertes, por no ser factible su aprovechamiento. Cada país de la UE está sujeto a estos estándares como requerimientos mínimos, pero en la práctica, Alemania, Austria, Dinamarca, Luxemburgo, Holanda y Bélgica ya se habían impuesto restricciones más estrictas y ahora sobrepasan la ley, mientras que Francia, Italia, Suecia, Inglaterra y Finlandia están en la actualidad llegando a los objetivos. Grecia, Irlanda, Portugal y España, iniciaron el proceso de mejorar sus instalaciones a partir del 2004.

Como consecuencia, la capacidad instalada en Europa para la tecnología de la degradación anaerobia se ha incrementado considerablemente y hoy en día es de 4 millones de toneladas al año. Un caso muy notable, es el de España que en los últimos años ha instalado diversas plantas de gran escala para procesar cerca de 1 millón de toneladas anualmente lo que significa el 50% de los residuos orgánicos producidos en el país.

En Alemania, la ley de reciclaje y residuos fijó límites muy estrictos para la composición de los RSU tratados, antes de ser dispuestos en rellenos. Por ejemplo, el carbón orgánico total y la energía contenidos permitidos para la disposición de residuos son de 18% y 6,000 kJ/kg, respectivamente.

Al 2006 existían en Europa, 124 plantas con capacidad para tratar 3,300 ton/año de sustratos compuestos por un mínimo de 10% de RSU. La capacidad total combinada es de 4.3 millones de toneladas anualmente lo que equivale al doble del número de plantas y cuatro veces la capacidad que existía en el 2000. Así mismo entre los años de 2001-2005 se incrementó notablemente el tamaño de la capacidad media de las plantas instaladas a un promedio de 43,000 ton/año (De Baere, 2006).

Finalmente, una empresa de servicios ambientales Israelí llamada Arrow Ecology patentó una tecnología de separación y digestión de dos fases con el nombre comercial de ArrowBio. Al poco tiempo las ciudades de Coachella y Santa Bárbara se enlistaron para adoptar esta tecnología, tiempo después de que se inauguró una planta con capacidad de 88,000 ton/año en la ciudad de Tel Aviv en 2002, la cual produce entre 2-3 MW de energía eléctrica. Así pues, fueron programadas inversiones para México, Australia y Escocia (Oleszkiewicz y Poggi-Varaldo, 1998).

El uso de la degradación anaerobia comenzó tarde en México, en comparación con los países europeos y aún con los norteamericanos, adicionalmente sólo se desarrolló con gran aceptación en el tratamiento de aguas residuales. El primer reactor de este tipo se construyó en 1987 y el crecimiento fue lento, pues al año de 1991 sólo se construían de 1 a 4 por año. Afortunadamente en 1992 ya se había incrementado en un 400% la cantidad y se había llegado a 16 digestores. Durante los dos años siguientes la velocidad de construcción se mantuvo por encima de 10 plantas por año, llegando a un máximo de 19 en 1993. Lamentablemente esta tasa decreció enormemente debido a la crisis de 1994 y la devaluación de la moneda nacional (Monroy y col., 1998).

En 1998, se contaba con una capacidad instalada de 85 reactores anaerobios en México tratando un volumen de 2.5 m³/s de aguas residuales y 590 ton DQO/día (equivalente a 12.3 millones de habitantes, considerando que 160L/hab•día y 300 mg DQO/L). Ésto es el 0.62% de las aguas residuales generadas y el 3.69% de las aguas residuales tratadas (5.5% de las industriales y 2.93% de las municipales) después de ésto el crecimiento se ha focalizado en el tratamiento de los residuos de granjas, establos, centrales de abasto y por su puesto basura urbana (Degan y col, 2010).

2.3 Factores para el diseño y operación de una planta de biogás

La actividad metabólica involucrada en el proceso de producción de gas metano se ve afectada por diversos factores y entre los más importantes se tienen los siguientes:

- Ausencia de oxígeno
- Tipo de biomasa (nutrientes disponibles)
- Nutrientes
- Relación Carbono/Nitrógeno
- Grado de mezclado de la biomasa

- Tiempo de retención hidráulica
- Inóculo
- Presencia de compuestos inhibidores del proceso
- Masa seca (MS): La masa seca se define como la cantidad de sólidos que contiene la biomasa.
- Masa volátil (MV): Es el volumen de masa orgánica que contiene la biomasa.
- Carga orgánica volumétrica (COV): Es la cantidad de materia orgánica seca (MS) con la que se alimenta diariamente al digestor por m³ de volumen de digestor.
- Tiempo de retención hidráulica (TRH): Es el tiempo de permanencia de la biomasa en el digestor. Este valor depende de la temperatura ambiental y la carga orgánica. Existe una relación inversamente proporcional entre la degradabilidad de la materia orgánica y el TRH del digestor.
- Temperatura del proceso: Existen tres rangos de temperatura adecuados para digestión anaerobia asociado con la naturaleza de las bacterias. Un rango psicrófilico (por debajo de 25°C), Mesófilico (entre 25 y 45°C) y otro Termófilico (46 a 60°C).
- Acidez: Es uno de los parámetros de control más importantes, debido a que los microorganismos metanogénicos presentan una gran sensibilidad a las variaciones del mismo. Si el valor del pH se mantiene entre 6.5 y 7.5 se consigue un buen rendimiento de degradación y una elevada concentración de metano.

La variación de los parámetros antes mencionados, en función del tiempo de retención dentro de un reactor anaerobio, pueden verse en la Figura 2.7.

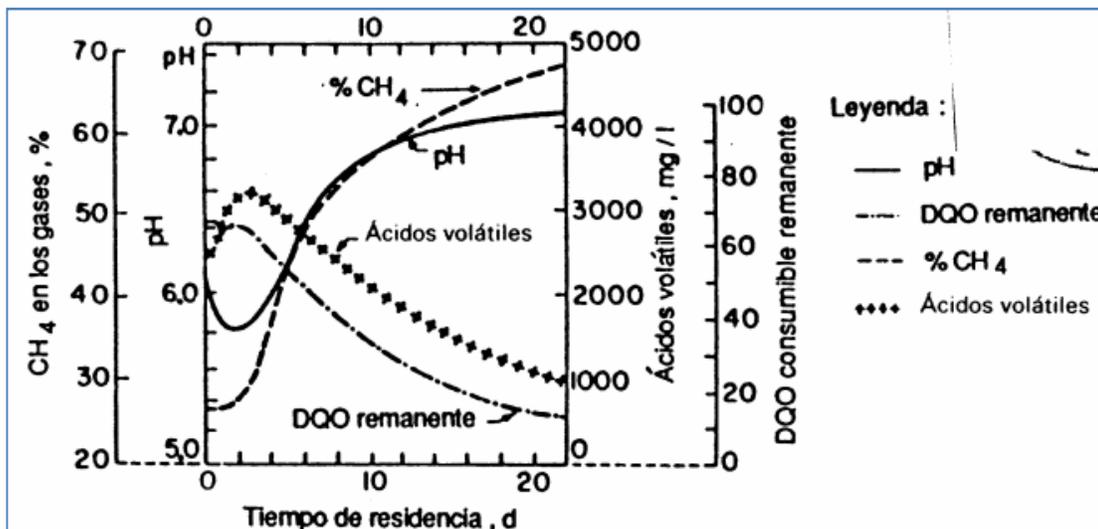


Figura 2.7 Variación de los principales parámetros del tratamiento anaerobio (Ramalho, 1996)

La degradación anaerobia de residuos orgánicos municipales ha sido estudiada extensamente en relación con los desperdicios vegetales debido a sus grandes similitudes. Los excelentes resultados que se han obtenido de la digestión de vegetales y residuos agroindustriales son válidos en general, cuando el contenido de lignina de los RSU no es muy alto. De hecho, ya ha sido indiscutiblemente demostrado que un contenido de 15%, en peso, de lignina inhibe enormemente la digestión (Pfeffer y Khan, 1976).

El contenido de masa volátil (MS) en una mezcla de biomasa tiene también influencia en la producción de biogás. Si este valor es muy elevado las bacterias no tienen espacio para moverse y crecer por lo que solo degradan la materia presente en su reducido espacio. Si el contenido de MS alcanza valores del 40% o más puede ocurrir el colapso del proceso, ya que en este caso no existe la suficiente humedad para que se desarrolle el proceso anaerobio. Por otro lado también pueden ocurrir problemas con elementos inhibidores del proceso, ya que estos existirían en una concentración muy elevada. La producción de biogás también dependerá del grado de homogenización y mezcla de la biomasa. A mayor mezcla y agitación, mayor será la producción de biogás (Degan y col, 2010).

En la Tabla 2.1 se indican los rangos de valores que deben tener ciertos parámetros necesarios para una óptima digestión de biomasa.

Tabla 2.1 Valores mínimos de parámetros físicos y químicos necesarios para la degradación anaerobia de desechos sólidos municipales (Peres y col., 1992)

Parámetros	Medida
pH	6.5 – 8.0
Contenido de sales/Conductividad	2.5 hasta 25 mS/cm
Temperatura	8 hasta 55 °C
Oxígeno	<1 ppm
Hidrógeno	6 ppm
Carbono total	0.2 hasta 50 g DQO/L
Sodio	45 hasta 200 ppm
Potasio	75 hasta 250 ppm
Magnesio	10 hasta 40 ppm
Azufre	50 hasta 100 ppm
Hierro	10 hasta 200 ppm
Níquel	0.5 hasta 30 ppm
Cobalto	0.5 hasta 20 ppm
Molibdeno, Wolframio, Selenio	0.1 hasta 0.35 ppm
Cinc	0 bis 3 ppm
Fosfato	50 bis 150 ppm

En la Tabla 2.2 se exponen los resultados de una investigación realizada en la India para determinar la producción de biogás respecto de los desechos orgánicos de hortalizas.

Tabla 2.2 Carga de los residuos líquidos de diversos procesos de la industria de hortalizas (Sundararajan y col., 1997)

Procesamiento de hortalizas	Volumen de residuos m ³ /ton materia prima	Kg DBO /ton materia prima	Kg SST/ton materia prima
Espárragos	68.8	2.1	3.4
Brócolis	45.6	9.8	5.6
Col bruselas	36.3	3.4	10.8
Zanahorias	12.1	19.5	12.0
Coliflores	89.4	5.2	2.7
En conserva	4.5	14.4	6.7
Congelado	13.3	20.2	5.6
Habas	27.1	13.9	10.3
Todos los productos	10.3	18.1	15.9
Productos congelados	11.3	22.9	19.4

Los desechos de las procesadoras de frutas tienen un alto contenido de carga orgánica que puede aprovecharse en digestores para la producción de biogás. En la Tabla 2.3 se presentan los contenidos de masa orgánica que se pueden obtener del proceso de varios tipos de frutas.

Tabla 2.3 Carga de los residuos líquidos de diversos procesos de la industria de frutas (Mata-Álvarez, 1992)

Procesamiento de frutas	Volumen residuos m ³ /ton materia prima	Kg DBO/ton materia prima	Kg SST/ton materia prima
Damascos	29.1	15.4	4.25
Todos los productos	3.7	5	0.5
Todos excepto jugos	5.4	6.4	0.8
Jugos	2.9	2	0.3
Cítricos	10.1	3.2	1.3

Se han realizado incontables estudios sobre la relación entre la producción de biogás y las proporciones de humedad que se mantienen dentro del proceso. El proceso seco (por encima 15% de contenido de sólidos totales), tiene menos sensibilidad a la entrada de material no digerible debido a que no existe una segregación homogénea de las mismas, en contraste, estas condiciones no alcanzan remociones tan altas como los procesos húmedos (Capela y col., 2008).

2.4 Diseño de plantas de biogás

Uno de los objetivos centrales del uso del sistema anaerobio para el tratamiento de residuos es la obtención de biogás con un poder calorífico que haga posible su uso como combustible, sin embargo esta tecnología no es tan reciente como se cree.

Es bien sabido que el desempeño de un digestor es altamente sensible a la calidad del sustrato alimentado, la producción y la cinética de las reacciones biológicas dependen fuertemente de la composición de los residuos. Por ejemplo, la degradación de residuos separados desde las fuentes es de 5-10 veces mayor que la de los residuos separados mecánicamente, mientras que la producción de biogás es 2.5 veces mayor (Mata-Álvarez, 1992).

La producción de biogás la determina el contenido de proteínas, hidratos de carbono y gases que forman la biomasa o los sustratos que se co-digestionan. La mayor cantidad de biogás se obtiene de las grasas, pero el mayor % de gas metano se obtiene de las proteínas (71%). La menor producción de metano se obtiene de los hidratos de carbono. Por estas razones es muy importante lograr una mezcla de sustratos equilibrada en donde se produzca la mayor cantidad de biogás, pero también el mayor contenido porcentual de gas metano.

La producción de biogás en un digestor involucra una serie de procesos interrelacionados que comprende toda la gestión, desde el suministro de sustrato o biomasa hasta su aprovechamiento.

Está comprobado que todos los desechos orgánicos pueden producir biogás en mayor o menor grado (Figura 2.8). La producción de biogás de un determinado desecho depende de su composición físico química y en particular del contenido de carbonos, grasas, proteínas, etc. (Figura 2.9). Depende también de las características de la biomasa mezclada con la que se alimenta el digestor.

Se sabe que la reducción del tamaño de partículas genera un incremento en la superficie de contacto para el proceso. Dos efectos han sido probados: El primero, se presenta en sustratos con alto contenido de fibra y baja biodegradabilidad, la molienda o trituración ha demostrado mejorar la producción de biogás. Por otro lado, la reducción del tamaño de partículas indudablemente acelera la digestión, como lo han demostrado varias pruebas de maceración del sustrato, de hecho un incremento récord de 20% de producción de biogás con partículas de menos de 0.35mm, sin embargo no se han encontrado grandes diferencias con tamaños de 5-20 mm. Se han probado varios pretratamientos químicos como por ejemplo la aplicación de NaOH o NH₄OH y también la combinación de éstos con los tratamientos mecánicos, sin encontrar aumentos en la producción de biogás que valgan la pena (Palmowsky y Müller, 1999).

