



**INSTITUTO POLITECNICO
NACIONAL**

*ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
QUÍMICA E INDUSTRIAS
EXTRACTIVAS*

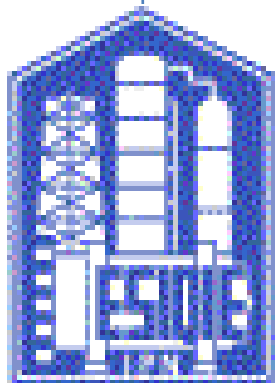
PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Tesis Profesional para Obtener el Título de:
INGENIERO QUÍMICO INDUSTRIAL

PRESENTA:

ELIZABETH JARAMILLO CALDERON

ASESOR: JORGE SERGIO MORAN GUZMAN



Gracias a Dios por escogerme tan linda familia y todo lo que me haz dado.

A mi mamá por todos sus desvelos, cuidados, soportar malos ratos pero siempre estar allí, haciendo de mi lo que hoy soy una mujer fuerte y autosuficiente.

A mi hermana por ser quien ha sido y sera mi peor juez pero dando siempre su apoyo.

Hector mi amigo y esposo, gracias por no dejarme claudicar y apoyandome para desarrollarme.

Ximena gracias por ser una niña tan linda y valiente.

**Bertha Peregrino, Veronica Fregoso, Miguel Fregoso y Angel Miguel Mercado quienes me han apoyado en todo lo que han podido en estos años
Gracias.**

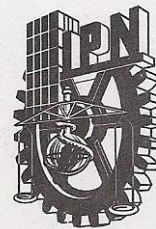
A mi alma mater el Instituto Politecnico Nacional.



SECRETARIA
DE
EDUCACION PUBLICA

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS



DEPARTAMENTO DE EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO ACADÉMICO

T-012-11.

México, D. F., a 3 de febrero de 2011.

A la C. Pasante:
ELIZABETH JARAMILLO CALDERON
Calle Villista 135 Int. 6
Montebello Della Stanza
Aguascalientes, Aguascalientes
C.P. 20126

Boleta:
2003320259

Carrera:
IQI

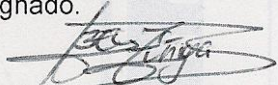
Generación:
2002-2008

Mediante el presente se hace de su conocimiento que este Departamento acepta que el C. Ing. **Jorge Sergio Moran**, sea orientador en el Tema que propone usted desarrollar como prueba escrita en la opción; **Tesis Individual**, con el título y contenido siguiente:

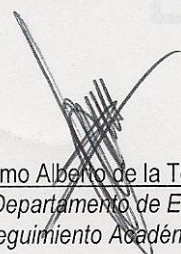
"Propuesta de diseño de un biodigestor casero".

Resumen
Introducción
I.- Generalidades.
II.- Biodigestores.
III.- Diseño del biodigestor casero.
Conclusiones.
Referencia Bibliográfica.

Se concede un plazo máximo de un año, a partir de esta fecha, para presentarlo a revisión por el Jurado asignado.


Dr. Abel Zúñiga Moreño
Presidente de la Academia de
Fisicoquímica


Ing. Jorge Sergio Moran Guzmán
Profesor Asesor o Director
Ced. Prof. 621819

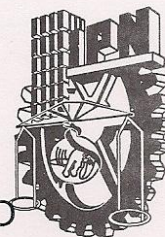

Lic. Guillermo Alberto de la Torre Arteaga
Jefe del Departamento de Evaluación y
Seguimiento Académico


Ing. Miguel Ángel Álvarez Gómez
Director



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS



DEPARTAMENTO DE EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO ACADÉMICO

T-012-11

México, D. F., a 30 de Mayo de 2011.

A la C. Pasante:
ELIZABETH JARAMILLO CALDERON
PRESENTE

Boleta:
2003320259

Carrera:
IQI

Generación:
2002-2008

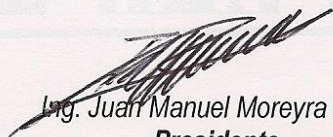
Los suscritos tenemos el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el borrador de la modalidad de titulación correspondiente, denominado

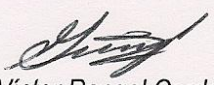
"Propuesta de diseño de un biodigestor casero".

