

Capítulo 2.

Producción de biogas a partir de residuos

Esta página se dejó en blanco intencionalmente

2. Producción de biogás a partir de residuos

Introducción.

La fermentación anaeróbica se ha venido utilizando desde hace varios siglos en Europa y Asia. Las primeras noticias de su existencia fueron reportadas por Volta en 1776, cuando este descubrió la formación de un gas combustible sobre pantanos, lagos y aguas estancadas y relacionó la formación de biogás con la cantidad de materia orgánica depositada en su fondo (Aqualimpia, 2009).

La primera planta de digestión anaeróbica fue construida en Bombay, India en 1859, extendiéndose su uso en países cercanos como China, Taiwán, Corea, Tailandia, Kenya y Sudáfrica, se estima que se han construido más de 6 millones de digestores solo en estos países, el uso de estos se extendió hasta Inglaterra en 1895, cuando el biogás recuperado fue usado como combustible en las lámparas de las calles de Londres.

Los residuos orgánicos que son vertidos indiscriminadamente al ambiente se degradan anaeróbicamente produciendo biogás que emana incontroladamente a la atmósfera. El biogás está compuesto en un 60% de gas metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2); y concentraciones mínimas de compuestos orgánicos no metálicos (NMOC). El CH_4 y el CO_2 son considerados Gases de Efecto Invernadero (GEI) que contribuyen al calentamiento global. El metano presente en el biogás es considerado como un gas que aporta enormemente al calentamiento global pues tiene un potencial de calentamiento 21 veces mayor que el CO_2 .

Los rellenos sanitarios son en la actualidad la forma más utilizada para disponer la basura en nuestro país. Actualmente existen millones de toneladas de basura confinadas bajo el subsuelo nacional que, en menor o mayor grado, están emitiendo gases a la atmósfera y líquidos al subsuelo. La posibilidad técnica de convertir estos gases en electricidad está plenamente probada; la tecnología para ello existe comercialmente, pero la práctica de aplicarla no está suficientemente difundida.

Con la basura del país, confinada en sitios de disposición final de 1998 a 2003, se produjeron gases con los que se hubieran podido generar cerca de 80 MW, e incorporar 16MW adicionales con la nueva basura que, año con año, se hubiese acumulado en los rellenos existentes. De esta forma, a lo largo de diez años la capacidad total de generación eléctrica hubiera alcanzado los 240 MW (Arvizu, 2003).

En la primera parte del capítulo, repasamos cómo la energía solar es la misma energía que utilizamos todos los seres vivos y la materia orgánica, definimos la biomasa así como al biogás y estudiamos sus características fisicoquímicas. A partir de esas características estudiaremos cuales son los usos que le podemos dar a ese biogás enfocándonos en su aprovechamiento energético, describimos las etapas de la digestión anaeróbica de donde se obtiene el biogás y enunciamos las condiciones que se deben tener para optimizar el proceso.

En la segunda parte, describimos los procesos inducidos para generación de biogás a partir de residuos que se utilizan actualmente. En primer lugar estudiamos a las celdas de los rellenos sanitarios, cuya operación permite mantener condiciones anaeróbicas y generar biogás, aunque un poco ineficiente y por otro lado tenemos a los digestores, cuya técnica y uso no son nuevos, pero permiten optimizar la generación de metano en la descomposición de la materia. Al final de esta parte comparamos ambas técnicas para analizar sus ventajas y desventajas.

2.1 Biogás

2.1.1 Biomasa

La energía del planeta proviene del Sol, esta energía mediante la fotosíntesis¹ entra en la base del ecosistema y se almacena y fluye a lo largo de la cadena trófica² (Fig. 2.1), comenzando desde el Sol hasta los organismos descomponedores y los elementos químicos principales (C, H, O, N, P), pasan a través de la cadena alimenticia mediante sus ciclos correspondientes.

Figura 2.1 Flujo de energía procedente del Sol

Fuente: Autor a partir de Castells, 2005.

La biomasa es el conjunto de materia energética, ya sea de origen vegetal, animal o procedente de su transformación natural o artificial. Todos los tipos de biomasa provienen de

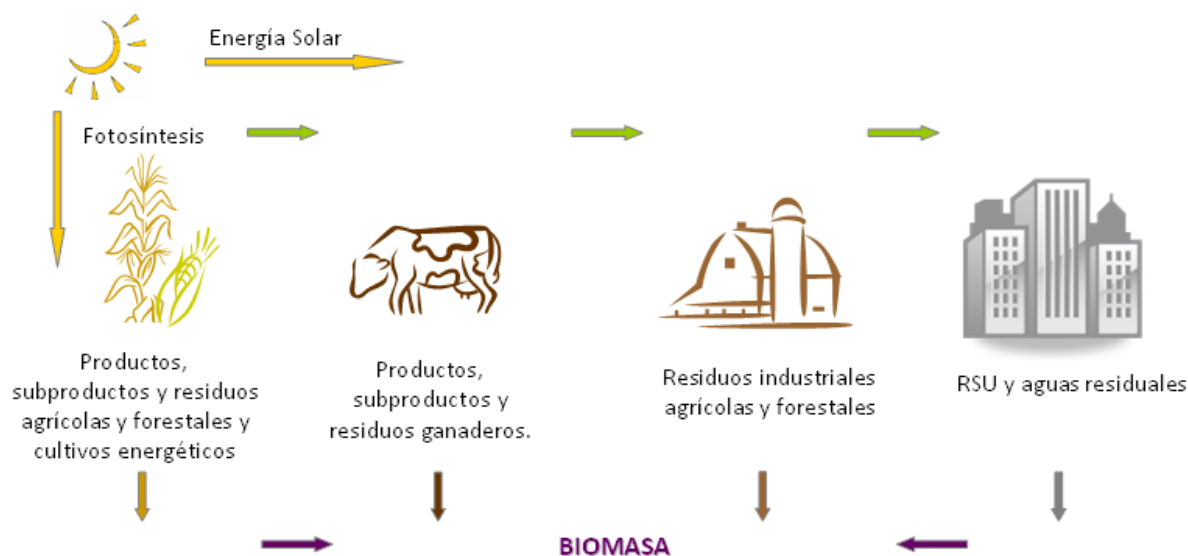
¹ Proceso por el cual unas partículas (cloroplastos) presentes en las células vegetales, son capaces de formar sustancias orgánicas a partir del CO₂ existente en el aire y H₂O utilizando la energía solar como catalizador.