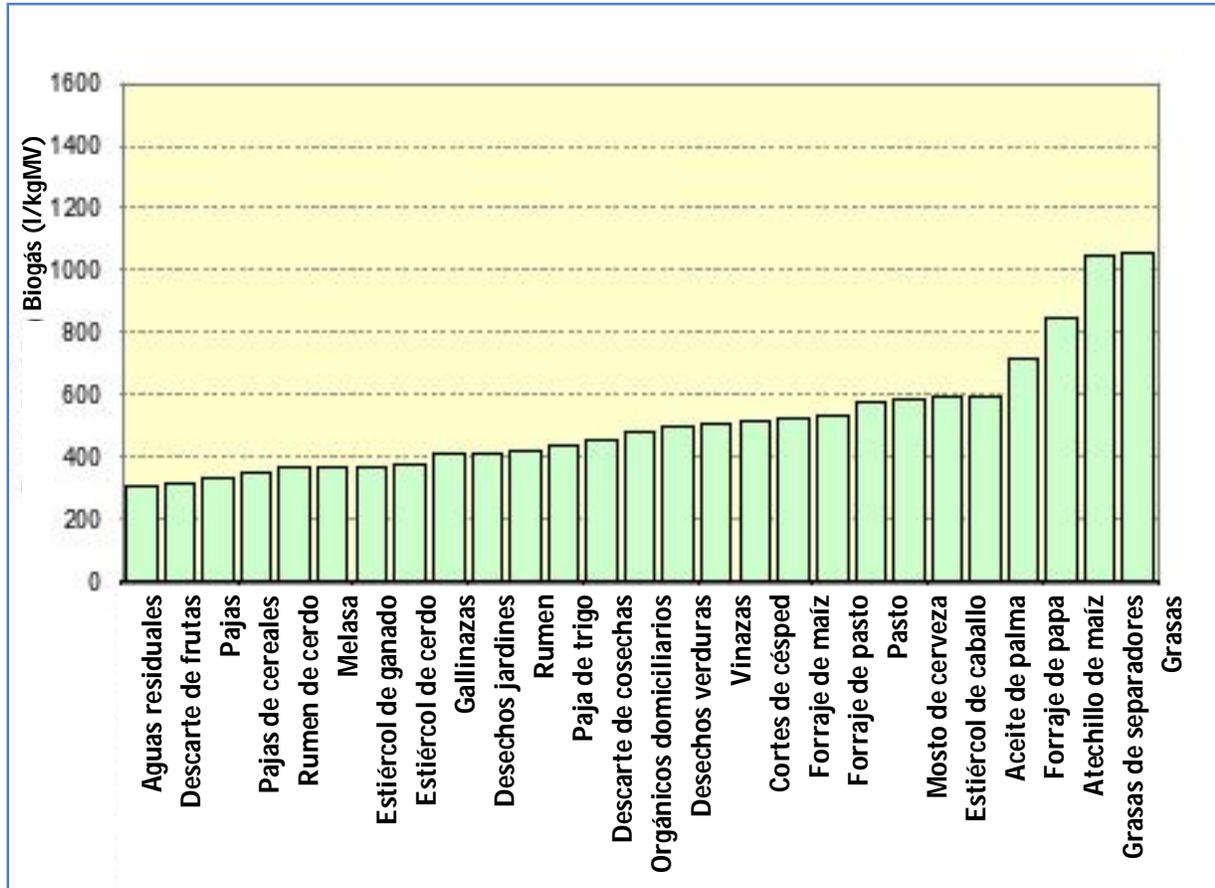


Figura 2.8 Producción de biogás de diferentes sustratos (Speece, 1996)

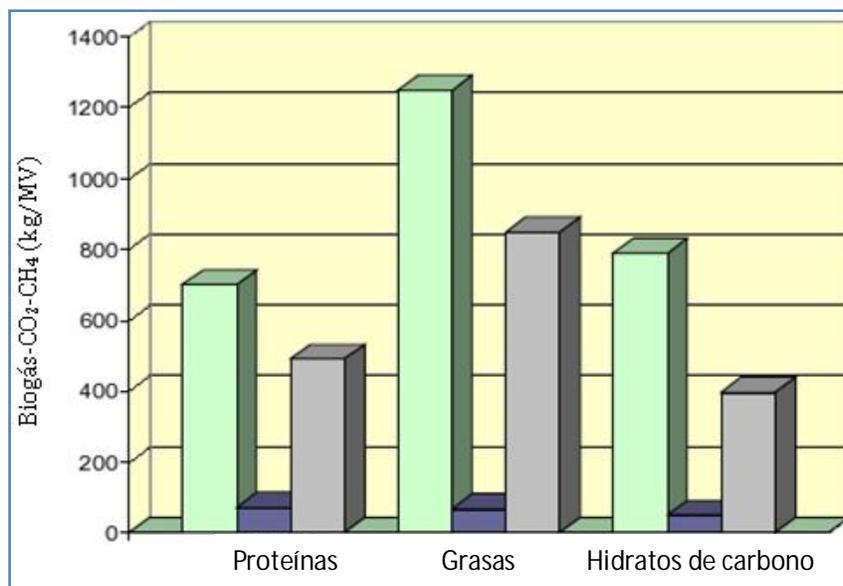


Figura 2.9 Producción de biogás en función de diferentes moléculas orgánicas (Speece, 1996)

Para calcular el caudal del biogás primeramente se deben analizar los gases que tienen una contribución significativa en términos de volumen total. Aparte del metano, que es el componente más abundante, habrá dióxido de carbono, agua y de nitrógeno. Adicionalmente, hay otros compuestos que son poco voluminosos pero cuya presencia tiene importancia a causa de su naturaleza: Oxígeno, amonio y principalmente, sulfuro de hidrógeno. Los gases nitrógeno, oxígeno y amonio están disueltos en el afluente, mientras el metano, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno almacenados en el digestor. Por ser vapor y no gas, la presión parcial del H₂O es constante para una determinada temperatura y no depende de la presión de la fase gaseosa.

Muchos reportes indican que las plantas de gran escala enfocadas al tratamiento de la fracción orgánica de los residuos domiciliarios, alcanzan producciones de 0.10-0.15 m³/kg húmedo (Tablas 2.4 y 2.5). El biogás producido puede contener entre 50-70% por volumen de metano, lo cual da muestra del enorme potencial de su aprovechamiento. La producción de metano es mucho más atractiva que la producción de biogás, sin embargo implica equipos muy precisos para la medición y el control de los gases (cromatógrafo de gases) los cuales son muy costosos. Además los residuos orgánicos urbanos puede variar enormemente en el contenido de la masa volátil debido a las proporciones de papel, pastos, madera y algunos otros materiales lignocelulósicos. Por esta razón, la literatura científica reporta las producciones en términos de unidades de masa seca o masa volátil. Ésto presupone que la biodegradabilidad está relacionada con la masa volátil, sin embargo los materiales lignocelulósicos tienden a ser menos degradables que otros. Una mejor aproximación es la demanda biológica de oxígeno de 5 días (BOD-5), pero el método estándar para medir el BOD-5 contenido en algún sustrato por lo que es menos común (Fricke y col., 2005).

La eficiencia de un digestor en términos de la producción de biogás por unidad de volumen del digestor puede calcularse multiplicando la carga orgánica volumétrica por la producción específica de biogás. Por lo tanto puede observarse que en digestores alimentados con residuos orgánicos separados desde las fuentes, operados a 55°C, se pueden alcanzar producciones de cerca de 0.8 m³/ kg MV, cuando la COV es de 2 kg de MV/m³ de digestor/día y la producción de biogás 1.6 m³/m³/día. Mientras que la producción asociada a las condiciones mesofílicas puede ser notablemente menor, de entre 0.45-0.3 m³/kg MV, pero la carga orgánica es mayor (entre 6 y 9 kg MS/m³/día) y la producción de biogás es de 2.7 m³/ m³/día, con un porcentaje de 70% metano. No está por demás decir que todos los digestores estudiados con producciones mayores de 3 m³/ m³/día fueron termofílicos (Hartmann y Ahring, 2006).

En las Tablas 2.4, 2.5 y 2.6 se indican los resultados de un análisis realizado para determinar la producción de biogás de varios sustratos en relación al TRH y la temperatura, así como la producción en términos específicos de masa volátil y masa seca.

En la práctica es casi imposible calcular empíricamente y con exactitud la producción de biogás de una biomasa o mezcla. Esto se debe a que se desconoce la cantidad exacta de nutrientes y componentes de la mezcla o biomasa. Las estimaciones se realizan con base en mediciones puntuales del contenido de nutrientes, pero estos pueden variar en la biomasa día a día. Adicionalmente la mayoría de los cálculos del potencial teórico de la producción de biogás en un digestor se hacen considerando una degradación del 100 % de la materia orgánica, lo que generalmente nunca sucede (Di Palma, 1999).

Tabla 2.4 Producción de biogás de diferentes tipos de biomasa (Memberz y Glauser, 1997)

Sustrato	Rango de producción de biogás (l/kg MV)	Producción media de biogás (l/kg MV)	Contenido de metano (%)
Algas	420-500	-----	63
Bagazo	140-190	160	-----
Bagazo	165	165	-----
Cañas, juncos	170	170	-----
Cáscaras de cacahuete	365	-----	-----
Cáscaras de arroz	105	105	-----
Cereales	180-320	250	-----
Césped	280-550	415	-----
Estiércol de cerdo	340-650	495	65-70
Estiércol de oveja	100-310	200	68
Estiércol de vaca	200-500	350	65
Gallinaza	350-500	425	60
Hojas caídas	210-290	-----	58
Paja de arroz	170-280	220	-----
Paja de avena	290-310	300	59
Paja de cebada	250-300	275	59
Paja de maíz	350-480	410	-----
Paja de trigo	200-300	250	50-60
Residuos de agricultura	310-430	360	60-70
Residuos vegetales	330-360	345	-----
Restos de azúcar de remolacha	400-500	450	-----
Restos de papas	280-490	385	-----
Semillas	620	620	-----

Muchos de los sistemas de tratamiento de la parte orgánica de los residuos sólidos urbanos en el mundo, utilizan la co-digestión de lodos municipales y residuos. Usualmente se inició por introducir residuos en digestores de plantas de depuración de agua residual como en la ciudad de Viareggio, donde se incrementó la carga orgánica en 20% logrando producciones de biogás 58% mayores (0.56 m³/kg MV). Este experimento se ha repetido en otras partes del mundo con buenos resultados, lo que abre la posibilidad de tratar residuos municipales en la infraestructura existente de digestión sin necesidad de realizar inversiones adicionales (Bolzonella y col., 2006).

Tabla 2.5 Producción de biogás y metano de varios sustratos a un tiempo de retención de 20 días y una temperatura de 30°C (Juanga y col., 2007)

Sustrato	Biogás (l/kg MV)	Metano (%)
Estiércol de cerdo	340-550	65-70
Estiércol de ganado	90-310	65
Gallinaza	310-620	60
Pajas de trigo	200-300	50-60
Pajas de arroz	200-300	59
Paja de cebada	250-300	59
Paja de avena	290-310	59
Paja de maíz	380-460	59
Lino	360	59
Hierba, césped	280-550	70
Pasto elefante	430-560	60
Carrizos	170	-----
Residuos de vegetales	330-360	-----
Papas	260-490	-----
Remolacha	400-500	-----
Desechos agrícolas	310-430	59
Semillas	620	60-70
Algas	420-500	-----
Lodos depuradoras	310-740	63

Tabla 2.6 Producción de biogás y gas metano de diferentes co-sustratos (De Baere, 1999)

Sustrato	MS %	MV %	Producción de biogás m ³ /kg MV	Metano m ³ CH ₄ /kg MV	Metano %
Panes viejos	90%	97%	0.8	0.6	75%
Vinazas de manzana	3%	95%	0.53	0.33	62%
Mostos de cerveza	25%	66%	0.7	0.38	54%
Desechos domiciliarios, cocinas	18%	75%	0.4	0.24	60%
Grasas de separadores	50%	96%	1	0.7	70%
Lodos de depuradoras	18%	92%	1	0.7	70%
Desechos de verduras	15%	84%	0.6	0.4	67%
Cereales	88%	97%	0.65-0.72	0.38	53%
Forraje de pasto	38%	90%	0.45-0.61	0.35	55%
Desechos de jardines	26%	90%	0.40-0.65	0.42	55%
Descarte de papas	25%	79%	0.65	0.45	69%
Puré de papas	22%	90%	0.73	0.43	59%
Rumen de cerdo	13%	82%	0.5	0.3	60%
Maíz en grano	88%	98%	0.75-0.80	0.43	53%
Forraje de Maíz	33%	96%	0.60-0.70	0.4	53%
Melaza	77%	90%	0.72	0.39	54%
Mostos de frutas	18%	93%	0.6	0.38	63%
Tortas de extracción, aceite	91%	94%	0.72	0.45	62%
Forraje de pasto sudan	35%	93%	0.7	0.4	57%

Los volúmenes de biogás producidos se expresan en m³/kg de masa volátil m³/kg.MV, como m³/kg.DQO o en litros por kilogramo de masa seca (l/kg MS) o metros cúbicos por tonelada de masa húmeda (m³/ton MV). Estos volúmenes difieren según el tipo de residuo, la concentración de sólidos volátiles, la relación carga/volumen del digestor, el tiempo de retención de los residuos dentro del digestor y el diseño del mismo. En general la producción promedio oscila entre 1 y 2 m³ biogás/m³ digestor, o dicho de otra manera entre 0.3 y 0.8 m³/kg.MV o alrededor de 0.35 m³ de gas metano por kg DQO degradado. Hay sustratos como el pasto o forraje de maíz que producen mayores cantidades de biogás por kg.MV (De Baere, 1999).

Adicionalmente existen otros factores con mucha influencia en la producción de biogás, como el tiempo de retención, la temperatura, el porcentaje de masa seca, masa volátil y la cantidad eventual de inhibidores de la producción de biogás contenidos en la biomasa.

Tabla 2.7 Producción de biogás de varios tipos de biomasa (Di Palma, 1999)

Sustrato	m ³ biogás/kg MV
Orujos agrícolas, pe. Cerveceros, fabricantes de zumo	0.42 a 0.50
Residuos de matadero y de la transformación de pescado	0.34 a 0.71
Residuos "verdes" de jardinería y agrícola	0.35 a 0.46
Residuos alimenticios y piensos	0.32 a 0.80
Orujos de la destilación de patata y cereales aprox.	0.48
Residuos orgánicos domésticos	0.40 a 0.58
Residuos de separadores de grasa (gastronomía)	0.70 a 1.30
Purinas agrícolas	0.22 a 0.55
Fango de procesos de depuración	0.45 a 0.55

Por un lado, la velocidad de degradación de la materia orgánica se consigue también aumentando la temperatura al interior del digestor. Pero solo se consigue hasta un cierto límite, ya que no es posible aumentar la temperatura a valores muy elevados, debido a que las bacterias dejarían de producir biogás. Pero por otro lado hay que tener en cuenta, que con el aumento de la temperatura, se consigue una mayor producción de CO₂ y por lo tanto una menor producción de gas metano. Ésto ocasiona que el biogás que se produzca tenga un bajo poder calorífico (Memberz y Glauser, 1997).