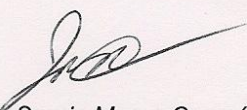
encontramos que el citado Trabajo de **Tesis Individual**, reúne los requisitos para autorizar el Examen Profesional y **PROCEDER A SU IMPRESIÓN** según el caso, debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se le hicieron.

Atentamente

JURADO


Ing. Juan Manuel Moreyra Mercado
Presidente


Dr. Víctor Rangel Cordova
Vocal


Ing. Jorge Sergio Moran Guzmán
Secretario



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

INDICE

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

OBJETIVOS

1. GENERALIDADES

1.1 BASURA	1
1.2 CLASIFICACION DE LOS RESIDUOS	1
1.3 RESIDUOS SÓLIDOS	3
1.3.1 Manejo de residuos sólidos	3
1.3.2 Sistema de manejo de residuos sólidos	3
1.4 GENERACION DE RESIDUOS	4
1.4.1 Producción Per-Cápita (PPC)	4
1.4.2 Estimación técnica de Producción Per-Cápita	4
1.5 COMPOSICIÓN DE RESIDUOS	5
1.5.1 Variaciones estacionales de la generación de residuos	6
1.5.2 Características de los residuos	6
1.6 RECOLECCIÓN	7
1.7 BIOMASA	13
1.7.1 Tipos de biomasa	13
1.7.2 Fuentes de biomasa	14
1.7.3 Características de la biomasa	15
1.7.4 Aplicaciones energéticas	16
1.7.5 Cogeneración	17
1.7.6 Energía que proporciona la biomasa	17
1.8 BIOGÁS	17

2. BIODIGESTORES

2.1 ANTECEDENTES	19
2.2 DEFINICIÓN DE BIODIGESTOR	20
2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS REACTORES ANAEROBIOS	22
2.3.1 Minibiodigestores	23
2.3.2 Digestores horizontales de desplazamiento	25
2.3.3 Digestores de régimen continuo	25
2.3.4 Digestores de otro tipo	25
2.4 APLICACIÓN DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	25



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

2.5 PROCESOS Y FACTORES DE LA CONVERSION ANAEROBIA	27
2.6 DESCOMPOSICIÓN ANAEROBÍA	28
2.7 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE DIGESTION ANAEROBIA	30
2.7.1 pH	34
2.7.2 Temperatura	35
2.7.3 Nutrientes	36
2.7.4 Toxicidad	38
2.7.5 Nivel de carga	38
2.7.6 Porcentaje de sólidos	39
2.7.7 Agitación	39
2.7.8 Tiempo de retención	39
2.8 CONCEPTO DE MUERTE DE UN MICROORGANISMO	40
3. DISEÑO DE BIODIGESTOR CASERO	
3.1 Criterio para la selección de un biodigestor	41
3.2 Modelo matemático propuesto	41
3.2.1 Enfoque sistemático para modelar	41
3.2.2 Descripción teórica de los biodigestores ideales	45
3.2.3 Cinética de la degradación de biomasa	46
3.2.3.1 Reacción cinética	48
3.2.3.2 Reacción química	50
3.2.4 Congruencias empíricas	50
3.2.4.1 Método numérico	51
3.2.4.2 Congruencia de unidades	52
3.2.4.3 Volumen del biodigestor	55
3.2.4.4 Valor inicial de bacterias	56
3.2.4.5 Tiempo de obtención de los productos y subproductos	57
3.2 Elección del biodigestor y diseño	58
3.3 Funcionamiento	63
3.3.1 Pautas de uso	63
3.3.2 Materia orgánica utilizable	63
3.3.3 Carga	64
3.3.4 Tiempo de retención y carga diaria	64
3.3.5 Tiempo de retención según temperatura	64
3.4 Deposito flotante de biogás	64
3.5 Factores a considerar	65
3.5.1 Calidad de los sólidos volátiles	67
3.5.2 Humedad del biogás	67