² Cadena trófica, o también conocida como cadena alimentaria, es la corriente de energía y nutrientes que se establece entre las distintas especies de un ecosistema en relación con su nutrición.

la fotosíntesis, formando un ciclo (ver figura 2.2) que le da la singularidad de ser una fuente de energía renovable y se puede clasificar principalmente en:

- **Biomasa natural:** Producida en los ecosistemas naturales.
- **Biomasa residual:** subproductos derivados de actividades agrícolas, ganaderas y forestales.
- **Biomasa primaria:** residuos agrícolas, ganaderos y forestales.
- **Biomasa secundaria:** residuos provenientes de industrias agroalimentarias y forestales.
- **Cultivos energéticos:** plantas destinadas, exclusivamente, a su aprovechamiento energético.

Figura 2.2 Ciclo de la biomasa



Fuente: el autor a partir de Castells, 2005.

El aprovechamiento de la biomasa está asociado a los tratamientos (Figura 2.3) a los que se puede someter la misma, que puede ser utilizada en forma sólida, líquida y gaseosa.

Figura 2.3 Transformaciones energéticas de la biomasa

Fuente: Adaptado de Castells, 2005

2.1.2 Definición, composición y características del biogás

Los combustibles gaseosos provenientes de la biomasa son el gas de síntesis, procedentes de la gasificación o la pirólisis de la biomasa, cuya composición predominante es el H_2 y los gases provenientes de la digestión anaeróbica conocido como biogás.

Se le da el nombre de biogás a la mezcla gaseosa producida por la descomposición de componentes orgánicos biodegradables en condiciones anaeróbicas³ y su composición depende del tipo de material orgánico utilizado para su producción y las condiciones en las que ocurre su transformación, generalmente el biogás se compone de una mezcla de gases, principalmente CH_4 (metano) y CO_2 (tabla 2.1), y cuyas características se enlistan en la tabla 2.2.

³ Ausencia de oxígeno

Tabla 2.1 Composición bioquímica del biogás

COMPONENTE	FÓRMULA QUÍMICA	%VOLUMEN
Metano	CH ₄	60-70
Gas Carbónico	CO ₂	30-40
Hidrógeno	H ₂	1.0
Nitrógeno	N ₂	0.5
Monóxido de Carbono	CO	0.1
Oxígeno	O ₂	0.1
Ácido Sulphídrico	H ₂ S	0.1

Fuente: Silva Vinasco, 2000.

Tabla 2.2 Características del biogás

CARACTERISTICAS	BIOGAS
Proporciones % Volumen	60 CH ₄ / 40 CO ₂
Valor Calórico	
MJ/m ³	21,5
kcal/m ³	5140
Ignición % en aire	6-12
Temp. ignición [°C]	650-750
Presión crítica [MPa]	7,5-8,9
Densidad nominal [g/l]	1,2
Densidad relativa	0,83
Inflamabilidad Vol. en % aire	6-12

Fuente: Adaptado de Hilbert, 2003

2.1.3 Utilización del biogás

Debido a las características del biogás estas permiten emplearlo con propósitos de generación de energía y puede ser utilizado para:

- Gas de síntesis
- Iluminación
- Aplicaciones térmicas
- Refrigeración
- Combustible
- Electricidad

2.1.3.1 Gas de síntesis

El gas de síntesis está compuesto principalmente de H_2 y CO . Este gas puede ser usado para la generación de energía o como precursor para la producción de hidrógeno, compuestos químicos y combustibles sintéticos. Puede ser producido a partir de cualquier fuente de hidrocarburos como son el gas natural, aceites residuales, coque de petróleo, carbón o biomasa. Sin embargo, hoy en día la forma más barata de producir gas de síntesis es a partir del gas natural, utilizando un agente oxidante como vapor de agua u oxígeno y un catalizador metálico. Debido a las características del biogás (rico en CH_4 y CO_2), puede ser utilizado para producir gas de síntesis con la ventaja de no necesitar agentes oxidantes, pues utiliza su propio CO_2 (<http://www.ott.csic.es/ofertatecnologica/index.html>).

2.1.3.2 Iluminación

Las lámparas de biogás pueden utilizarse en comunidades que no se encuentran conectadas a una red eléctrica. La luz brillante reflejada por las lámparas de biogás se debe al intenso calor que induce la luminosidad de metales especiales como son el Torio, Cerio y Lantano a temperaturas de 1000-2000 °C. Los flujos de luz alcanzan alrededor de 400 -500 lumen.

Un buen funcionamiento de una lámpara de biogás depende de la calibración óptima de llama y del cuerpo incandescente, que debe ser rodeado por la llama con el mínimo consumo de gas.

Las desventajas de las lámparas a biogás es que poseen un bajo rendimiento, ya que se calientan mucho y necesitan unos 10 [cm] de columna de agua de presión, además si se cuelgan muy cerca del techo, existe peligro de incendio.

2.1.3.3 Aplicaciones térmicas

Las aplicaciones térmicas más comunes son las llamadas estufas de biogás pues son muy utilizadas en áreas rurales, aunque también es utilizado para calentar hornos, secadoras y calderas.

2.1.3.4 Refrigeración

Las máquinas de refrigeración tipo absorción, operados con amoníaco y agua, el termosifón de circulación automática son equipos típicos que pueden funcionar con biogás. Aun que se debe cuidar que no existan variaciones en la composición de biogás ya que puede afectar el funcionamiento del equipo de refrigeración.