La producción de biogás la determina el contenido de proteínas, hidratos de carbono y gases que forman la biomasa o los sustratos que se co-digestionan. La mayor cantidad de biogás se obtiene de las grasas, pero el mayor % de gas metano se obtiene de las proteínas (71%) (Converti y col., 1995). La menor producción de metano se obtiene de los hidratos de carbono. Por estas razones es muy importante lograr una mezcla de sustratos equilibrada en donde se produzca la mayor cantidad de biogás, pero también el mayor

contenido porcentual de gas metano. Las concentraciones pueden ser expresadas en cualquier unidad (g/l, mol/l, etc.). La Tabla 2.8 exhibe los valores de coeficientes de distribución para diferentes gases y temperaturas. (Phillips, 2007)

**Tabla 2.8 Coeficiente de distribución de varios componentes del biogás
(Converti y col., 1995)**

Gas	Fórmula	Peso molecular (g/mol)	Temperatura (°C)		
			20	25	30
Metano	CH ₄	16	0.034	0.032	0.31
Dióxido de carbono	CO ₂	44	0.94	0.83	0.74
Nitrógeno	N ₂	28	0.017	0.016	0.015
Oxígeno	O ₂	32	0.034	0.032	0.030
Amonio	NH ₃	17	0.76	0.71	0.67
Gas sulfuro	H ₂ S	34	2.87	2.55	2.27

2.5 Pre-tratamientos para la digestión de residuos sólidos urbanos

A continuación se describe el dimensionamiento de los principales equipos, procesos.

2.5.1 Selección y separación previa

Cuando se tratan residuos sólidos municipales, para asegurar que no ingresarán impurezas o materiales peligrosos al sistema de digestión, se debe prever la instalación de un módulo de pre selección de materiales que puede constar de tecnologías muy simples o muy avanzadas dependiendo de los alcances. Aquí se enlistan las más recurrentes:

1. Selección manual (Figura 2.10). Es el método más primitivo para la separación de materiales. Los seleccionadores tienen dos funciones: Recuperar los materiales de valor que no necesitan ser procesados en la línea, a lo que se conoce como *selección positiva* y por otro lado la función puede ser remover los materiales que pueden causar un peligro para etapas secundarias de procesamiento como explosivos a lo que se conoce como selección negativa. La experiencia ha mostrado que una persona tiene la capacidad para seleccionar hasta 1000 lb/hora (Ramos, 2003).

Una banda de selección no debe ser más ancha de 24 pulgadas (60 cm) para un sistema donde los seleccionadores estén en un solo lado de la misma, pero debe estar entre 90 y 120 cm cuando hay seleccionadores en ambos lados. No debe moverse más rápido de 30-40 ft/min (alrededor de 9 m/min).



**Figura 2.10 Personal en una planta de selección manual
(Ramos, 2003)**

Para calcular un sistema de selección manual basta con establecer la carga diaria de material en masa y volumen pues hay módulos completos de selección disponibles en el mercado y están diseñados en función del volumen a tratar.

Los sistemas manuales suelen ser elevados algunos metros, los necesarios para que en la planta baja se realicen las maniobras con los sacos de material y los procesos de acondicionamiento de los materiales, a través de montacargas.

Regularmente se necesita un mínimo de 8 personas, que seleccionan los residuos comercializables y los dejan caer a través de ductos hacia los almacenamientos, que en México

La densidad aproximada medida en los residuos con un contenido de 80% orgánicos es de $\delta = 0.8 \text{ ton/m}^3$ (Hickman, 1976).

$$\text{Volúmen diario} = \frac{\text{Masa diaria}}{\delta} \quad (2-1)$$

2. Cribas. Sin duda, los trommels (Figura 2.11) son los sistemas de separación por cribas más populares. Son cilindros inclinados montados en ejes rodantes, con agujeros en los lados. Estos tambores giran a baja velocidad (10-15 rpm), por lo que utilizan motores de muy baja potencia. La principal ventaja de estos sistemas es su resistencia a los atascos, debido a la rotación y la inclinación que producen un fenómeno de cascadeo que obliga a los materiales a despegarse de las paredes por la turbulencia. Algunos equipos cuentan con espigas capaces de abrir las bolsas de los residuos por lo que suelen usarse al inicio de un módulo de recuperación de materiales (López y col., 1980)..

Otros ejemplos de cribas son las mallas vibratorias y los discos malla, cuyo principio de funcionamiento se basa en separar los materiales por su tamaño. Los materiales cuyo tamaño sea menor que las aperturas pasarán por ellas y se separarán de los materiales más grandes. Regularmente se usan para separar la materia orgánica después de un proceso general de trituración.



**Figura 2.11 Ejemplo de un trommel de dos etapas
(López y col., 1980)**

3. Separadores por densidad. El principio de funcionamiento de estos equipos se basa en la dinámica del movimiento de una partícula en un fluido, descrito en buena medida por la Ley de Stokes, ya sea líquido o gaseoso. Este movimiento está determinado de manera general, por tres fuerzas:
 - i. Gravedad o fuerza centrífuga
 - ii. Fuerza de flotación
 - iii. Fuerza de arrastre

Al final, los factores más importantes son el tamaño de partícula y la densidad del material y, debido a que los residuos sólidos urbanos son tan heterogéneos, estos equipos se utilizan después de la molienda.

Los equipos más comunes son las plantillas de sedimentación en agua y los clasificadores de aire en diferentes configuraciones: Ciclón, zigzag, con cama de vibración y lanzamiento horizontal (Cheremisinoff, 2003).

Los equipos más efectivos para separar partículas de diferente densidad son los jigs o plantillas de sedimentación acuosa. Estos equipos solían usarse originalmente en las minas de oro para separar las pepitas del metal precioso de las partículas de tierra y otros minerales.

El material es sumergido en agua dentro del sedimentador y está sujeto a fuerzas pulsantes producidas por un émbolo o diafragma, a través de las que el material se eleva y luego desciende alternadamente, por lo que las partículas nunca alcanzan su velocidad terminal y la separación se da únicamente por densidad.

Algunos equipos cuentan con mallas para que las partículas que ya fueron separadas por su alta densidad sean retenidas y se sedimenten por completo, impidiendo volver a contaminar la fracción ligera y mediana, como los residuos orgánicos.

Los equipos de clasificación húmeda por corriente ascendente utilizan el mismo principio que los clasificadores de aire, con la diferencia que el fluido utilizado es

regularmente agua, con una gravedad específica aproximada de 1.0. Los materiales que tienen una velocidad de sedimentación menor que la corriente son arrastrados a la superficie y removidos, mientras que los que la superan, se sedimentan. La determinación de que una partícula dada flote o se sedimente no depende únicamente de su densidad, sino también de su forma y tamaño, así como la viscosidad del medio. Estos equipos son diseñados para que la velocidad de la corriente sea ajustada con objeto de alcanzar las mayores eficiencias de remoción en operación (Wang y Pereira, 1980).

2.5.2 Trituración

En esencia, la trituración o molienda es un método para reducir el tamaño de partícula de los residuos. Para la trituración se necesita considerar los siguientes parámetros:

- i. Tamaño de partícula
- ii. Demanda (m^3/h)
- iii. Alimentación y salida
- iv. Potencia

Seleccionar una trituradora adecuada no es tan simple pues depende en gran medida de las propiedades físicas del material a procesar, sin embargo, se han tomado equipos para aplicaciones específicas en la industria química o minera y se han realizado aplicaciones en esta materia. Los equipos más importantes son el molino de martillo, que puede ser vertical u horizontal, los cortadores, las trituradoras de cuchillas de baja velocidad y los molinos de malla (Monroy y col., 1998).

2.5.3 Procesos de pre-tratamiento combinados

Una de las tecnologías más avanzadas a nivel mundial es el proceso BTA® desarrollado por la empresa danesa BTA International GmbH. Esta empresa utiliza un proceso húmedo de aproximadamente 8-12% de sólidos totales, un rango mesofílico de 35-38°C y un sistema de pre-tratamiento hidromecánico (Figura 2.12) que consta de un módulo de separación en tres fases y un removedor de arenas.

Para la primera fase se usa un equipo llamado despulpadora, que fue desarrollado por la industria del papel y utiliza fuerzas hidro-dinámicas para separar la fracción orgánica y convertirla en una suave pulpa. Los tres objetivos de este proceso son:

- A. Desintegración de la materia orgánica para mejorar su posterior degradación
- B. Remoción de la fracción pesada compuesta por contaminantes no biodegradables como piedras, vidrio, huesos, pilas y otros metálicos.
- C. Remoción de la fracción ligera compuesta por textiles, madera, bolsas, etc.

La pulpa orgánica es llevada a un contenedor después del despulpador para ser alimentada con el agua necesaria para alcanzar el contenido de humedad fijado y nuevo material es alimentado al despulpador por una banda; y cuando el material es suficiente, la banda se detiene automáticamente. Durante la carga, el despulpador trabaja a baja velocidad.

El impulsor del despulpador está diseñado para que la cuchilla hidráulica infrinja daño sólo a los materiales orgánicos y no a la fracción pesada, por lo que la potencia se controla rigurosamente para generar este fin con la mínima energía posible.

Al principio, las partículas pesadas llegan al fondo del tanque y son afectadas por el movimiento centrífugo por lo que se almacenan en las orillas donde son refugiadas por cámaras periféricas. En una segunda fase, se incrementa la velocidad de las cuchillas para reducir más el tamaño de partícula de los materiales orgánicos, ya que se ha minimizado el riesgo de daño a los materiales pesados. Después, la pulpa con un contenido de 12% de humedad deja el tanque a través de un disco en el fondo con perforaciones de 10mm, que sirve de criba para materiales ligeros no degradables.

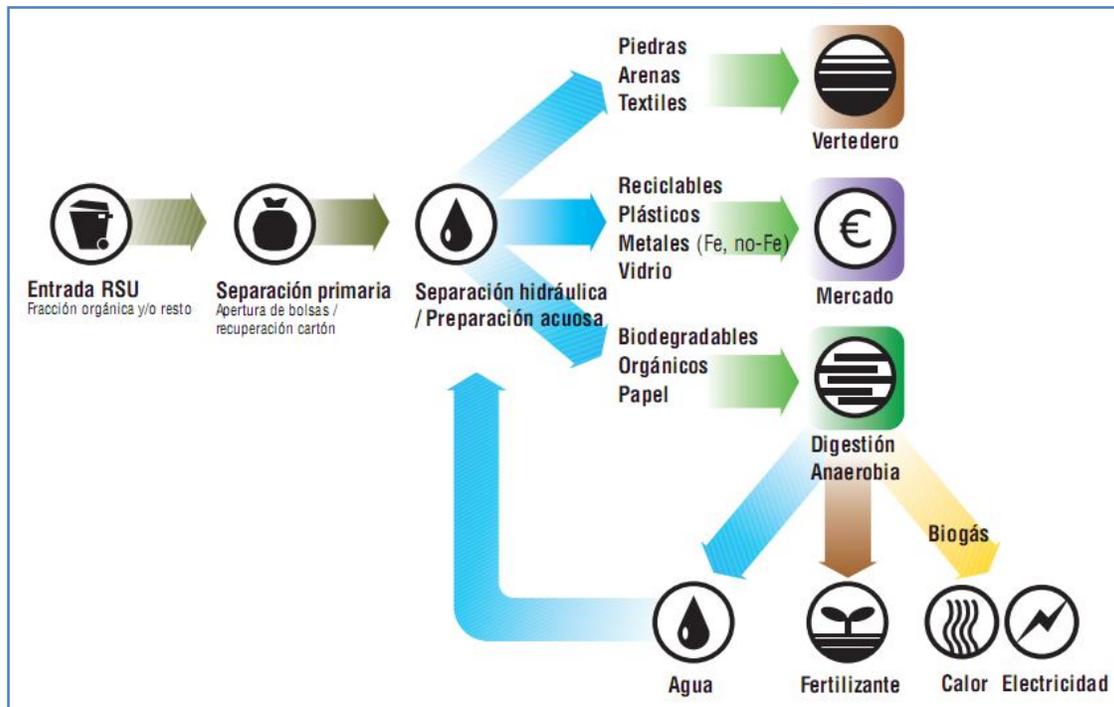
Después de la descarga del despulpador se introduce el agua de proceso para hacer que los materiales ligeros floten y posteriormente se utiliza una serie de paletas con malla que recogen estos materiales y los descargan por un extremo del tanque.

La remoción de arenas se realiza por lote y consiste simplemente en dejar que las pequeñas partículas se sedimenten. Para acelerar este proceso se utiliza una especie de hidro ciclón y para mejorar la remoción se puede recircular la pulpa varias veces (Ramalho, 1996).



Figura 2.12 Sistema BTA® de pre-tratamiento hidromecánico (Haines, 2005)

Otra empresa trasnacional que utiliza un pre-tratamiento con principios similares es ArrowBio® (Figura 2.13). Primero hacen pasar los residuos por un trommel con espigas de donde se obtiene una parte de los materiales orgánicos que pasan directo al tanque de separación hidráulica. La parte más heterogénea que sale del trommel pasa primero por una banda de selección manual, donde se retiran los materiales con un precio de mercado importante y los voluminosos. Al final las dos fracciones orgánicas sucias se limpian en un estanque con flujo forzado de agua, que de hecho se recircula constantemente, para decantar los materiales más pesados de los ligeros. Los residuos orgánicos por tener una densidad muy similar a la del agua se mantienen a una profundidad media dentro del canal y son canalizados hacia el despulpador, que termina de purificarlos (Finstein y Zadik, 2009).



**Figura 2.13 Diagrama de proceso de tratamiento de ArrowBio®
(Finstein y Zadik, 2009)**

2.6 Uso de lodos digeridos

Como se ha dicho anteriormente, el tratamiento anaerobio consiste en una serie de procesos que se dan espontáneamente en la naturaleza y que tienen como finalidad fraccionar las macromoléculas que componen la materia orgánica en moléculas más simples y aprovechables por la naturaleza, en diferentes formas. Ya se ha hablado de la importancia de la metanogénesis para volver atractivo el sistema utilizando el poder calorífico del biogás. Sin embargo, el aprovechamiento de los nutrientes contenidos en la materia orgánica es indispensable en el desarrollo de este proyecto, pero para hacerlo económicamente es necesario aplicar una serie de adecuaciones dentro de la mezcla efluente de los reactores anaerobios. La idea es llevar el sustrato de la humedad que posee en la salida del reactor, hasta una humedad cercana al 35%, que le brindaría la consistencia adecuada para ser aplicado en sembradíos sin el problema de la lixiviación, y para reducir los costos de transportación de producto terminado.

Los lodos están constituidos por partículas muy heterogéneas, tanto en su tamaño como en su constitución. Los lodos resultantes del tratamiento anaerobio contienen materia gelatinosa, materia coloidal y partículas de todas formas y dimensiones.

El agua contenida en los lodos se manifiesta en dos formas como se puede observar en la Figura 2.14:

- Agua intersticial, como la capilar, el agua libre y la que está floculada.
- Agua de impregnación o intracelular, en el interior de las partículas, como por ejemplo la que contendría una gelatina.