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

3.5.3 Eliminación de ácido sulfúrico	67
3.6 Sugerencias sobre seguridad	67
	68
CONCLUSIONES	
BIBLIOGRAFÍA	

INDICE DE TABLAS

Titulo

1.1 Composición de Residuos	5
1.2 Generación de residuos sólidos urbanos por tipo de basura	9
Disposición final de los residuos sólidos urbanos por entidad federativa, 1999 – 2006	11
1.3	
1.4 Características físicas de distintos recursos de biomasa	14
2.1 Clasificación de los reactores anaerobio	22
Balance energético de los procesos aerobios y anaerobios de degradación	29
2.2	
2.3 Temperatura de digestión de residuales	36
2.4 Materia Orgánica	37
2.5 Tiempo de retención	40
3.1 Tipo y características de digestores	42
3.2 Resumen de los parámetros encontrados por Smith	47
3.3 Composición química de algunos desechos de frutas y verduras	53
3.4 Tabla de valoración para selección	58
3.5 Tabla de costos para biodigestor	60
3.6 Tiempo de retención	64
3.7 Costos para deposito flotante de biogás	66



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

INDICE DE FIGURAS

1.1	Generación de Basura	10
2.1	Recuperación de gas de un relleno sanitario	20
2.2	Esquema de un biodigestor	21
2.3	Biodigestor modelo indio	23
2.4	Biodigestor modelo chino	24
2.5	Biodigestor horizontal	25
2.6	Aplicaciones de la digestión anaerobia	27
2.7	Etapas de la fermentación bacteriana	34
3.1	Reacción de biodegradación	46
3.2	Diagrama de flujo de Euler simple	45
3.3	Comportamiento de los productos y subproducto de la digestión	57
3.4	Parte superior e inferior	59
3.5	Biodigestor casero	59
3.6	Cortes a realizar en el tambo	61
3.7	Realización de orificio para alimentador y agitador	61
3.8	Interior de biodigestor para salida de efluente	61
3.9	Sellando biodigestor	62
3.10	Sellando biodigestor y colocando agitador	62
3.11	Muestra de instalación	62
3.12	Cubriendo para generar calor	62
3.13	Montaje de depósito flotante de biogás	65



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla la construcción de un biodigestor para la obtención de biogás, la cual es una mezcla gaseosa producida por la descomposición de materia orgánica en condiciones anaeróbicas y está formada principalmente de metano y bióxido de carbono.

Se explica detalladamente la transformación de la biomasa en biogás, la conversión anaerobia llevada a cabo, sus diferentes etapas (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis), y los diferentes factores que influyen para la producción del gas orgánico (pH, temperatura, disponibilidad de nutrientes, presencia de sustancias tóxicas, tiempo de retención, relación carbono – nitrógeno (C:N) y nivel de carga).

Se presenta los antecedentes del uso de los digestores para desechos orgánicos en el mundo, los diferentes tipos que existen actualmente, sus aplicaciones y las ventajas de usarlo, ya que favorece la reducción de contaminación por residuos orgánicos, así como la reducción de la emisión de gases a la atmósfera.

Dentro del biodigestor, donde los desechos orgánicos son digeridos por microorganismos bacterianos anaerobios, da como resultado biogás y también se generan residuos ricos en nutrientes y materia orgánica,; Estos pueden ser utilizados posteriormente como fertilizantes.

En esta tesis se propone usar residuos orgánicos para producir biogás y de esta manera obtener una fuente de energía a partir de residuos generados diariamente en las casas. Se analizan ventajas y desventajas del proceso como son: potencial para generar biogás a partir de la materia orgánica, reducir patógenos, virus, protozoarios y otros organismos causantes de enfermedades, reducción de malos olores y la mejora de los suelos por medio de los restos de los desechos orgánicos que no se transformaron en biogás que tienen un alto contenido de nitrógeno, fósforo y potasio.

Se procede a diseñar el biodigestor, el cual es el “corazón del proceso”, a partir de las consideraciones, criterios y parámetros necesarios.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

INTRODUCCIÓN

La contaminación por medio de los desechos sólidos en nuestro país es un problema que no se ha manejado correctamente. Cada día se va acumulando una mayor cantidad de basura, lo que va provocando con el paso del tiempo, menos áreas limpias y cada día más áreas donde se depositan los desechos que producimos los seres humanos, los cuales reciben el manejo adecuado, sin mencionar que aún no existe una conciencia real de la importancia de la separación de la basura, en orgánica e inorgánica.