2.1.3.5 Combustible

El biogás puede utilizarse como combustible en motores a diesel o a gasolina, en el caso de los motores a diesel el biogás puede remplazar hasta el 80% del acpm⁴ y para los motores de gasolina este la puede llegar a remplazar totalmente. Entre sus aplicaciones más comunes se encuentran el bombeo de agua y funcionamiento de ordeñadoras.

2.1.3.6 Electricidad

El biogás es inyectado a generadores eléctricos (motogeneradores). Esta energía eléctrica puede ser usada para iluminación o bombeo y el calor excedente es utilizado para calefacción.

⁴ acpm: aceite combustible para motores

2.1.4 Generación de biogás

2.1.4.1 Generación Natural

Como ya se dijo, el biogás se produce por la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas, este proceso es conocido comúnmente como digestión anaeróbica (Figura 2.4), éste es un proceso de óxido-reducción de azúcares y otros compuestos en la cual intervienen y se combinan los esfuerzos de varios tipos de bacterias para degradar la materia orgánica.

Los procesos bacterianos y enzimáticos de la digestión anaeróbica son sensibles a variación en temperatura, contenido de agua, y composición general de la mezcla de materia orgánica. El biogás se produce únicamente si se excluye el aire de forma tal que se pueda desarrollar la condición anaeróbica.

La digestión anaeróbica se presenta en condiciones naturales en la descomposición de la materia orgánica, pero la cantidad de biogás producido es pequeña o su concentración de CH_4 es pobre, ya que las bacterias tardan mucho tiempo para lograr un entorno apropiado y tener una tasa de producción de biogás, por ejemplo en rellenos sanitarios.

La digestión anaeróbica se produce en forma natural cuando se dan las condiciones adecuadas, pero se puede optimizar el proceso y recolectar el metano si se realiza de forma inducida en un periodo de 30 a 45 días.

2.1.4.2 Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica se compone de varias etapas⁵ las cuales podemos observar en la figura 2.4 y se describen a continuación:

⁵ Fuente: http://www.fing.edu.uy/imfia/ambiental/reactores_anaerobios.ppt

Figura 2.4 Etapas de la digestión anaeróbica



* MO – materia orgánica

Fuente: http://www.fing.edu.uy/imfia/ambiental/reactores_anaerobios.ppt

a) Etapa de Hidrólisis

Los compuestos orgánicos complejos son transformados en material disuelto más simple, por medio de enzimas producidas por bacterias fermentativas.

b) Etapa de Acidogénesis

Los productos solubles son convertidos en ácidos grasos volátiles, CO₂, H₂, H₂S, etc., por la acción de las bacterias fermentativas acidogénicas.

c) Etapa de Acetogénesis

Los productos generados en la etapa anterior son transformados en sustratos para las bacterias metanogénicas.

d) Etapa de Metanogénesis

Finalmente se produce metano a partir del acetato (bacterias metanogénicas acetoclásticas) y de H_2S y CO_2 (bacterias metanogénicas hidrogenotróficas).

e) Etapa de Sulfurogénesis

Esta etapa solo se presenta cuando hay sulfatos, las bacterias sulfatoreductoras compiten por el sustrato con las demás bacterias, se genera más H_2S y baja la producción de CH_4 , provoca problemas de olores y de inhibición.

2.1.4.3 Digestión anaeróbica Inducida

La digestión anaeróbica inducida se lleva a cabo en reactores anaerobios o digestores. La ventaja de la digestión anaeróbica inducida es que se pueden optimizar las condiciones para producir el biogás pues podemos tener un mejor control de las variables que determinan la generación.

Las variables que influyen en el proceso son las siguientes:

- ✿ Temperatura: se encuentra un funcionamiento óptimo alrededor de los $35^\circ C$
- ✿ Acidez: determina la cantidad y el porcentaje de metano en el biogás, habiéndose encontrado que el valor óptimo de pH oscila entre 6,6 y 7,6.
- ✿ Contenido en sólidos: se suele operar en mejores condiciones con menos de un 10% en sólidos, lo que explica que la biomasa más adecuada sea la de alto contenido en humedad.
- ✿ Nutrientes: para el crecimiento y la actividad de las bacterias, éstas tienen que disponer de carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales.
- ✿ Tóxicos: aparte del oxígeno, inhiben la digestión concentraciones elevadas de amoníaco, sales minerales y algunas sustancias orgánicas como detergentes y pesticidas.

2.2 Producción de biogás a partir de residuos

Existen muchas formas de eliminar los residuos, pero pocas ayudan a tratarlos y disponerlos de forma adecuada. Nos olvidamos que estos residuos también tienen un contenido energético y que al no reincorporarlos a la naturaleza de una forma amigable, esa energía en lugar de ser aprovechada puede dañar al ambiente.

La basura la podemos segregar, reciclar, incinerar o disponer en rellenos sanitarios, pero también podemos aprovechar los residuos de origen orgánico como biomasa para la generación de biogás.

Ventajas:

- La humedad de los residuos no es un problema
- Se pueden tratar conjuntamente diversos tipos de residuos (co-digestión)
- Reducen problemas de olores
- Ingresos adicionales por: gestión de residuos, generación de calor y electricidad y venta de subproductos según el caso.

Para aprovechar el biogás generado por la digestión anaeróbica tenemos dos técnicas, la captación en los rellenos sanitarios y el uso de digestores, ambas técnicas son muy utilizadas.

2.2.1 Captación de biogás en celdas de Rellenos Sanitarios

Los rellenos sanitarios son depósitos donde son confinados los residuos, principalmente RSU y RME. En los rellenos sanitarios se dan condiciones anaeróbicas, por lo que se le puede considerar como un gran reactor anaerobio de baja eficiencia (Castells, 2005).