La mayor parte del agua intersticial puede ser fácilmente removida (70%), pues no está muy ligada al material, con procesos como espesamiento, evaporación, extrusión, succión o inercia. Sin embargo, existe un remanente muy difícil de obtener, debido a que está adherido a las partículas por fuerzas de capilaridad y por lo tanto sujeto a tensiones superficiales que pueden ser más débiles o más fuertes en función de la composición química del agua intersticial (Lothar, 1985).

Existen sustancias químicas capaces de alterar la tensión superficial y así liberar al agua, aunque con algunos procesos físicos también se logra aproximar las partículas, expulsando el agua capilar. La dificultad de usar solamente procesos físicos es que existen algunas partículas intersticiales que actúan como tapones y dificultan el drenaje del agua.

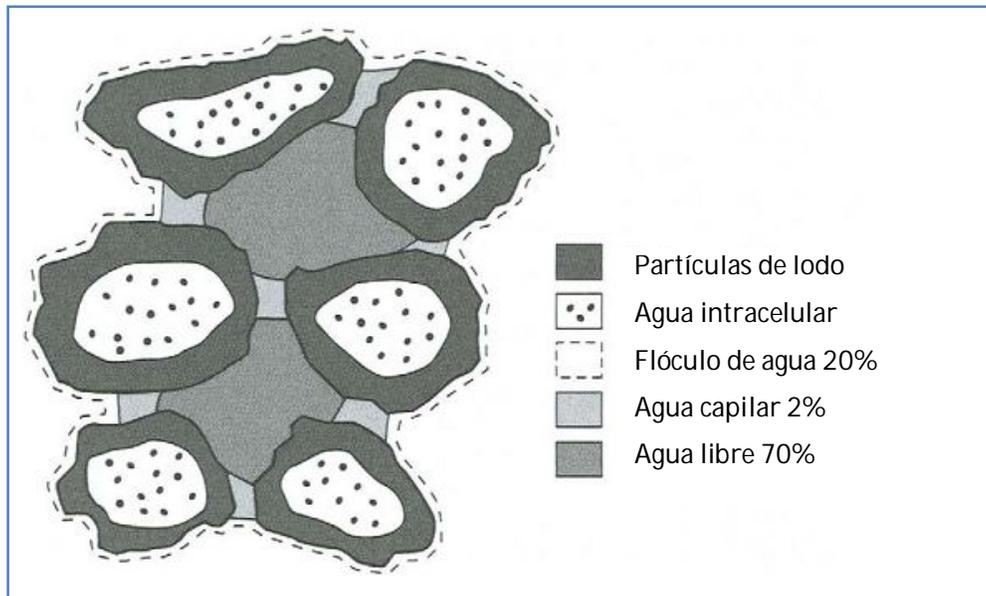


Figura 2.14 Agua contenida en los lodos digeridos (Gray, 2005)

La mayoría de las sustancias acondicionadoras son empleadas para agrupar las partículas en flóculos mayores que se comportan un tanto diferentes y esto desaparece el efecto tapón de las partículas intersticiales.

Para el agua de impregnación, que puede llegar a ser un 40% del total, se utilizan métodos térmicos de remoción. Sin embargo, a veces no es práctico tratar de obtenerla pues puede romperse la estructura de las partículas dificultando la salida del agua intersticial y obstruyendo los poros de los materiales filtrantes (Lothar, 1985).

Como se observa en la Figura 2.15, el contenido de humedad de los lodos después de la deshidratación, llevado a cabo con procesos térmicos principalmente, puede variar significativamente (60 a 20%). Por otro lado, el volumen que ocuparía esta mezcla tan sólo varía de 12.5 a 5% fluctuando por diversos factores, entre ellos, la proporcionalidad agua intersticial- agua intracelular y la tensión superficial de la misma.

Las operaciones que se utilizarán para secar el lodo digerido, son las que se siguen comúnmente para el acondicionamiento de lodos biológicos en la industria del tratamiento de aguas y lodos residuales, pues permiten la separación y recuperación del agua para posteriormente utilizarla en procesos y servicios de la planta. En la Figura 2.16

se puede observar el proceso generalizado de una estación de depuración de aguas residuales (EDAR).

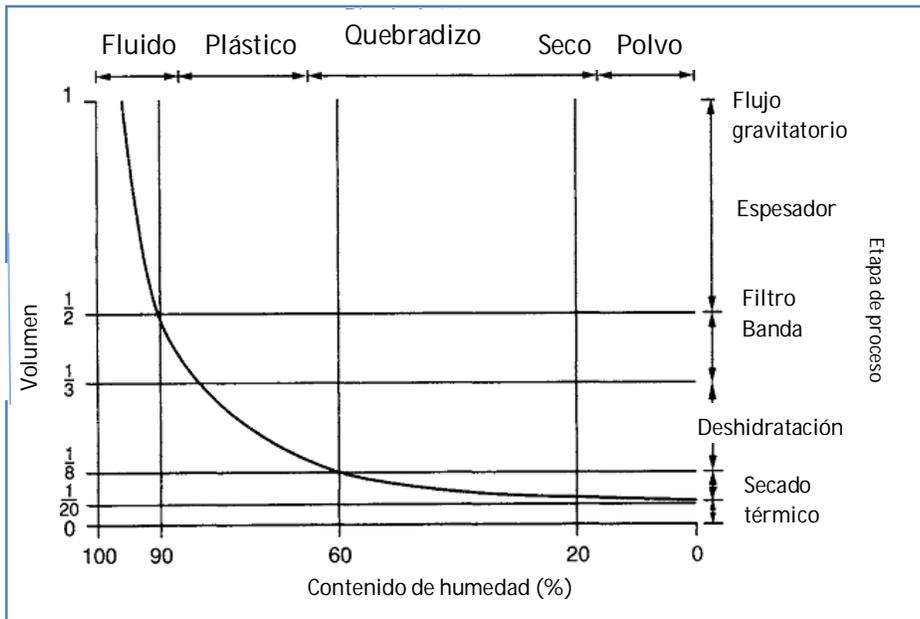


Figura 2.15 Volumen de lodos digeridos versus contenido de humedad (Jong y col. 2003)

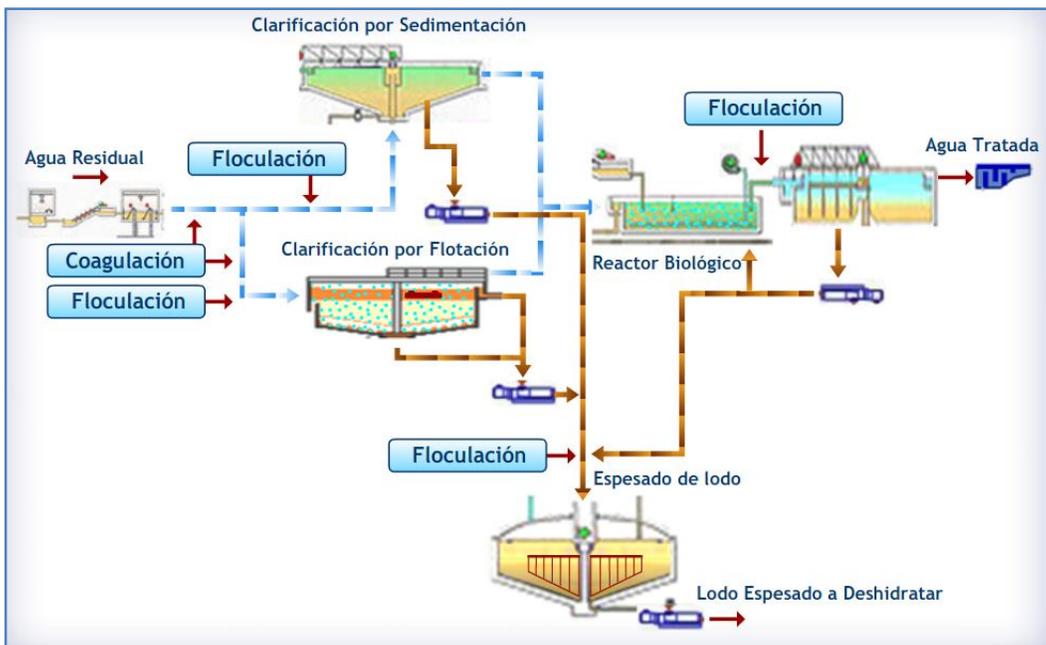


Figura 2.16 Proceso general en una estación de depuración de aguas residuales (CQ, 2009)

En general, el proceso aplicado al tratamiento de lodos en una estación de depuración de aguas residuales parte de un espesamiento primario, llevado a cabo en tanques, por gravedad o flotación con aire disuelto.

Pueden considerarse tres tipos de mecanismos o procesos de sedimentación por gravedad, dependiendo de la naturaleza de los lodos presentes:

- 1) Sedimentación discreta
- 2) Sedimentación con floculación
- 3) Sedimentación por zonas

En la sedimentación discreta, las partículas mantienen su individualidad es decir, no se someten a un proceso de coalescencia. En este caso, las propiedades físicas como tamaño, forma y peso específico no cambian durante el proceso. Un ejemplo típico sería la deposición de partículas de arena en un desarenador (Ramalho, 1996).

Se puede modificar la densidad de las partículas y su velocidad de sedimentación cuando se logra que se aglomeren pues se forman partículas de diferentes tamaños lo que crea nuevas relaciones entre ellas y el fluido. Este tipo de sedimentación es el que se sigue en los clarificadores o espesadores primarios.

El tercer tipo de sedimentación se consigue al formar flóculos muy grandes que pueden llegar a ser zonales, ésto cambia totalmente la cinética de la precipitación de las partículas pues no es posible modelarlos como medios discretos. Ejemplo de ello es lo que se lleva a cabo en los espesadores o sedimentadores secundarios de lodos activados o en la separación de flóculos de alúmina (Gray, 2005).

En las EDAR, después de la sedimentación primaria o clarificación, los lodos son llevados a un proceso de degradación biológica, donde se pretende que los elementos presentes en los compuestos orgánicos sean regresados a sus formas minerales, rompiendo las cadenas poliméricas y liberando el agua enlazada. Por otro lado, se busca eliminar la presencia de organismos patógenos, pues es un factor limitante del posible aprovechamiento de los residuos de las plantas. Es por estas razones que la tecnología aplicada en una EDAR común sea totalmente compatible con los objetivos del tratamiento de la parte orgánica contenida en los RSU.

Para extrapolar la tecnología a los proyectos tan sólo es necesario revisar las siguientes etapas de acondicionamiento de lodos, es decir, el espesamiento secundario, la remoción mecánica de humedad, el secado por aireación y el tratamiento térmico.

A continuación se definirán los procesos necesarios para reducir la cantidad de agua en los lodos y llegar hasta la humedad deseada de 35% (fijada en ese valor debido a las características de los abonos en el mercado):

- I. Espesador secundario (Figura 2.17). Son sistemas que pueden tener formas cilíndricas o prismáticas con armazones de hormigón o metálicos. El equipo constará de 4 zonas:
 - Zona de entrada: Su función es uniformizar el flujo para tratar de conseguir un perfil de velocidades muy cercano a una distribución laminar.
 - Zona de sedimentación: Es un canal con las condiciones adecuadas para sedimentar las partículas en el tiempo de retención.
 - Zona de salida: Se compone de vertedero o canaleta para el desalojo del efluente líquido sin afectar la sedimentación de las partículas.

- Zona de recolección de lodos: Prácticamente es una tolva con capacidad para depositar los lodos sedimentados y un sistema de desalojo periódico.

Algunos de los componentes que deben ser considerados se describen a continuación:

- Grupo motriz: Formado por un sistema moto-reductor.
- Eje: Transmite todo el esfuerzo al conjunto.
- Barredores de fondo: Montados sobre brazos soportes diametralmente opuestos.
- Piquetas de espesamiento: Tienen como función acelerar la sedimentación de partículas al aplicar una fuerza sobre las partículas flotantes con el mismo sentido que la gravitatoria.
- Campana central: Tiene por objetivo desarrollar la zona de entrada para controlar el flujo como si fuera laminar.

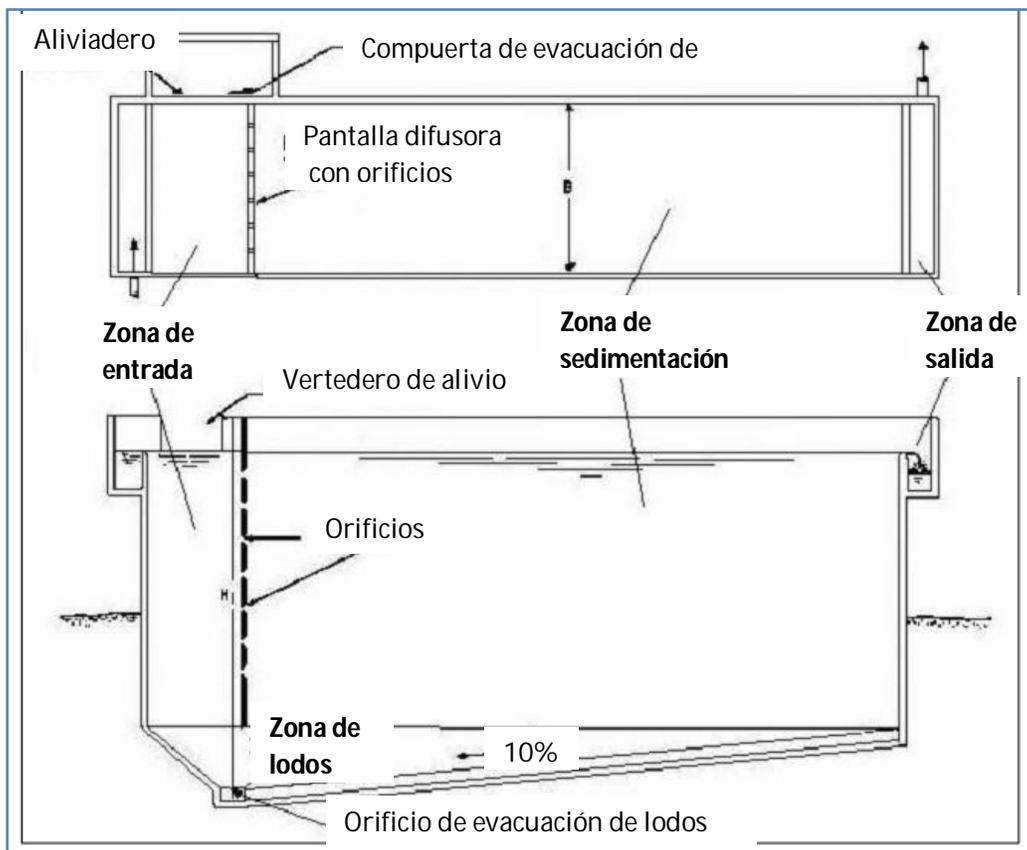


Figura 2.17 Zonas en un sedimentador (CEPIS, 2005. a)

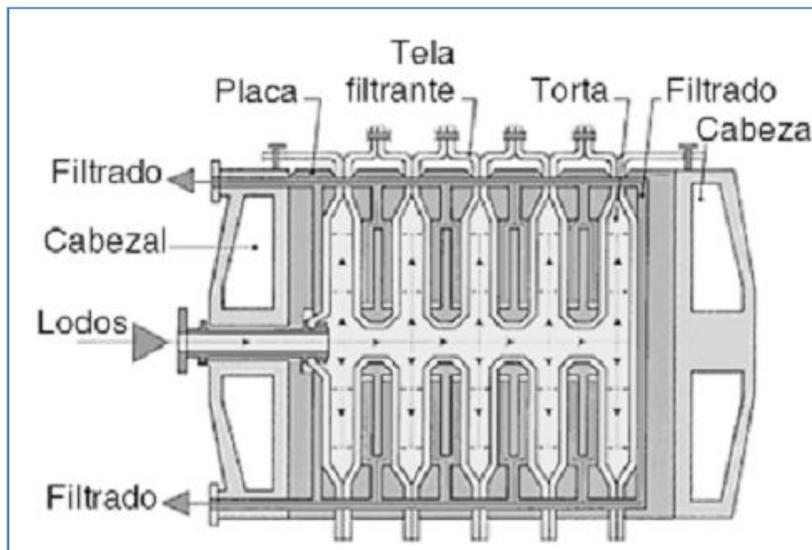
- II. Deshidratación mecánica. Como ya se revisó antes existen varias tecnologías para acelerar el proceso de separación de sólidos y líquidos. Estos dispositivos utilizan como principio el aumento de presión o gravedad entre las fases.