La basura orgánica es una fuente importante de producción de diferentes gases como: CO (Monóxido de Carbono), SO₂ (Dióxido de Azufre), NO_x (Óxidos de Nitrógeno), CFC's (Clorofluorocarbonos) entre otros; que contaminan al ambiente y provocan el efecto invernadero que hoy en día es un problema mundial.

Es por eso que el objetivo que se tiene es estudiar la viabilidad para la construcción de un biodigestor experimental casero generador de biogás con la finalidad de manejar los desechos orgánicos obtenidos de los hogares, aportando una nueva alternativa al sector energético.

Si se usarán los desechos sólidos para producir nuevas fuentes de energía, se solucionarían dos problemas que afectan a los mexicanos:

- La excesiva acumulación de desechos orgánicos
- La creación de unas nuevas fuentes de energías alternas a partir de la basura orgánica.

Si tomáramos en cuenta que a partir de la formación de energía eléctrica por medio del biogás producido por los desechos orgánicos se está generando una forma de descentralizar el monopolio del gas LP y del sector eléctrico. Esto crearía fuentes de trabajo y daría energía eléctrica a comunidades que no tienen acceso a dicha fuente.

El resultado bibliográfico de esta tesis es una investigación sobre la obtención del biogás por ello es necesario contar con objetivos que en forma general nos ayudan a conocer la rentabilidad del producto para la colocación en los hogares que cuenten con el espacio necesario para la instalación del biodigestor, demostrar que es viable producir gas metano a partir de la basura orgánica generada, analizando las ventajas y desventajas que se presentan, determinar los beneficios indirectos como el manejo de residuos del biodigestor, así como la transformación de energía. El mantenimiento del biodigestor es muy barato y fácil de construir, además de que por medio de los residuos orgánicos estamos produciendo nuestro biogás para consumo domestico.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

CAPITULO 1 GENERALIDADES

1.1 BASURA

La basura es todo material considerado como desecho y que se necesita eliminar. La basura es un producto de la actividad humana al cual se le considera de valor igual a cero por el desechado. No necesariamente debe ser odorífica, repugnante e indeseable; eso depende del origen y composición de ésta.

1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS

a) Según su composición:

Residuo orgánico: todo desecho de origen biológico, que alguna vez estuvo vivo o fue parte de un ser vivo, por ejemplo: hojas, ramas, cáscaras y residuos de la fabricación de alimentos en el hogar, etc.

Residuo inorgánico: todo desecho de origen no biológico, de origen industrial o de algún otro proceso no natural, por ejemplo: plástico, telas sintéticas, etc.

Residuos peligrosos: todo desecho, ya sea de origen biológico o no, que constituye un peligro potencial (código CRETIB "Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Tóxico ambiental, Inflamable, Biológico Infeccioso") y por lo cual debe ser tratado de forma especial, por ejemplo: material médico infeccioso, residuo radiactivo, ácidos y sustancias químicas corrosivas, etc.

b) Según su origen:

Residuo forestal: Los residuos de procesos forestales son una importante fuente de biomasa que actualmente es poco explotada. Se considera que de cada árbol extraído para la producción maderera, sólo se aprovecha comercialmente un porcentaje cercano al 20%. Se estima que un 40% es dejado en él, en las ramas y raíces, a pesar de que el potencial energético es mucho y otro 40% en el proceso de aserrío, en forma de astillas, corteza y aserrín. La mayoría de los desechos de aserrío son aprovechados para generación de calor, en sistemas de combustión directa, en algunas industrias se utilizan para la generación de vapor. Los desechos de campo, en algunos casos, son usados como fuente de energía por comunidades aledañas, pero la mayor parte no es aprovechada por el alto costo del transporte.