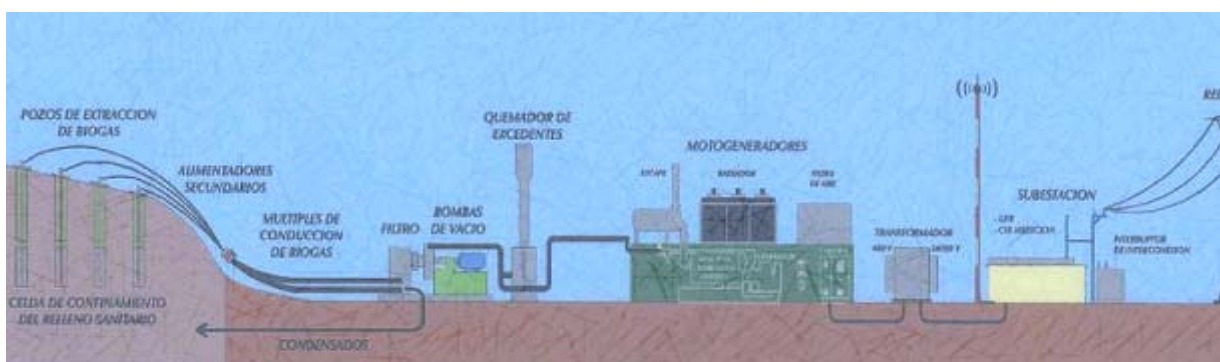
La recuperación del biogás de los rellenos sanitarios no solo debe plantearse como aprovechamiento energético, también debe hacerse como medida de seguridad y ecológica.

2.2.1.1 Descripción del proceso de captación

Los Rellenos Sanitarios tienen un tratamiento anaerobio diferente pues no tienen una cámara de digestión especialmente construida para tal fin, sino que sólo se hacen excavaciones las cuales serán rellenas generalmente con RSU y RME, y de los cuales no se obtendrá ningún efluente tratado, sólo quedará la porción de sólidos que no se pudo degradar y el lixiviado.

El biogás puede o no recolectarse, para aprovechar el biogás producido en un relleno sanitario se emplean diversas técnicas, entre las cuales se tienen pozos verticales y pozos horizontales, que permiten su extracción desde las vetas de gas formadas dentro del relleno; el biogás generalmente se encuentra a bajas presiones, así que el método se basa en un sistema de colección y conducción por aspiración forzada (figura 2.5), pasando a las etapas de medición, análisis y quema del biogás extraído (figura 2.6).

Figura 2.5 Captura de biogás en un relleno sanitario



Fuente: ESISA, 2008

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

El sistema se compone de un conjunto de cuatro subsistemas relacionados entre sí (AES, 2007):

1. **Subsistema de colección:** consistente en un conjunto de pozos, distribuidos en las celdas cerradas y maduras, mediante los cuales se extrae el biogás del interior del relleno.

2. **Subsistema de aspiración y conducción:** conformado por una red de cañerías y un equipo de turbinas de aspiración, que permiten el flujo del biogás desde los pozos de colección hasta el subsistema de quemado. En el circuito se intercalan trampas de condensados para retener los lixiviados que pudieran haber emigrado junto con el biogás.
3. **Subsistema de medición y análisis:** instalado entre el subsistema de aspiración/conducción y el de quemado, con el fin de registrar de forma precisa y fehaciente las cantidades de metano que se quemarán. Está constituido por un rotámetro fijo y en línea con el conducto principal, que medirá el caudal del biogás que se incinerará; y por un analizador de gases que mediante un plan de monitoreo específico, permitirá determinar la proporción de metano presente en el Biogás a quemar.
4. **Subsistema de incineración:** Basado en una antorcha que comprende una cámara de combustión del biogás y la chimenea de evacuación de gases a la atmósfera. Se contará con el equipo y las herramientas adecuadas para la determinación de la eficiencia de quemado del metano en la antorcha instalada.

Figura 2.6 Operación de un Relleno Sanitario con sistema de captura y quema de biogás

Fuente: <http://www.aesamisiones.com.ar/pdd.htm>

2.2.1.2 Evolución de un relleno sanitario para la captación de biogás

En la evolución de un relleno sanitario (figura 2.7) se pueden distinguir varias Fases, cuya duración varía en función de las características del relleno sanitario, de la composición de los residuos, o de que recirculen lixiviados⁶ o no.

- I Fase de ajuste inicial:** en la que los componentes biodegradables se degradan durante la disposición. El ambiente es predominantemente aerobio, aunque ya se forman algunos núcleos anaerobios. Puede tardar desde unos días hasta varios meses, dependiendo de la rapidez de la descomposición de los residuos. Si la humedad es

⁶ Separación de uno o más componentes de un material sólido mediante la acción del agua, que actúa como disolvente.

suficiente, la descomposición consumirá rápidamente el oxígeno del relleno y pasará a la segunda etapa.

- II Fase de transición:** *desciende el nivel de oxígeno y comienzan a darse las condiciones anaeróbicas, las bacterias comienzan a utilizar los nitratos y sulfatos como fuente de oxígeno, para producir sulfuros, N_2 y CO_2 . Con el tiempo comienzan a establecerse las condiciones plenamente reductoras en las que se pueden producir los procesos de metanogénesis. Durante esta fase comienza la degradación de los materiales orgánicos llevándose a cabo las fases de hidrólisis y acidogénesis.*
- III Fase ácida:** *durante esta fase se acelera la actividad biológica, produciendo en cantidades importantes ácidos orgánicos y pequeñas cantidades de CO_2 y en menor proporción H_2 . Las principales bacterias que actúan en este periodo son acidogénicas.*
- IV Fase metanogénica:** *durante esta fase comienza la producción de metano gracias a la acción de las bacterias metanogénicas.*
- V Fase de maduración:** *la fase final de la actividad del relleno sanitario se caracteriza por la desaparición de los materiales más biodegradables, produciéndose la descomposición de materiales más lentamente degradables. La velocidad de generación de biogás disminuye considerablemente.*

Figura 2.7 Caracterización de las fases de un relleno sanitario

Fuente: Castells, 2005

2.2.1.3 Requerimientos técnicos

Para que la degradación anaeróbica se lleve a cabo en un relleno sanitario, la materia orgánica debe estar enterrada en las celdas y se requiere de un mínimo de dos años de maduración para poder aprovecharlo en forma comercial, para ello es necesario ubicar y valorar las “bolsas” de gas que se hayan formado antes de proceder a su extracción.