Los sistemas más utilizados son los filtros de vacío, los filtros prensa, los filtros banda y los centrifugadores.

Para este estudio se contemplarán con más precisión los filtros prensa y banda, por ser los dispositivos más accesibles en la industria nacional.

Filtro Prensa.- Como se observa en la Figura 2.18 consisten en una serie de placas que se soportan sobre una estructura de tipo bastidor. Las placas, cuyas superficies son ranuradas, están recubiertas por una tela filtrante. Cuando se juntan y presionan las placas se forma una cavidad entre ellas que será progresivamente ocupada por el lodo.

Se utilizan presiones elevadas de 40 a 150 N/cm² durante periodos de hasta tres horas. La capacidad de filtración oscila entre 5 a 15 kg/m²h, logrando tortas de 2 a 3 cm de espesor. Se obtienen tortas de 40 a 60% de concentración de sólidos y una separación prácticamente completa del material en suspensión.



**Figura 2.18 Esquema de filtro prensa
(Ramalho, 1996)**

Finalmente las placas se separan y la torta cae por gravedad, luego se lavan los filtros, se inspeccionan y se vuelve a repetir el filtrado. El ciclo completo puede durar hasta 5 horas. El lodo puede requerir acondicionamiento químico previo o se puede utilizar una capa de revestimiento como ayuda filtrante.

Las ventajas que puede tener un sistema de este tipo son la alta eficiencia de la separación, el alto contenido de sólidos en la torta, la gran variedad de tamaño en la placa (hasta de 2 x 2 m) y la posibilidad de usar hasta 150 placas o más. Como desventajas se tienen costos de inversión mayores que para las centrifugas y los filtros banda, el mantenimiento y la mano de obra requerida.

Filtros banda.- Una muy interesante alternativa a los filtros prensa, son los sistemas continuos de aplicación de presión, llamados filtros banda (Figura 2.19), los cuales tienen un principio de funcionamiento muy similar pero aplicaciones más específicas. Hoy en día, estos sistemas utilizan una combinación de procesos de secado: Drenaje por gravedad o percolación optimizados con sustancias coagulantes o floculantes (polielectrolitos) orgánicos o químicos y la deshidratación mecánica producto del aumento de presión entre los rodillos a los que se ajusta la banda filtrante.

Dentro de la primera etapa del sistema, apoyada en los agentes floculantes, alrededor de la mitad del agua es eliminada con tiempos de retención adecuados. Una vez concentrados los sólidos, se transfieren hacia la etapa de presión a través de la banda para ser exprimidos por los rodillos de diferentes diámetros.

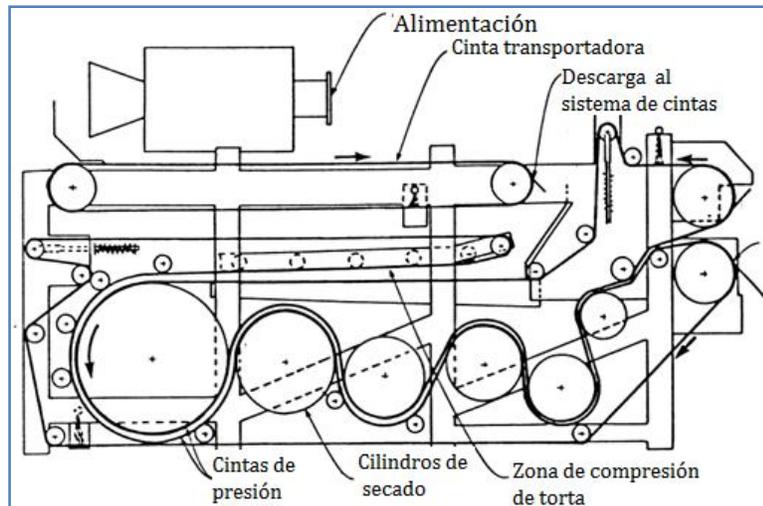


Figura 2.19 Esquema de un filtro banda convencional (Ramalho, 1996)

La idea es aumentar la presión aplicada en la torta de manera progresiva por la disminución de los diámetros de los cilindros y el aumento en la tensión de la banda. La presión puede aumentar hasta 7 kg/cm^2 y el tiempo puede ser ajustado hasta 20 min.

Los lodos producto de la digestión anaerobia no son fáciles de deshidratar mediante este sistema, si no es aplicado algún agente coagulante; sin embargo, se pueden obtener concentraciones de sólidos de hasta 95% con los sistemas más modernos.

Tamizado y empaçado.- Los últimos equipos que se necesitan para la utilización de los lodos deshidratados como un abono mejorador de suelos son una criba y un sistema de envasado. La función de la criba es homogeneizar el tamaño de partícula que finalmente será envasada, evitando que los gránulos más grandes sean empaçados. Algunos equipos cuentan con la capacidad de romper los gránulos para que las partículas resultantes puedan envasarse minimizando el desperdicio, lo cual es muy deseable.

Existen diferentes equipos para envasar el fertilizante que pueden ser totalmente manuales, electrónicos o una combinación de ambos. Estos equipos se constituyen de una tolva que ayuda a controlar y uniformizar el flujo de material que llega después del cribado y poseen una válvula de cierre rápido en el otro extremo para detener el flujo después de haber alcanzado la capacidad nominal y el contenido deseado en los sacos. La diferencia radica en la precisión deseada y los programas de calidad que se implementen en planta.

2.7 Purificación de biogás para su uso como combustible vehicular

Se han realizado grandes desarrollos en los vehículos con la finalidad de disminuir la cantidad de emisiones contaminantes y aumentar la potencia y el rendimiento de los mismos, acorde a las nuevas tendencias de transporte sostenible, algunos ejemplos concretos se enlistan a continuación:

1. Motor de alta velocidad con variaciones en la elevación y tiempo de válvula (VETV). Permite reducir el tamaño del motor y alcanzar el máximo de potencia deseado al variar el tiempo de elevación y cierre de válvulas.
2. Desactivación de pistones en ralentí y carga parcial. Esta tecnología se usa sólo en motores que usan hidrocarburos convencionales. Se basa en la desactivación de las válvulas de admisión de algunos cilindros a bajas cargas, provocando que los otros cilindros operen a cargas más altas lo que eleva la eficiencia global del motor.
3. Transmisión variable continua (TVC). Brinda flexibilidad para satisfacer una cierta demanda poniendo a trabajar el motor a las revoluciones exactas. Conceptualmente, el TVC podría maximizar la economía del combustible a cargas parciales y proveer de desempeño máximo de aceleración cuando se requiriera. Adicionalmente contribuiría a que motores pequeños alcancen el mismo desempeño que generaría una transmisión convencional en motores grandes. La ventaja es la economía de combustibles., sin embargo, provoca una alta fricción interna.
4. Motor de inyección directa de gasolina (IDG). Los motores convencionales usan una inyección de punto múltiple (IPM), donde el combustible es inyectado sólo al llegar a ciertos puntos. En un motor IDG, el combustible es inyectado directamente en el cilindro como en un motor diésel y los tiempos de inyección son controlados de la forma más precisa para brindar las condiciones de carga exactas en el momento exacto lo que genera un control extremadamente preciso del combustible, alcanzando una mejor eficiencia que los motores diésel por permitir la combustión de una mezcla ultra ligera, una admisión muy eficiente y una relación de compresión relativamente alta la cual entrega a la vez rendimiento y potencia.
5. Motor de carga estratificada e inyección directa (CEID). Incorpora la VETV y la desactivación de cilindros en un ligero motor IDG y es precisamente el siguiente paso para los motores IDG. La estratificación de la carga en la cámara de combustión permite el uso de un amplio rango de combustibles y por la combustión más completa a cargas bajas a través de exceso de aire, permite alcanzar rendimientos más elevados y menores emisiones. El principal problema del sistema CEID es que genera altas emisiones de NO_x por lo que requiere un catalizador.
6. Sistemas híbridos. Consisten de dos unidades de almacenamiento de energía, una batería y un tanque de combustible y un mínimo de dos transformadores: Un motor eléctrico y uno de gasolina. La combinación de estos motores ofrece un gran número de sistemas diferentes, pero puede ser agrupada en éstas tres categorías:
 - a. Híbrido en serie. Donde un generador transforma la energía mecánica de la combustión interna en electricidad. Aquí no hay conexión directa entre el motor de combustión interna y el eje motriz.
 - b. Híbrido combinado. La energía entregada por el motor de combustión interna puede ser transformada en energía eléctrica por el transformador y brindar movimiento mecánico al eje motriz.
 - c. Híbrido en paralelo. En este sistema ambos motores están conectados al eje motriz y es posible operar el automóvil con los dos al mismo tiempo o con cualquiera de ellos.

Los trenes de propulsión híbrida pueden ser construidos a bajo costo debido a que sus componentes son estándares. Esto significa que estos vehículos serán comercializados de forma masiva en poco tiempo. Las principales ventajas de estos sistemas son la capacidad para no perder aceleración sin interrupción de torque durante los cambios y la reducción de entre 15-25% del consumo de combustible (Matic, 2005).

Mientras que Europa está a punto de conseguir autos con un rendimiento promedio de 3 L de gasolina por cada 100 km, y mientras que llegan nuevas alternativas como la pila de combustible, para hacer posible el uso del hidrógeno o la propulsión eléctrica, el gas natural es una alternativa económica y ecológica probada y al alcance de varios países.

El gas natural comprimido para uso vehicular comenzó a utilizarse de forma importante a partir de 1944, al final de la segunda guerra mundial y ha demostrado a lo largo de los años un potencial exponencial de crecimiento por las enormes ventajas que representa.

Se espera que con el creciente interés en combustibles alternativos se sumen más de 50 millones de vehículos a gas natural en las carreteras del mundo durante los próximos 10 años. De esta manera se podría abarcar el 9% de la flota de transporte mundial hacia el año 2020 y el gas natural se convertiría en la elección más importante después de la gasolina y el gasoil. Entre los 11 millones de vehículos a GNV en circulación, existen motocicletas, triciclos, carretillas, camiones, ómnibus, tractores, remolcadores en aeropuertos, camiones recolectores de basura, locomotoras, e incluso trenes de hasta 150 ton en Australia, transbordadores, barcos de pesca, buques de carga, etc. Ninguna otra alternativa de combustible ha sido probada en tantas aplicaciones. Debido a esto, algunos países Europeos han tomado riendas en el asunto, a pesar de que son Pakistán, Argentina y Brasil los que tienen a mayor flota a nivel internacional (2.25, 1.8 y 1.6 millones de vehículos en circulación y 3, 000; 1, 858 y 1, 782 estaciones de servicio, respectivamente). En 2009, más de 130 mil vehículos a GNV fueron comprados en Italia, lo que representa más del 6% del total, además de las 17, 500 conversiones hechas después de adquiridos, llegando a más de 500 mil unidades en circulación y 732 estaciones de servicio (Silva, 2009).

El gas natural es un hidrocarburo simple. Alrededor del 90% del gas natural es metano (CH_4), que es el hidrocarburo más simple y puro que existe, pues cuando se quema una molécula de metano produce sólo una molécula de dióxido de carbono y dos moléculas de agua. Una buena comparación se puede realizar con la gasolina (Figura 2.20) que está compuesta por un gran número de hidrocarburos, y que en promedio por cada molécula quemada se producen al menos 8 moles de CO_2 , además de los NO_x y SO_x , que son los responsables de la lluvia ácida (Boisen, 2008).

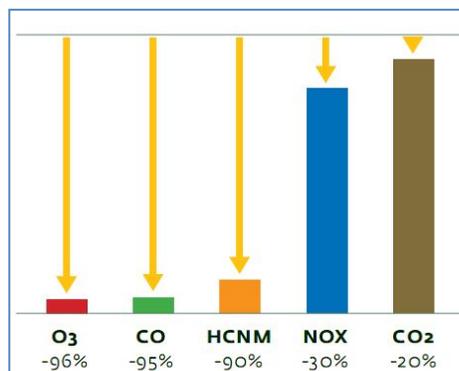


Figura 2.20 Reducción de emisiones contaminantes respecto a la gasolina. (Boisen, 2005)

Se han realizado comparaciones entre las diferentes alternativas energéticas que existen en la actualidad y existen discusiones importantes pues se ha demostrado que algunos de los llamados biocombustibles, en realidad generan más emisiones de las que se generan con la gasolina promedio. Por ejemplo, el bioetanol de paja de trigo genera tan sólo un

ahorro global de 7% en comparación con la gasolina, pero el bioetanol proveniente de la remolacha de azúcar genera 15% más emisiones (Figura 2.21). Adicionalmente, si comparamos la distancia que podría recorrer un automóvil prueba con la cantidad de combustible que se puede generar a través de las diferentes tecnologías, en tan sólo una hectárea de terreno (Figura 2.22). El metano generado de estiércol húmedo es el combustible más eficaz, pues ofrece 450% más energía por unidad de área (Edwards y col. 2006).