Residuo Agrícola: La agricultura genera cantidades considerables de desechos. Se estima que en cuanto a desechos de campo, el porcentaje es más del 60%, y en



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

desechos de proceso, entre 20% y 40%. Al igual que en la industria forestal, muchos residuos de la agricultura son dejados en el campo. Aunque es necesario reciclar un porcentaje para proteger el suelo de la erosión y mantener el nivel de nutrientes orgánicos, una cantidad importante puede ser recolectada para la producción de energía. Ejemplos comunes de este tipo de residuos son el arroz, el café y la caña de azúcar. Por otro lado, las granjas producen un elevado volumen de residuos húmedos en forma de estiércol de animales. La forma común de tratar estos residuos es esparciéndolos en los campos de cultivo, con el doble interés de disponer de ellos y obtener beneficio de su valor nutritivo. Sin embargo, cuando existen cantidades elevadas de estiércol esta práctica puede provocar una sobre fertilización de los suelos y la contaminación de las cuencas hidrográficas.

Residuo domiciliario: basura proveniente de los hogares y/o comunidades.

Residuo industrial: su origen es producto de la manufactura o proceso de transformación de la materia prima. La industria alimenticia genera una gran cantidad de residuos y subproductos, que pueden ser usados como fuentes de energía, los provenientes de todo tipo de carnes (avícola, vacuna, porcina) y vegetales (cáscaras, pulpa) cuyo tratamiento como desechos representan un costo considerable para la industria. Estos residuos son sólidos y líquidos con un alto contenido de proteínas y carbohidratos, los cuales pueden ser convertidos en combustibles gaseosos. Otras industrias también generan grandes cantidades de residuos que pueden ser convertidas para su aprovechamiento energético, entre estas tenemos a la industria del papel, del plástico, las destilerías, etc.

Residuo hospitalario: desechos que son catalogados por lo general como residuos peligrosos y pueden ser orgánicos e inorgánicos.

Residuo comercial: provenientes de ferias, oficinas, tiendas, etc., y cuya composición es orgánica, tales como restos de frutas, verduras, cartones, papeles, etc.

Residuo urbano: correspondiente a las poblaciones, como desechos de parques y jardines, mobiliario urbano inservible, residuos alimenticios, papel, cartón, madera, entre otros. La carencia de sistemas adecuados para el procesamiento de estos residuos genera grandes problemas de contaminación de suelos y cuencas, sobre todo por la inadecuada disposición de la basura y por sistemas de recolección y tratamiento con costos elevados de operación.

Basura espacial: satélites y demás artefactos de origen humano que estando en órbita terrestre ya han agotado su vida útil. [1]



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Por otro lado, la basura orgánica en descomposición produce compuestos volátiles (metano, dióxido de carbono, entre otros) que contribuyen a aumentar el efecto invernadero. El metano tiene considerable valor energético que puede ser utilizado para la generación de energía limpia.

1.3 RESIDUOS SÓLIDOS

Material en estado sólido que no representa una utilidad o un valor económico para el dueño, este se convierte por ende en generador de residuos. Desde el punto de vista legislativo lo mas complicado respecto a la gestión de residuos, es que se trata intrínsecamente de un término subjetivo, que depende del punto de vista de los actores involucrados (esencialmente generador y fiscalizador)

Los sectores de más altos ingresos generan mayores volúmenes per cápita de los residuos, y estos residuos tienen un mayor valor incorporado que los provenientes de sectores más pobres de la población.

1.3.1 MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS

Es el conjunto de procedimientos y políticas que conforman el sistema de manejo de los residuos sólidos. La meta es realizar una gestión que sea ambiental y económicamente adecuada.

1.3.2 SISTEMA DE MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS

Básicamente el sistema de manejo de los residuos se compone de cuatro sub sistemas:

- a) **GENERACIÓN:** Cualquier persona u organización cuya acción cause la transformación de un material en un residuo. Una organización usualmente se vuelve generadora cuando su proceso genera un residuo, cuando lo derrama o no utiliza más un material.
- b) **TRANSPORTE:** Es aquel que lleva el residuo. El transportista puede transformarse en generador si el vehículo que transporta derrama su carga, o si cruza los límites internacionales (en el caso de residuos peligrosos), o si acumula lodos u otros residuos del material transportado.
- c) **TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN:** El tratamiento incluye la selección y aplicación de tecnologías apropiadas para el control y tratamiento de los residuos peligrosos o de sus constituyentes. Respecto a la disposición la alternativa comúnmente más utilizada es el relleno sanitario.
- d) **CONTROL Y SUPERVISIÓN:** Este subsistema se relaciona fundamentalmente con el control efectivo de los otros tres subsistemas.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

1.4 GENERACIÓN DE RESIDUOS

1.4.1 PRODUCCIÓN PER CÁPITA (PPC)

La producción de residuos sólidos domésticos es una variable que depende básicamente del tamaño de la población y de sus características socioeconómicas.