Para una extracción adecuada deben considerarse las siguientes condiciones de operación del Relleno Sanitario:

- Volumen de RSM depositados.
- Humedad.
- Composición.
- Antigüedad del sitio.
- Altura de las celdas.
- Manejo técnico del sitio:
(lixiviados, material de cobertura, etc.)

Una vez generado y extraído el biogás se requiere de un sistema de conducción, generalmente formado por tubería plástica, de PVC o polietileno, para su transporte hacia las áreas de almacenamiento, purificación, enriquecimiento y posterior aprovechamiento para generar energía eléctrica.

2.2.1.4 Otras consideraciones

Económicos

- Falta de recursos presupuestales del gobierno.
- Esquemas de financiamiento lentos y complicados.

Legales

- Facultades para asociarse.
- Legislación en materia de contratos a largo plazo.
- Autorización a nivel cabildo ó congreso estatal.
- Propiedad del predio y/o derechos del gas.
- Sitio concesionado.
- No existe legislación sobre el Biogás en México como energía renovable

Sociales

- Existencia de pepenadores.
- Vecindades.
- Consulta pública.
- Seguridad perimetral del sitio.

Políticas

- Convencimiento de la administración local.
- Composición ideológica del cabildo o del congreso estatal.
- Intereses particulares.
- Período electoral.

2.2.1.5 Proyectos de captación de biogás en Rellenos Sanitarios

🌐 Internacional

En el 2002 habían en el mundo alrededor de 1,152 plantas que suman una capacidad de generación eléctrica de 3,929 MW y generan en promedio 3.1 m³/ton-año de biogás de relleno sanitario, de las 1,152 plantas, 734 se encuentran en Europa y 354 en los Estados Unidos, 15 en Canadá, 19 en Asia, 18 en Australia, 8 en Sudamérica y 4 en África (Themelis, 2002).

🌐 En México

En México existe varias plantas instaladas para captura de biogás en rellenos sanitarios, pero el ejemplo más conocido de la utilización de este tipo de técnica es en el relleno sanitario de Salinas Victoria en la zona conurbada de Monterrey, cuya celda contiene 7 millones de toneladas de residuos y su capacidad es de 7.4 MW.

El biogás generado por el relleno, es extraído por 160 pozos, este tiene una composición de CH₄ del 55% y es convertido por motogeneradores a energía eléctrica que es enviada por la red de distribución de la CFE hasta la zona metropolitana de Monterrey para su utilización en alumbrado público, bombeo de agua y el transporte colectivo de la ciudad (SIESA, 2007).

Actualmente se encuentra en su tercera fase, la cual incrementará la red de captación de biogás en otra sección del relleno en un área aproximada de 40 has y en ella se perforarán entre 130 y 160 nuevos pozos la cual ampliará su capacidad de generación neta a 16.96 MW.

Esta planta (figura 2.8) representa la primera experiencia en el ámbito nacional, sobre el aprovechamiento de biogás generado por residuos dispuestos en un relleno sanitario, para generación eléctrica.

Figura 2.8 Central de biogás en relleno sanitario de Salinas Victoria

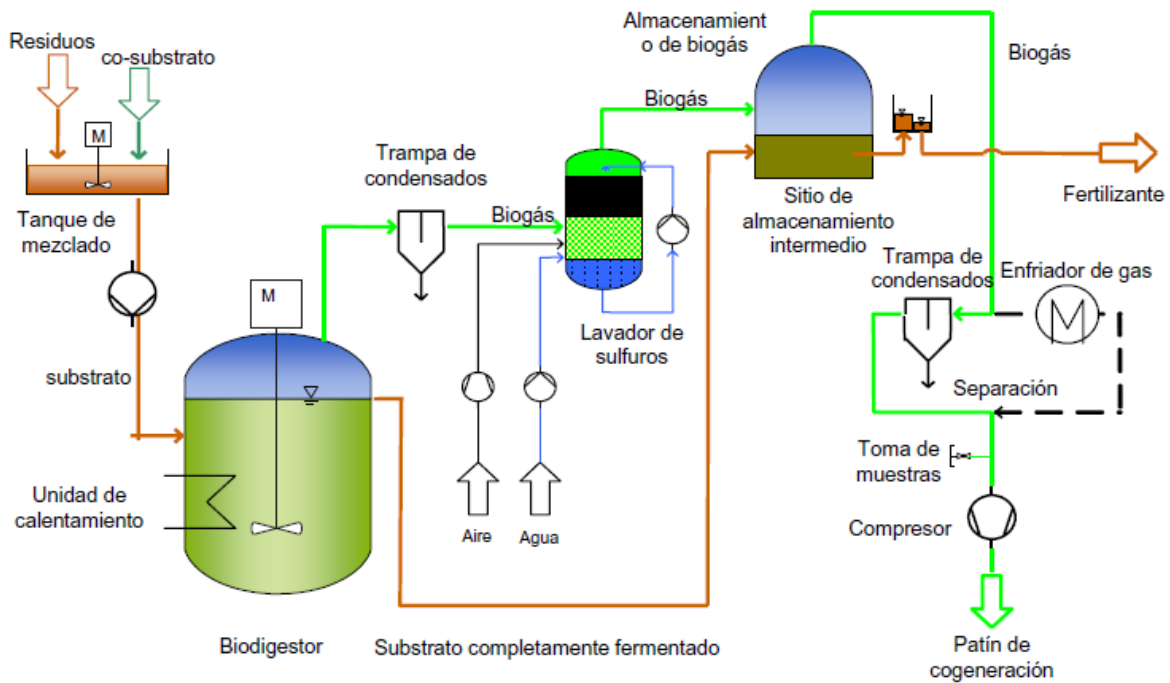


Fuente: SEISA, 2005

2.2.2 Digestores

El digestor es la estructura física o reactor que favorece en un proceso natural anaerobio (Figura 2.9) la estabilización de la materia orgánica contenida en los residuos y la generación del biogás.