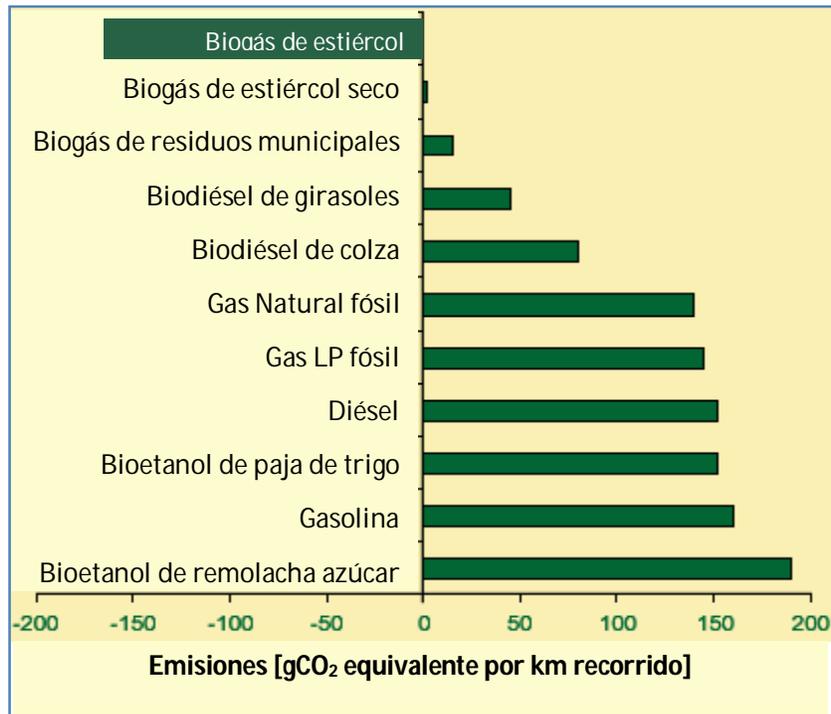


Figura 2.21 Comparación de emisiones de diferentes biocombustibles (Edwards y col., 2006)

El metano, es un combustible fósil al igual que el petróleo y se puede extraer de yacimientos subterráneos, de la desgasificación de los materiales del centro de la tierra o del biogás. De hecho, hoy en día el 60% de las emisiones de metano se deben a la acción biológica antropogénica por lo que es apremiante su captación y aprovechamiento (Irastorza y col., 2007).

Para utilizar el biogás en los vehículos es indispensable remover todos los compuestos que acompañan al metano. No basta reducir el ácido sulfhídrico con los métodos físicos, químicos, o biológicos convencionales, en esta aplicación es necesario alcanzar niveles de 99% de pureza a bajos costos, para que sea una alternativa interesante y no genere daños a los motores vehiculares que no están acostumbrados a trabajar en condiciones tan corrosivas.

Los métodos de depuración para biogás se clasifican de la siguiente manera:

Métodos de adsorción

Éstos se basan en la captura selectiva de las impurezas del biogás con ayuda de materiales sólidos granulados, los cuales tienen una gran superficie específica. La aplicación de presiones elevadas mejora sustancialmente el resultado final.

Estos sistemas se utilizan principalmente para eliminar el agua el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno presentes en el biogás. El proceso más conocido utiliza un sistema donde el gas es comprimido de 60-100 psi, antes de ser introducido a una sistema de adsorción. Con esto se obtienen una eliminación de CO₂ a valores de 1-3% y H₂S a concentraciones de alrededor de 4ppm (Llaneza y col., 2010).

Métodos de absorción

Fundamentalmente aplicables al caso del H₂S y el CO₂. Se basan en la transferencia de masa entre la sustancia gaseosa a depurar y un líquido denominado absorbente que posee propiedades selectivas de absorción. El solvente habitual es el agua y se usan diferentes compuestos y sistemas para la depuración.

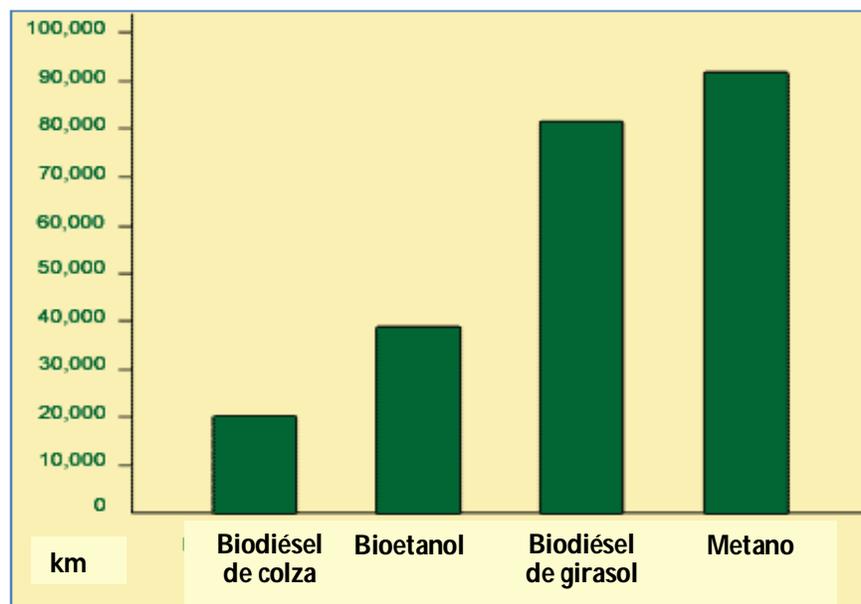


Figura 2.22 Rendimiento por Ha de diferentes biocombustibles (Edwards y col., 2006)

Uno de los procedimientos empleados para la eliminación del H₂S y el CO₂, consiste en la solución de sales aminas las cuales tienen un grupo amino NH₂ que se combina con el dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno para dar compuestos de hidrógeno carbonato, amoniaco (RNH₃)CO₃ y azufre con amoniaco (RNH₃)S, pero tiene la dificultad de ser un método muy costoso.

En un tanque columna (Scrubber) se emplean soluciones de carbonato (carbonato de potasio o sodio) y en ellas se logra reducir el sulfuro de hidrógeno. Estos sistemas sí utilizan el aumento de presión para mejorar la eficiencia.

También se han empleado soluciones acuosas alcalinas. Su principal ventaja consiste en que los problemas de corrosión y formación de espuma lo hacen menos costoso. Sin embargo, el agente antiespumante hace que el equipamiento y operación sean más

complicados. Además requiere de grandes cantidades de energía para bombear la solución y los gases. (Kirk y Othmer, 2007).

Métodos de separación por membrana

Este proceso se basa en la difusión de ciertos compuestos que pasan a través de una membrana selectiva. Con el objeto de facilitar la difusión se emplea un portador. La permeabilidad del gas a través de la membrana es función de la solubilidad y difusividad del gas en el material de la misma. Permite separar diferentes gases en función de la membrana, tales como el CO₂, H₂S, el H₂ y otros hidrocarburos y gases ligeros.

Diferentes filtros de membranas han sido probados para la separación del sulfuro de hidrógeno y el dióxido de carbono. Los equipos y la operación de este método son simples, sin embargo, la eficiencia de la separación por membrana es baja y el costo de la misma elevado, además hay que aplicar grandes presiones. Sin embargo es una tecnología en constante mejora e innovación por lo que no debería descartarse su uso en el mediano plazo (Llaneza y col. 2010).

Métodos biológicos

Se llevan a cabo mediante la acción de determinados microorganismos tales como bacterias sulfuroxidantes que llevan el sulfuro a azufre metálico (Fernández y Montalvo, 2005). Se conocen muchos microorganismos que habitan en lugares húmedos y que son consumidores de H₂S. como fuente nutricional cubriendo sus alrededores con azufre elemental. Estos tienen preferencia por las aguas residuales y nunca dejan de crecer y multiplicarse mientras las condiciones ambientales lo permitan, pueden vivir tanto en presencia como en ausencia de oxígeno, aunque hay ciertos factores que favorecen su existencia como son: Humedad, presencia de oxígeno y líquido residual para poder transportarse.

Un ejemplo de este tipo de procesos es la tecnología conocida como filtros de percolación. Que utiliza biotecnologías que reducen considerablemente las concentraciones de H₂S hasta niveles de 50 ppm. Como parte esencial de estos sistemas se pueden emplear algas a nivel micro o macro.

Métodos de eliminación de CO₂

La eliminación de CO₂ incrementa el valor calorífico y lleva a una calidad del gas similar a la del gas natural. Lo más importante cuando se aplican éstas técnicas de eliminación, es minimizar las pérdidas de metano por razones económicas o ecológicas, ya que la contaminación por este gas es importante.

La separación criogénica es utilizada con base en el punto de fusión del CH₄, que es de aproximadamente -160°C a 1 atm, mientras que el CO₂ tiene un punto de -78°C, El CO₂ puede ser eliminado entonces, enfriando la mezcla del biogás a elevada presión. El biogás producido contendría más de 97% de metano pero los elevados costos y la inversión necesaria han limitado su aplicación (Llaneza y col. 2010).

La separación por membranas sólidas, fabricadas a partir de polímero acetato-celulosa, presenta permeabilidades del CO₂ y el H₂S de 20-60% mayores a las del metano; sin embargo, requieren de presiones de más de 25 bar, además el flujo de gas a través de la membrana se incrementa proporcionalmente con la diferencia de presión, de esta manera

la membrana se reduce y hay un máxima de presión que puede resistir. Se pueden provocar pérdidas de metano por las moléculas que quedaron atrapadas en la membrana, pero esa energía puede recuperarse si es posible la quema de la membrana en la cogeneración.

Otras técnicas están en investigación, tales como la conversión química, por ejemplo, la reacción catalítica de CO_2 y H_2 a CH_4 . Este proceso es extremadamente costoso y la necesidad de H_2 hace que el proceso no sea adecuado.

Otra alternativa es el enriquecimiento del biogás a través de la recirculación de CO_2 . Los lodos provenientes de la cámara de digestión se ponen en contacto con el aire. El dióxido de carbono que está disuelto en los lodos es desabsorbido. El lodo pobre en CO_2 se introduce de nuevo en la cámara donde más dióxido de carbono es absorbido en los lodos, resultando en biogás enriquecido de metano. Pruebas realizadas en Suecia, han demostrado que es posible diseñar un sistema que incremente el contenido de metano al 95% con pérdidas de menos de 2% (Llaneza y col., 2010).

Métodos de purificación comerciales

La empresa internacional Greenlane® con plantas en Inglaterra, Suecia y Alemania, y con distribuidores en todos los continentes, ofrece una combinación entre el sistema avanzado de tanques de agua presurizada y filtración biológica para eliminar el dióxido de carbono al mismo tiempo que el ácido sulfhídrico, amoníaco y otros contaminantes.

La compañía GTS® tiene más de 50 años de experiencia en la purificación y tratamiento de biogás y ofrece diferentes paquetes modulares para la eliminación de componentes específicos, que pueden ser ensamblados en una línea para tener la solución completa. Por ejemplo, su sistema GPP® consiste de 4 pasos: El biogás es comprimido a una presión de 16-25 bar y en seguida enfriado a -25°C . Durante este proceso, la humedad, el H_2S , siloxanos y otros contaminantes, son totalmente removidas. Después, el gas purificado pasa por un filtro coalescente y luego llevado a través de SIOXIA® para eliminar los contaminantes que restaban hasta los niveles especificados. Finalmente, el gas es enfriado hasta -78°C y el CO_2 líquido es colectado.

Una vez que el biogás ha sido depurado ya tiene el poder calorífico apto para poder llevarlo al proceso de comercialización como combustible vehicular a través de los siguientes sistemas de despachado.

Estación de llenado lento: En este sistema, un pequeño compresor conectado directamente a la red de gas, comprime y llena directamente los tanques a través de tubos flexibles de llenado. El vehículo no puede arrancar durante el lleno. Una vez que la presión final es alcanzada, el compresor se apaga automáticamente. Este sistema es recomendado para flotillas que regresan a una central o para vehículos privados los cuales pueden ser recargados en casa ya que el tiempo usual de llenado es de 6-8 horas.

Estación de llenado rápido (Figura 2.23): Es este tipo de estaciones, el gas siempre se encuentra a presiones de 200-300 bar en cilindros de almacenamiento especiales que sirven de intermediario. Después una unidad despachadora lleva el gas comprimido hasta el vehículo en un par de minutos. Esto significa que siempre y cuando haya un banco de almacenamiento previo, una estación de este tipo puede alcanzar los tiempos de despachado de las estaciones de gasolina convencionales. En términos generales, una estación de llenado rápido puede incrementar hasta en 20% la capacidad de almacenamiento de los vehículos debido a que cuando entra el gas al tanque comprime rápidamente el que se encuentra dentro, aumentando la temperatura y reduciendo la

densidad. Esto no se manifiesta cuando se llenan tanques totalmente vacíos ya que se produce el efecto contrario: Un gas con presión muy alta entra en contacto con un medio más grande y se expande rápidamente lo que baja su temperatura y aumenta su densidad.

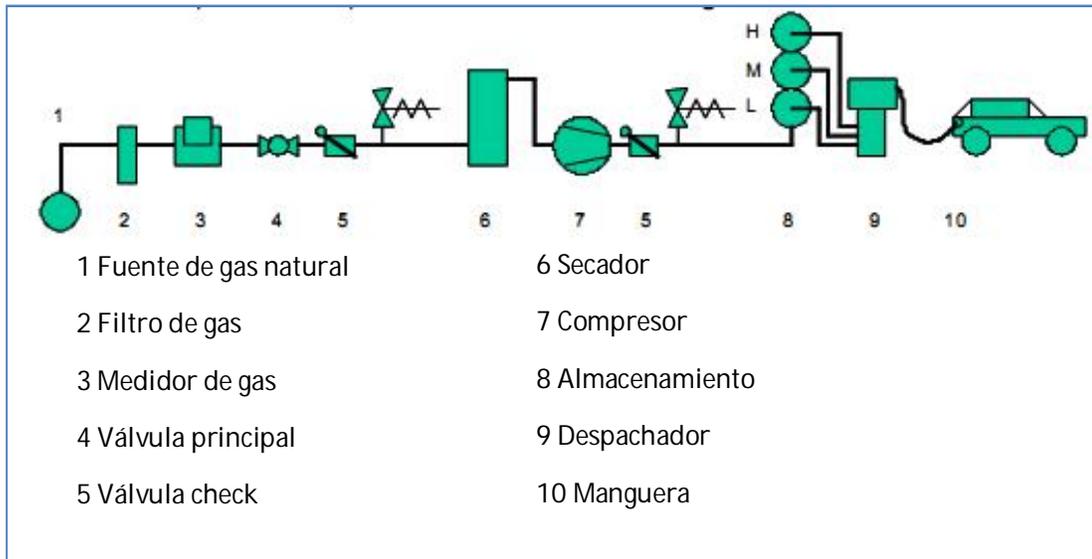


Figura 2.23 Esquema de una estación de llenado rápido de gas natural para automóviles (Ferré y Fuchs, 2009)

La diferencia entre los dos tipos de estaciones de llenado radica en que la de llenado lento no cuenta con un almacenamiento intermedio ni una unidad despachadora especial por lo que es más económica (Matic, 2005).