Figura 2.9 Proceso de generación de biogás en un digestor



Fuente: ESISA, 2007

2.2.2.1 Tipos de digestores⁷

De acuerdo al proceso o modo de operación, llenado y vaciado es como se definirán los digestores a continuación (ver figura 2.10):

⁷ Este apartado se elaboró a partir de Moncayo 2008

Figura 2.10 Clasificación general de los digestores

Fuente: Adaptado de Moncayo, 2008.

La fermentación en seco se aplica generalmente en procesos industriales. El término de fermentación seca se refiere a que el porcentaje de masa seca (MS) es mayor o igual al 20%, la fermentación húmeda se refiere a los digestores que procesan biomasa con un MS menos al 15%.

digestores en carga batch

De lote o batch: 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 produce biogás. Es aplicable cuando se presenten problemas operativos o cuando la materia orgánica no existe en forma continua.

La ventaja de este tipo de digestores:

- Puede procesar una gran variedad de materiales.
- La carga puede recolectarse en campo abierto porque, aunque tenga tierra u otro inerte mezclado, no entorpece la operación del digestor.
- Admiten cargas secas que no absorban humedad, así como de materiales que flotan en el agua.

- 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.

Horizontales o de desplazamiento: generalmente se construyen enterrados, son poco profundos y alargados, semejando un canal. Utilizan el sistema de operación semicontinuo, entretanto la carga por un lado y saliendo el lodo por el otro extremo.

Figura 2.11 Digestor horizontal flujo-pistón

Fuente: el autor a partir de Moncayo, 2008.

✿ Digestores de régimen semicontinuo

Se utiliza 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 gran 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. Son utilizados en las plantas de biogás para la producción de energía eléctrica. Son digestores de gran tamaño en las que se emplean equipos comerciales para alimentarlos, para la agitación y control, se pueden automatizar con facilidad. Estos se cargan diariamente en forma periódica, la biomasa debe ser fluida y homogénea.

Ventajas:

- Este tipo de digestores permite controlar la digestión, con el grado de precisión que se requiera.
- Permite corregir cualquier anomalía que se presente en el proceso, en cuanto es destacada. Permite manejar las variables relacionadas, la carga específica, el tiempo de retención y temperatura, a largos periodos.
- La tarea "puesta en marcha" solo se vuelve a repetir cuando hay que vaciarlo por razones de mantenimiento. Las operaciones de carga y descarga de biomasa y de fertilizante no requieren de ninguna operación especial.

Las desventajas de este tipo de digestores son:

- La baja concentración de sólidos que admiten, no poseer un diseño apropiado para tratar materiales fibrosos, o aquellos cuyo peso específico sea menor que el del agua.
- En ocasiones tienen problemas de limpieza de sedimentos, espuma e incrustaciones.
- Para mejorar la producción de metano de este tipo de digestores, es conveniente mejorar la relación carbono/nitrógeno, que la materia no tenga trozos mayores a 1cm³, que se encuentre a niveles de pH aceptable y posea una alta cantidad de organismos metanizantes. Alimentando los digestores con mezclas de distintos sustrato se han obtenido resultados satisfactorios.

Figura 2.12 Digestor de régimen continuo

Fuente: el autor a partir de Moncayo, 2008.

Completamente mezclados

Estos sistemas requieren menores tiempos de retención (10 a 30 días). Son aplicados a residuos con alto porcentaje de sólidos volátiles, a fin de lograr un mayor contacto entre la biomasa microbiana y el sustrato en cuestión.

La principal desventaja de estos digestores constituyen las bajas velocidades de carga con que pueden ser operados y los relativamente altos tiempo de retención requeridos, unido a la complejidad del sistema de mezclado, sobre todo en su construcción y mantenimiento.

Este tipo de digestores se os construye en acero u hormigón. Son mezclados por agitadores y trabajan en rangos de temperatura mezofílica y termofílica y se los utiliza muy eficientemente para degradar desechos sólidos. Tienen altos costos de construcción y operación pero un elevado rendimiento de metano.

Figura 2.13 Digestor de régimen completamente mezclado

Fuente: el autor a partir de Moncayo, 2008.

Digestores de dos etapas

Existen múltiples combinaciones de digestores de dos etapas. La concepción 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 diversas 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 segundo se lleva a cabo la acetogénesis y metanogénesis del material acidificado. Las variantes estudiadas de estos sistemas de doble etapa presentan como desventaja largos periodos de retención hidráulica, requeridos en la primera fase del tratamiento y las bajas eficiencias de conversión. Aun con la aplicación de digestores de alta tasa en la segunda etapa, la velocidad de conversión total y la eficiencia global es determinada por la etapa de hidrólisis y acidificación, por lo que cualquier estudio en cuanto al mejoramiento de la velocidad de esta primera etapa sería de gran importancia a los efectos económicos de esta variante.

Figura 2.14 *digestor de dos etapas*

Fuente: el autor a partir de Moncayo, 2008.

Digestión seca

La definición "seca" no es técnicamente muy clara, ya que siempre se utiliza un medio acuoso para la digestión anaeróbica.

Las principales ventajas son:

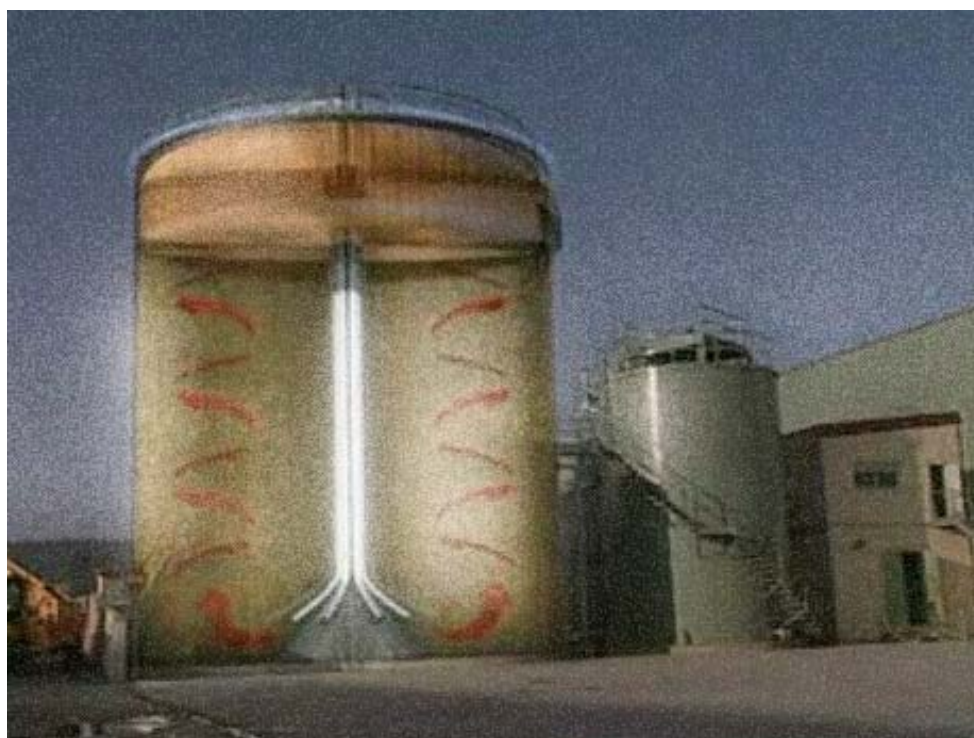
- Bajos consumos de agua.
- Solamente se requiere una mínima cantidad de agua para llevar a cabo el proceso.
- El volumen del digestor es relativamente pequeño, debido a la alta densidad de materia orgánica con que es operado.
- Los requerimientos energéticos con el fin de mantener una temperatura controlada del sistema son bajos (producción endógena).

2.2.2.2 Digestores industriales

Desde hace años la mayoría de los digestores del sector industrial que están en funcionamiento son de mezcla completa y sistemas de contacto anaerobio. La agitación en estos reactores se realiza por bombeo (hidráulicamente) o bien por inyección de gas (Figura 2.15).

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

Figura 2.15 Recirculación de biogás



Fuente: Castro, 2008

2.2.2.3 Requerimientos Técnicos

Para que un digestor opere de forma correcta, debe reunir las siguientes características⁸:

- Debe ser hermético, para evitar la entrada de oxígeno y fugas del biogás.
- Debe estar térmicamente aislado para evitar cambios bruscos de temperatura.
- Aunque el digestor no sea un recipiente de alta presión, el contenedor primario deberá contar con una válvula de seguridad.
- Deberá contar con los medios para efectuar la carga y descarga del sistema.
- Deberá contar con acceso para mantenimiento.
- Contará con un medio para romper las natas que se forman.

2.2.2.4 Otras consideraciones

🌿 Económicos

- Falta de recursos presupuestales del gobierno.
- Esquemas de financiamiento lentos y complicados.

🌿 Legales

- Facultades para asociarse.
- Legislación en materia de contratos a largo plazo.
- Autorización a nivel cabildo ó congreso estatal.
- Propiedad del predio y/o derechos del gas.
- Sitio concesionado.
- No existe legislación sobre el Biogás en México como energía renovable

🌿 Sociales

- Consulta pública.
- Seguridad perimetral del sitio.

⁸ Fuente: Mandujano, 1981

🌿 Políticas

- Convencimiento de la administración local.
- Composición ideológica del cabildo o del congreso estatal.
- Intereses particulares.
- Período electoral.

2.2.2.5 Proyectos con Digestores

🌿 Internacional

En los países europeos se aprovechan los desechos orgánicos para la producción de biogás, energía eléctrica y fertilizantes orgánicos. En estos países se han construido más de 5000 digestores a nivel industrial. En el 2006, la producción de biogás en Europa (figura 2.14) alcanzó casi los 5.3 millones de toneladas equivalentes de petróleo.

En los países latinoamericanos también se están desarrollando proyectos industriales de aprovechamiento de desechos orgánicos para la producción de biogás. Asia es el país con más instalaciones de biogás construidas y en China el 70% del combustible doméstico proviene de la descomposición de paja y tallos de cultivos y en la India, más de medio millón de personas se han servido de plantas de biogás como combustible doméstico [Moncayo, 2008].

🌿 En México

En México solo se tienen proyectos de digestores para tratamiento de residuos ganaderos cuya capacidad solo es para autoconsumo, son utilizados en algunos rastros y granjas piscícolas (figura 2.15).

A continuación se describen algunas de las granjas porcinas (tabla 2.3), las cuales cuentan con digestores para el tratamiento de sus desechos, generan energía eléctrica que integran a la red y utilizan el calor residual para distintos procesos:

Figura 2.16 Digestor industrial en España



FUENTE: ESISA, 2007

Figura 2.17 Digestor para tratamiento de residuos ganaderos

Fuente: ESISA, 2007

Tabla 2.3 Aprovechamiento de biogás usando digestores en granjas porcinas

Unidad Productiva	Características Generales del Biodigestor	Características generales de la granja
Granja el Mirasol, Capilla de Gpe., Tepatitlán, Jal.	Dimensión: 35x80x5 [m]. Capacidad: 14,000 m ³ Producción de biogás: 5,300 [m ³ /día]	12,000 cerdos al destete Energía eléctrica: 18,000 kW/h
Avicar de Occidente S.A. de C.V., Tepatitlán, Jal.	Dimensión: 45x35x4 [m]. Capacidad: 6,300 m ³ Producción de biogás 611 [m ³ /día]	5,200 cerdos Energía eléctrica: 71,824 kW/h
Granja Ana Margarita, Montemorelos, N.L.	Dimensión: 82.20x49.4x7 [m]. Capacidad del biodigestor: 8,516 m ³ Producción de biogás: 20,478 [m ³ /día]	11,200 cerdos (gestación, crianza, desarrollo y finalización) Energía eléctrica: 40,000 kW/h
Granja El Chanco, Montemorelos, N.L.	Dimensión: 62.23x43.4x7 [m]. Capacidad del biodigestor: 4,626 m ³ Producción de biogás: 13,046 [m ³ /día]	4,500 cerdos (gestación, crianza, desarrollo y finalización) Energía eléctrica: 13,000 kW/h
Granja La Prietita, Cadereyta, N.L.	Dimensión: 47.39x39x7 [m]. Capacidad del biodigestor: 3,750 m ³ Producción de biogás: 300 [m ³ /día]	5,000 cerdos (gestación, crianza, desarrollo y finalización) Energía eléctrica: 19,000 kW/h
Granja San Carlos 3, Hermosillo, Son.	Dimensión: 81.68x62.6x4 [m]. Capacidad del biodigestor: 8,069 m ³ Producción de biogás: 1,121 [m ³ /día]	7,440 cerdos (gestación, crianza, desarrollo y finalización) Energía eléctrica: 90,720 kW/h
Granja Santa Fe/ Sacramento	Dimensión: 132.13x53.78x7 [m]. Capacidad del biodigestor: 16,066 m ³ Producción de biogás: 1,550 [m ³ /día]	15,157 cerdos (gestación, crianza, desarrollo y finalización) Energía eléctrica: 38,880 kW/h
Granja Las Palomas, Cd. Obregón, Son.	Dimensión: 63.09x32.61x6.71 [m]. Capacidad del biodigestor: 7,580 m ³ Producción de biogás: 1,300 [m ³ /día]	13,550 cerdos (crianza – finalización)
Granja Las Palomas, Cd. Obregón, Son.	Dimensión: 87x69.71x6.5 [m]. Capacidad del biodigestor: 13,514 m ³ Producción de biogás 1,184 [m ³ /día]	2,200 vientres (17,300 cabezas) Energía eléctrica: 50,000 kW/h

Fuente: FIRCO, 2007.

2.2.3 Captación de biogás VS Digestores

El uso de digestores y la captación de biogás en los rellenos sanitarios tienen como base la digestión anaeróbica. Ambas técnicas son muy utilizadas a nivel mundial por sus múltiples ventajas, a continuación se enlistan las características de ambas técnicas (Tabla 2.4).

Tabla 2.4 rellenos sanitarios vs. digestores

	Rellenos Sanitarios	Digestores
Tiempo de generación de biogás	1 – 2 años	30 – 45 días
Disminución de riesgos sanitarios	✓	✓
Generación eléctrica	✓	✓
Control de generación de biogás	poco	Mucho
Control en la composición del biogás	✗	✓
Inversión	mediana	Mucha
Limpieza de biogás	Muy necesaria	Necesaria
Abono orgánico	✗	✓
Residuos	Lixiviados	✗
Agua tratada	✗	✓

Fuente: Moncayo, 2008

Conclusiones.

La utilización de residuos como fuente energética no solo resuelve una parte del problema de la disposición de los mismos y si no que visto desde una perspectiva más amplia, los residuos son una fuente sustentable de energía, pues en todos los procesos industriales y de consumos siempre se van a generar.

Las técnicas de digestión anaeróbicas inducidas para generación de biogás nos dan una posible solución para dejar de depender de los combustibles fósiles, además de dar solución a una problemática mundial en el tema de tratamiento y disposición de RSU.

En la mayoría de los países latinoamericanos, el biogás ha tenido un uso limitado a la cocción de alimentos y calefacción de agua para usos generales, a pesar de ello, el uso del biogás como sustitución de combustibles fósiles, para la generación de electricidad en motores de combustión interna ha cobrado una mayor importancia en los últimos años, así como su utilización para obtener gas de síntesis, esto por ser más económico y por contar con las características necesarias para una óptima producción de hidrógeno. Eso sin tomar en cuenta los subproductos que se pueden obtener con el uso de digestores para la generación de biogás.

En México solo se tienen experiencia en la captura de biogás de rellenos sanitarios en proceso de clausura con el proyecto de Salinas Victoria que sirvió como ejemplo a seguir para el aprovechamiento de otros rellenos del país que se encontraban en condiciones similares.

Uno de los objetivos de la LGPGIR, es que se trate de evitar el uso de disposición final por medio de rellenos sanitarios, pero se necesita de personal capacitado para llevar a cabo este tipo de proyectos, sobre todo si se trata de instalación de digestores industriales, dónde México tiene muy poca experiencia y la puesta en marcha de un proyecto de este tipo, requiere de una fuerte inversión inicial.

Definitivamente este tipo de proyectos, pese a la fuerte inversión inicial, puede generarnos muchas fuentes de ingresos que nos dan rentabilidad a largo plazo, pero antes de llevarse a cabo es necesario evaluar el proyecto y analizar si la implantación de este resulta socialmente aceptable, técnicamente posible, económicamente rentable y amigable al medio ambiente, para ello nos apoyamos en la teoría para evaluación de proyectos de inversión, que no solo nos será útil para evaluar la factibilidad del mismo es necesario realizar, si no también nos proporcionará todas las consideraciones que se deben tomar para su desarrollo y puesta en marcha.

En el siguiente capítulo se estudiará dicha teoría de evaluación de proyectos, así como se revisarán varias metodologías para la evaluación de proyectos similares y se propondrá cual metodología se habrá de seguir para evaluar un proyecto específico de producción de biogás con digestores para generación eléctrica.

Esta página se dejó en blanco intencionalmente