Estaciones madre-hija de llenado (Figura 2.24): Son muy comunes en ubicaciones fuera de los alcances de la red. Lo que se hace es transportar el gas natural en tanques a alta presión (hasta 350 bar) llenados en una instalación central, hasta instalaciones *hijas* que se encuentren en la periferia. Los bancos de tanques de almacenamiento son transportados por camiones hasta las estaciones periféricas a un costo relativamente bajo.



Figura 2.24 Tráiler para transportar bancos de gas natural (Ferré y Fuchs, 2009)

La condición ideal para aprovechar todas las ventajas del Gas Natural Vehicular (GNV) es que se utilice un motor conforme a sus propiedades. Desafortunadamente aunque existen desarrollos de motores para uso exclusivo de GNV, estos no se han producido ni se han

comercializado en la misma escala de los diésel o gasolina que continúan predominando. Algunos fabricantes que han desarrollado y comercializado vehículos exclusivos para GNV son: Ford, Honda, General Motors y Mercedes Benz, en el mercado de los vehículos livianos, y Renault y Volvo en el de buses de transporte público. Además, Caterpillar y Cummins han desarrollado sus motores para equipamiento industrial (Matic, 2005).

Uno de los obstáculos que se tienen que superar a fin de que el uso del GNV comience a generalizarse en todas partes, es la creación de una infraestructura de estación de servicio, que puedan proporcionar una amplia disponibilidad de combustible. Ante esta situación, la industria del GNV creó sistemas duales de conversión de vehículos, que permiten que el cambio entre combustibles se realice de forma manual o automática cuando se detecta que el gas en el almacenamiento está por agotarse, evitando que los usuarios tengan que recorrer enormes distancias para cargar combustible en caso de una emergencia o situación extraordinaria (Hollembek, 2005).

Los sistemas de conversión están actualizados siguiendo la evolución de la tecnología introducida por la industria automotor, lo que permite que todo el universo de vehículos sea convertible a GNV. Para estudiar la evolución de los sistemas de conversión se definen las siguientes categorías o generaciones tecnológicas (Ferré y Fuchs, 2009):

Sistemas de combustible GNV aspirado y de lazo abierto (También denominados de primera y segunda generación): La primera generación de conversión a GNC es la que se destinó a los vehículos con carburador y encendido con platinos y bobina de ignición.

Se introducía la mezcla de gas/aire en la proporción definida mecánicamente, mediante un dispositivo auxiliar mezclador colocado en la entrada de aire al motor. Se sigue utilizando en vehículos con carburador (Ford Falcon, Fiat Uno, Peugeot 404, Peugeot 504, Peugeot 505, Renault 9, Renault 12, Renault 18, etc.)

Para los vehículos que sustituyeron la alimentación de combustible al motor con carburador por el sistema de inyección, la tecnología GNC introdujo dispositivos electrónicos que emulan, es decir imitan las señales que envían a la computadora del vehículo, los componentes del sistema de inyección de combustible (inyectores, sensores, etc.).

Sistema de combustible GNV de lazo cerrado (También denominado de tercera generación): Este sistema se diferencia del de lazo abierto de modo tal que los sensores del motor actúan sobre el control electrónico del equipo de gas, que a su vez acciona un motor de "paso a paso" que dosifica electrónicamente el gas que necesita el motor de acuerdo con el requerimiento de marcha para un óptimo funcionamiento.

Sistema de combustible GNV de inyección secuencial (También denominado de Cuarta o Quinta Generación): Es el sistema de mayor avance tecnológico y su funcionamiento es similar al del sistema de inyección secuencial de gasolina del vehículo a convertir. El regulador entrega gas a alta presión y se inyecta a cada cilindro en forma secuencial, tal como ocurre con la gasolina. El funcionamiento es controlado por la computadora del vehículo que genera las señales de inyección y por una computadora propia del equipo de conversión que las interpreta para comandar la inyección de gas. De este modo el funcionamiento del vehículo es igual en gas que en gasolina. Este sistema es el que utilizan las fábricas automotrices para sus vehículos a gas originales y está disponible en México sólo a través de importadores como Incogás S.A. y Gazel®.

En la Figura 2.25 se pueden observar algunos de los componentes de estos sistemas, que se usan en modelos de vehículos a partir de 2008, o algunos anteriores que ya contaban con un módulo secuencial de inyección y diseños avanzados.

La utilización de GNV en los vehículos presenta en general las siguientes ventajas con respecto a la gasolina:

- **Seguridad:** Es más ligero que el aire, por tanto, en caso de fugas o accidentes se disiparía fácilmente en la atmósfera evitando explosiones.
- **Sustentabilidad:** Su combustión es más limpia que la de la gasolina por lo que reduce las emisiones.
- **Economía:** La utilización de metano es una opción económica pues tiene un mayor octanaje (110) que la gasolina Magna (87) o la Premium (92), lo que hace que la combustión sea más eficiente. Cuando la relación de compresión en los motores es elevada, se minimizan las explosiones o cascabeleos ya que el combustible se enciende en el momento óptimo, esto reduce el daño en el motor y por ende alarga su vida útil. Reduce los mantenimientos como el cambio de aceite y bujías por su composición tan pura. Puede ser comercializado a un menor precio que la gasolina.

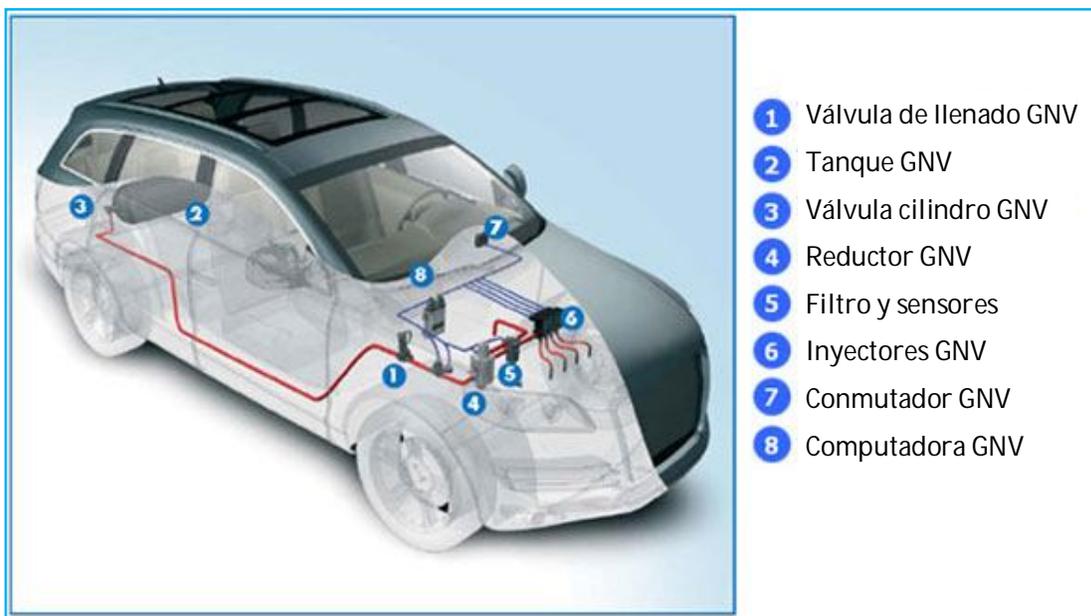


Figura 2.25 Componentes de un sistema de conversión a metano con el automóvil (Ferré y Fuchs, 2010)

2.8 Evaluación financiera de proyectos de inversión

Para realizar la evaluación financiera de pre-factibilidad de cualquier proyecto se deben considerar los siguientes aspectos:

Inversiones fijas: Las inversiones en activo fijo son todas aquellas que se realizan en los bienes tangibles que se utilizarán en el proceso de transformación de los insumos o que sirvan de apoyo a la operación normal del proyecto. Constituyen activos fijos entre otros, los terrenos y recursos naturales, las obras físicas (edificios industriales, salas de venta, oficinas administrativas, vías de acceso, estacionamientos, bodegas, etc.); el equipamiento

de planta (maquinaria, muebles, herramientas, vehículos y mobiliario general), y la infraestructura de servicios de apoyo (agua potable, desagües, red eléctrica, comunicaciones, energía, etc.).

Para efectos contables, los activos fijos, con la excepción de los terrenos, están sujetos a depreciación, la cual afectará al resultado de la evaluación por su efecto sobre el cálculo de los impuestos. Los terrenos no sólo no se deprecian, sino que muchas veces tienden a aumentar su valor por la plusvalía generada por el desarrollo urbano que se genera a su alrededor como en sí mismos. También puede darse el caso de una pérdida en el valor de mercado de un terreno, como es el que correspondería cuando se agota la provisión de agua de riego o cuando el uso irracional de tierras de cultivo daña su rendimiento potencial (Sapag y Sapag, 1991).

Los activos fijos son bienes que poseerá la compañía o que se le adeudan a ésta. Son inversiones de largo plazo cuya conversión a efectivo representaría una reorientación de la empresa (Tarquin y Leland, 2006). También se conocen en la contabilidad financiera como recursos tangibles, pues son inversiones que se pueden ver, tocar y depreciar.

Inversión inicial diferida: Las inversiones diferidas son todas aquellas que se realizan sobre activos constituidos por los servicios o derechos adquiridos para la puesta en marcha del proyecto. Constituyen inversiones intangibles susceptibles de amortizar que, al igual que la depreciación, resta flujo de efectivo de la base para el cálculo de los impuestos. Los principales ítems que configuran esta inversión son los gastos de organización, patentes y licencias, los gastos de puesta en marcha, la capacitación, los imprevistos, los intereses y los cargos financieros preoperativos (Sapag y Sapag, 1991).

Se incluyen gastos de organización, que se dividen en el pago de los derechos para constituir la empresa que operará el proyecto y los gastos de puesta en marcha, que son todos aquellos que deben realizarse al iniciar el funcionamiento de las instalaciones, hasta que las mismas alcancen su funcionamiento adecuado. A pesar de ser gastos operativos requieren un desembolso previo al momento de la puesta en marcha del proyecto. También se incluyen en esta categoría los pagos de remuneraciones, arriendos, publicidad, seguros y cualquier otro gasto previo que se realice.

Inversiones en circulante: Las inversiones en activos circulantes necesarias para la ejecución del proyecto dentro de un ciclo productivo, constituyen lo que en evaluación de proyectos se denomina Capital de Trabajo.

Un ciclo productivo es el proceso que se inicia con el primer desembolso para cancelar los insumos de la operación y termina cuando se obtiene el efectivo por la venta de los insumos transformados en productos terminados, quedando efectivo nuevamente para la cancelación de la nueva orden de insumos (Sapag y Sapag, 1991).

El cálculo del capital de trabajo óptimo se sustenta en la suposición de que tanto un déficit como un exceso de liquidez representan costos para las compañías. Para explicar el primer caso se debe tomar en cuenta que dentro de cada periodo de operación la empresa tiene gastos y costos de la operación misma que debe subsanar de manera obligatoria, por lo que en caso de no tener el efectivo disponible, incurrirá en multas o sanciones que representarán un egreso. Si la empresa recurre a un préstamo, deberá cubrir el costo de capital que el banco o inversionista fije de manera proporcional al tiempo de pago. En el

caso de tener un exceso de capital se estará incurriendo en costos de pérdida de oportunidad, debido a que se mantiene dinero ocioso que de ser invertido en alguna cuenta o proyecto podría generar una tasa de interés a favor de la empresa.

Para mantener un nivel óptimo de efectivo se debe contar con información muy precisa acerca de las fuentes de financiamiento disponibles para la empresa, los parámetros de la competencia y los proveedores, así como la estructura interna de costos que se deriven de la operación diaria.

Para los alcances de este estudio se limitará al método del periodo de recuperación que consiste en determinar el monto que representarían los costos de operación que se deben financiar desde el momento en que se efectúa el primer pago por la adquisición de la materia prima hasta el momento que se recauda el ingreso por la venta de los productos (Sapag y Sapag, 1991).

$$\text{Capital de Trabajo} = Cp (\text{Duración ciclo}) \quad (2-2)$$

Donde Cp es el costo promedio diario de operación y la duración del ciclo, por supuesto se escribe en días.

Costos: Los costos se pueden dividir en dos categorías: Fijos y variables. Los primeros son conocidos como *gastos* y la suma de los segundos se conoce como *costo de lo vendido*.

Los costos fijos son aquellos que no varían con respecto a los niveles de producción, es decir, producen erogaciones para la empresa de la misma magnitud si se produce al 5 o al 100% de la capacidad de la planta. Los variables por su parte, están íntimamente relacionados con cada unidad producida (Baca, 2005).

Estado de Resultados: El estado de resultados es uno de los estados financieros más importantes. Permite hacer un análisis de rentabilidad, ya que resume las utilidades o las pérdidas de la corporación (Tarquin y Blank, 2006).

Interés significa la renta que se paga por utilizar dinero ajeno, o bien, la renta que se gana al invertir dinero propio. Puesto que el dinero puede ganar un cierto interés cuando se invierte por un cierto periodo, es importante reconocer que un peso que se reciba en el futuro tendrá un valor diferente del que tiene actualmente. Un peso que se tenga actualmente puede acumular interés durante un año, mientras que un peso recibido en un año no generaría ningún interés. Por consiguiente, el valor del dinero a través del tiempo significa que cantidades iguales de dinero no tienen el mismo valor, si se encuentran en puntos diferentes del tiempo y si la tasa de interés es mayor que cero.

La *Tasa Interna de Rendimiento*, como se le llama frecuentemente, es un índice de rentabilidad ampliamente aceptado (Coss Bu, 2008). Está definida como la tasa de interés que reduce a cero el valor presente, el valor futuro, o el valor anual equivalente de una serie de ingresos y egresos. Es decir, la tasa interna de rendimiento de una propuesta de inversión es aquella tasa de interés i^* que satisface cualquiera de las siguientes ecuaciones:

$$\sum_{t=0}^n \frac{S_t}{(1+i^*)^t} = 0 \quad (2-3)$$

$$\sum_{t=0}^n S_t (1 + i^*)^{n-t} = 0 \quad (2-4)$$

Donde:

$S_t =$ flujo de efectivo neto del periodo t

$n =$ vida de la propuesta de inversión

Siendo la TIR una medida de la rentabilidad del proyecto sobre flujos de efectivo en el tiempo, lo primero es elaborar el estado de flujo de efectivo.

Como se ha mencionado antes, la depreciación representa un costo ficticio, de hecho se considera un flujo positivo para el proyecto, además de la reducción de la carga fiscal por la reducción de la base gravable para el impuesto sobre la renta (ISR) y la repartición de utilidades a los trabajadores (RUT). En este punto lo que se evalúa es en realidad el dinero que entra o sale de la empresa a lo largo del tiempo, es por esto que la TIR es una medida de rentabilidad mucho más efectiva que los índices de rentabilidad del estado de resultados. Además una buena planeación fiscal puede reducir en gran medida los impuestos a pagar presentando resultados muy bajos o incluso negativos, lo que hace completamente estéril la medida de utilidades netas en la eficiencia de la empresa.

La manera más dura de evaluar un proyecto de inversión con respecto al tipo de financiamiento, es tomar los resultados de no recibir el mismo, es decir, evaluar la propuesta como si se fuera a capitalizar totalmente por la empresa, así la inversión inicial necesaria se tomará como un flujo negativo de efectivo al 100% y no se reducirá la base gravable para el cálculo de impuestos, lo que generalmente eleva la TIR, volviendo al proyecto más atractivo, de lo que en realidad representa.

Para que una inversión sea rentable, el inversionista (una corporación o individuo) espera recibir una cantidad de dinero mayor a lo que originalmente se invirtió. En otras palabras debe ser posible obtener una tasa de retorno o rendimiento sobre la inversión. La tasa razonable recibe el nombre de *tasa mínima de retorno atractiva* (TMRA) y es superior a tasas que ofrecen los bancos o alguna inversión segura que implique un riesgo mínimo.

La TMRA también recibe el nombre de tasa base para proyectos; es decir, que para que se considere viable desde el punto de vista financiero, la TIR esperada debe ser mayor o igual al TMRA o tasa base. La TMRA es una tasa establecida por la dirección (financiera) y se utiliza como criterio para valuar la TIR de una alternativa, en el momento de tomar decisiones de aceptación o rechazo (Tarquin y Blank, 2006).

Para determinar un valor para la TMRA se debe incluir el concepto costo de capital. En general, el capital se obtiene de dos formas, por financiamiento de patrimonio o por financiamiento de deuda. El primero se refiere a utilizar fondos propios como las cuentas de efectivo corriente, ventas de existencia o utilidades acumuladas. El financiamiento de deuda se refiere a los préstamos de fuentes externas, en donde se reembolsa el capital y los intereses conforme a un programa como los bonos, préstamos, hipotecas, capital de riesgo etc.

El *costo promedio ponderado del capital* (CPPC) es un balance de los diferentes costos de financiamiento que utiliza una empresa y el monto de participación al que corresponde. El

valor de la TMAR debe ser mayor que el CPPC y algunos factores a considerar son: riesgo del proyecto, oportunidad de inversión, estructura tributaria, limitación de capital, tasas del mercado y la situación macroeconómica en la región.

Valor Presente Neto: El valor presente neto es uno de los criterios económicos más ampliamente utilizados en la evaluación de proyectos de inversión. Consiste en determinar la equivalencia en el tiempo cero de los flujos de efectivo futuros que genera un proyecto y comparar esta equivalencia con la inversión inicial. Cuando dicha equivalencia es mayor que el desembolso inicial, entonces, es recomendable que el proyecto sea aceptado (Coss Bu, 2008).

Para transportar los flujos de efectivo a través del tiempo, al periodo cero, se utiliza la siguiente expresión:

$$VPN = S_0 + \sum_{t=1}^n \frac{S_t}{(1+TMRA)^n} \quad (2-5)$$

Donde:

VPN = valor presente neto

S₀ = inversión inicial

S_t = flujo de efectivo en el periodo t

n = número de periodos de la vida del proyecto

TMRA = Tasa mínima de rendimiento atractiva

Índice Beneficio-Costo: La razón Beneficio-Costo se considera el método de análisis fundamental para proyectos del sector público. Se diseñó para aumentar la objetividad en la evaluación de proyectos que no generen una rentabilidad comercial sobresaliente y sí una rentabilidad social, ambiental y política.

Existen diversas variaciones del índice B/C pero el enfoque fundamental es el mismo. Todos los cálculos de costos y beneficios deberán convertirse a una unidad monetaria de equivalencia común en el tiempo.

El modelo que más se adapta al proyecto es el siguiente:

$$I_{B/C} = \frac{\text{Beneficios netos} - \text{contrabeneficios}}{\text{inversión inicial}} \quad (2-6)$$

2.9 Protocolo de Kioto

Los gobiernos acordaron en 1997 el Protocolo de Kioto del Convenio Marco sobre Cambio Climático de la ONU (UNFCCC). El acuerdo ha entrado en vigor el 16 de febrero de 2005, sólo después de que 55 naciones que suman el 55% de las emisiones de gases de efecto invernadero lo han ratificado. En la actualidad 166 países, lo han ratificado, como lo indica el barómetro de la UNFCCC.

El objetivo del Protocolo de Kioto es conseguir reducir un 5,2% las emisiones de gases de efecto invernadero globales sobre los niveles de 1990 para el periodo 2008-2012. Este es el único mecanismo internacional para empezar a hacer frente al cambio climático y minimizar sus impactos.

Los instrumentos creados en el Protocolo de Kioto son el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), Implementación Conjunta (IC) y el mercado para la Transacción de Emisiones. El primero toma especial relevancia para el desarrollo de este trabajo ya que los proyectos que se basan en la digestión anaerobia en el entorno nacional, cumplen con los requisitos para acceder al mercado de carbono.

2.10 Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL)

El MDL permite realizar proyectos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en países que no disponen de objetivos de emisiones según la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y el Protocolo de Kioto, ni son firmantes.

El MDL fomenta las inversiones responsables desde los países industrializados hacia los países en vías de desarrollo por medio de aplicar los rigurosos criterios prescritos por el consejo ejecutivo del MDL de la CMNUCC:

- Desarrollo sustentable: Los proyectos deben cumplir los requisitos para el desarrollo medioambiental, social y económico
- Adicionalidad: Los proyectos deben demostrar que sin el MDL en funcionamiento no podrían avanzar. Deben ofrecer recortes o evitar las emisiones más allá de las 'operaciones cotidianas'
- Aprobación del país anfitrión: Los proyectos deben aprobarse por la autoridad nacional designada en el país 'anfitrión' del proyecto
- Evaluación del impacto medioambiental (EIM): Determina si el proyecto daña o no al entorno

Los gobiernos u organizaciones utilizan los certificados de reducción de emisiones (CRE) de los proyectos del MDL como ayuda al cumplimiento de los objetivos de emisión de gases de efecto invernadero del Protocolo de Kioto.

Los proyectos del mecanismo de desarrollo limpio se deben validar antes de su comienzo y un tercero independiente debe verificarlos posteriormente cada año. Para el MDL, estos organismos se denominan entidades operativas designadas (EOD) y deben contar con la acreditación del consejo ejecutivo del MDL de la CMNUCC.

Ciclo del Proyecto MDL

Paso 1: Producción del documento de diseño del proyecto (DDP)

- Diseño del Proyecto
- Preparación del DDP

Paso 2: Validación/Aprobación para cada parte involucrada

- Selección de EOD
- Validación
- Aprobación por la parte anfitriona
- Producción de informe de validación.

Paso 3: Registro

- Solicitud para registro
- Determinación de aprobación
- (Si es probado) Registro
- (Si no es aprobado) Solicitud de una revisión

Paso 4: Implementación/Operación del monitoreo del Proyecto

- Implementación del proyecto
- Monitoreo

Paso 5: Verificación/Certificación

- Selección del DOE
- Verificación
- Certificación/ Solicitud para la emisión

Paso 6: Emisión de CER

- (Si es aprobado) Emisión de CERs
- (Si no es aprobado) Solicitud para revisión
- Deducción de "cuota de beneficios"

Paso 7: Expedición (Distribución de CERs)

- Expedición
- Distribución de CERs

2.11 Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética

El objetivo de esta ley es establecer las bases para la generación de energía eléctrica con base en las tecnologías limpias que hacen posible el uso de energía renovable. En el marco de esta estrategia se definen puntos particulares para cada tecnología contemplada y por su puesto hay una sección dedicada a Bioenergéticos.

2.12 Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos

Algunos de los objetivos de esta ley son:

- Promover la producción de Bioenergéticos a partir de actividades agropecuarias, forestales, algas, procesos biotecnológicos y enzimáticos del campo mexicano.
- Desarrollar la producción, comercialización y uso eficiente de Bioenergéticos para la reactivación del sector.
- Promover el desarrollo regional.
- Procurar la disminución de la emisión de contaminantes.

Según esta ley, los Bioenergéticos son combustibles obtenidos de biomasa, como la materia orgánica proveniente de las actividades agrícolas, pecuarias, silvícolas, acuacultura, algacultura, de los residuos, de microorganismos, de enzimas o sus derivados que cumplan con las especificaciones y normas vigentes dispuestas por las autoridades competentes. Se clasifican de la siguiente manera:

1. Biodiésel: Combustible que se obtiene por la transesterificación⁸ de aceites de origen vegetal o animal.
2. Biogás: Mezcla de gases producidos en la descomposición de la materia orgánica.

⁸ Síntesis orgánica mediante la cual se lleva a cabo el intercambio de un grupo alcoxi de un éter por otro alcohol, produciendo un éter diferente y un nuevo alcohol.

Para desarrollar actividades de producción, almacenamiento, transporte y distribución por ductos, así como la comercialización de Bioenergéticos, las entidades se tendrán que sujetar a permisos sólo establecidos por la SENER.

2.13 Normas Oficiales Mexicanas

Para el desarrollo de este proyecto se deben contemplar los lineamientos federales y estatales en materia, así como también a las siguientes Normas Oficiales Mexicanas (NOMs).

- a) Para el aprovechamiento del biogás como combustible en automotores:
 - i. NOM-001-SECRE-2010: Características del gas natural. (Comisión reguladora de energía).
 - ii. NOM-002-SECRE-2002: Instalaciones para aprovechamiento de GN.
 - iii. NOM-003-SECRE-2002: Distribución de Gas Natural por ductos.
 - iv. NOM-004-SECRE-1997: Gas Natural licuado, Instalaciones vehiculares.
 - v. NOM-005-SECRE-1997: Gas Natural Licuado, Estaciones de servicio.
 - vi. NOM-006-SECRE-1999: Odorización del Gas Natural.
 - vii. NOM-008-SECRE-1999: Control de la corrosión en tuberías de GN.
 - viii. NOM-009-SECRE-1999: Monitoreo, detección y clasificación de fugas.
 - ix. NOM-010-SECRE-2002: Gas natural comprimido para automotores, requisitos mínimos de seguridad para estaciones de servicio.
 - x. NOM-011-SECRE-2002: Gas natural comprimido, requisitos mínimos en instalaciones vehiculares.
 - xi. NOM-031-SCFI-1994: Requisitos mínimos de seguridad para estaciones de servicio y vehiculares de gas natural. (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial).
 - xii. NOM-094-SCFI-1994: Instalaciones vehiculares para uso de GN licuado en automotores.
- b) Para el aprovechamiento de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) como sustrato para la digestión se debe tener en cuenta la siguiente normatividad:
 - i. NMX-AA-015-1985: Método de cuarteo para RSU.
 - ii. NMX-AA-022-1985: Selección y cuantificación de subproductos.
 - iii. NMX-AA-061-1985: Determinación de la generación.
- c) Las siguientes están vigentes exclusivamente en el Estado de México, sin embargo son una buena referencia:
 - i. NTEA-001-SEGEM-AE-2003: Establece los requisitos para el tratamiento y disposición final de residuos orgánicos generados en centros de sacrificio para consumo humano.
 - ii. NTEA-006-SMA-RS-2006: Establece los requisitos para la producción de mejoradores de suelo elaborados a partir de RSU.
- d) Por último aplican las siguientes normas generales para cualquier entidad que emita agua residual.
 - i. NOM-001-SEMARNAT-1996: Límites máximos permisibles de contaminantes en agua y bienes nacionales.
 - ii. NOM-002-SEMARNAT-1996: Límites máximo permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

Si bien es cierto que se han presentado una gran cantidad de normas y reglamentos a los que hay que ajustarse, además de los que no se han mostrado, éstas sirven de referencia para el óptimo desarrollo de proyectos; para que puedan cumplir con los dictámenes técnico-ambientales que se requieren para los permisos de construcción y además para dimensionar de mejor forma las instalaciones, ya que todos los proveedores de equipos deben ajustarse a normatividades como las presentadas y no se estará exigiendo algo que ellos no puedan cumplir y que sea económicamente viable de producir.

2.14 Análisis ambiental de un proyecto

El estudio ambiental se enfoca principalmente en dos temas: el análisis del impacto del proyecto sobre el medio ambiente (con el fin de minimizar afectaciones causadas por el proyecto) y el análisis del efecto del entorno sobre el proyecto, éstos se resumen en un documento conocido como Estudio de Impacto Ambiental (EIA), el cual es requisito indispensable para acceder a fondos de la banca de desarrollo.

En el caso de proyectos para el manejo de residuos sólidos urbanos, la importancia de los impactos ambientales asociados depende de las condiciones particulares de la localización, geomorfología y demás características del medio físico, biótico y social, así como de las características de los materiales a tratar. De manera general, un proyecto para RSU puede producir impactos sobre las aguas, el aire, el suelo, la flora, la fauna y los ecosistemas.

Para medir estos impactos, el proceso que recomienda el Banco Interamericano de Desarrollo consta de tres niveles:

Evaluación de Impacto Preliminar (EIP). Resulta de una lista de verificación, a partir de informaciones y datos existentes, y revela si es necesario, por la magnitud y trascendencia de los impactos de una actividad dada, realizar una evaluación más detallada.

Evaluación complementaria de impactos (ECI). Se realiza cuando es necesario profundizar los estudios sobre el impacto de algún determinado efecto sobre el medio o sobre la salud humana. En general, en este tipo de evaluación se usan investigaciones básicas para determinar la acción de una sustancia sobre un medio específico.

Estudio de Impacto Ambiental (EIA): La elaboración de este estudio, cuya función primordial es ayudar a la toma de decisiones, se constituye por un conjunto de etapas y tareas a cumplir, que genéricamente se concretan en los siguientes rubros (SEMARNAT, 2002):

1. Descripción del proyecto o actividad
2. Desglose del proyecto o actividad en sus partes elementales
3. Descripción del estado que caracteriza al ambiente previo
4. Elementos más significativos del ambiente
5. Ámbito de aplicación del Estudio de Impacto Ambiental
6. Identificación de impactos
7. Alternativas
8. Identificación de medidas de mitigación
9. Valoración de impactos residuales
10. Plan de vigilancia y control

Es posible descargar los formatos o guías correspondientes a la actividad que se desea realizar, directamente del sitio web de SEMARNAT para obtener más información acerca de los trámites y los requisitos particulares para cada tipo de proyecto.