Una variable necesaria para dimensionar el sitio de disposición final es la llamada “Producción Per Cápita” (PPC). Este parámetro asocia el tamaño de la población, la cantidad de residuos y el tiempo; siendo la unidad de expresión el kilogramo por habitante por día (Kg/hab/día).

1.4.2 ESTIMACIÓN TEÓRICA DE PRODUCCIÓN PER CÁPITA (PPC)

La PPC es un parámetro que evoluciona en la medida que los elementos que la definen varían. En términos gruesos, la PPC varía de una población a otra, de acuerdo principalmente a su grado de urbanización, su densidad poblacional y su nivel de consumo o nivel socioeconómico. Otros elementos, como los periodos estacionales y las actividades predominantes también afectan la PPC.

Es posible efectuar una estimación teórica de la PPC en función de las estadísticas de recolección y utilizando la ecuación 1.1

$$P_R = \frac{N_V \cdot N_J \cdot C_P \cdot D_N}{POBLACION} \quad \dots\dots\dots(1.1)$$

Donde :

P_R = Producción total de residuos sólidos por día

N_V = Número de vehículos en operación

N_J = Números de viajes por vehículos

C_P = Capacidad útil estimada por vehículo en m^3

D_N = Densidad de los residuos en el vehículo

[4]

Otra alternativa de estimación es comparar con comunas de situación similar de la cual se dispone información fidedigna.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

1.5 COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS

Básicamente trata de identificar en una base másica o volumétrica los distintos componentes de los residuos.

Usualmente los valores de composición de residuos sólidos municipales o domésticos se describen en términos de porcentaje en masa, también usualmente en base húmeda y contenidos como materia orgánica, papeles y cartones, escombros, plásticos, textiles, metales, vidrios, huesos, etc.

La utilidad de conocer la composición de residuos sirve para una serie de fines, entre los que se pueden destacar estudios de factibilidad de reciclaje, factibilidad de tratamiento, investigación, identificación de residuos, estudio de políticas de gestión de manejo.

Es necesario distinguir claramente en que etapa de la gestión de residuos corresponden los valores de composición. Los factores de que depende la composición de los residuos son relativamente similares a los que definen el nivel de generación de los mismos:

En la Tabla 1.1 se muestra un estudio realizado en México presentado en 1995 dentro del contexto para el manejo de los residuos sólidos domiciliarios presenta los siguientes valores de composición.

Tabla 1.1 Composición de Residuos

COMPONENTE	Valor promedio %	Alto (20.5%)	Medio Alto (34.1%)	Medio Bajo (31.6%)	Bajo (13.7%)
Materia orgánica	49.3	48.8	41.8	54.7	56.4
Papeles y cartones	18.8	20.4	22	17	12.9
escoria, cenizas y lozas	6	4.9	5.8	6.1	7.6
Plásticos	10.2	12.1	11.5	8.6	8.1
Textiles	4.3	2.3	5.5	3.5	6
Metales	2.3	2.4	2.5	2.1	1.8
Vidrios	1.6	2.5	1.7	1.3	1
Huesos	0.5	0.5	0.4	0.6	0.4
Otros	6.9	6.1	8.7	6.1	5.8
PPC (Kg/hb/día)	0.77	1.07	0.85	0.65	0.57

[19]

Nota: Los valores significan un porcentaje estimado de residuos desechados por las familias mexicanas.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

1.5.1 VARIACIONES ESTACIONALES EN LA GENERACIÓN DE RESIDUOS

La cantidad y calidad de los residuos sólidos puede variar en forma significativa a través del año. Comúnmente en climas templados, la cantidad media diaria, semanal y mensual de residuos está sobre la media anual durante los meses de verano. Esto es atribuible en parte al aumento de la basura orgánica (por hábitos y disponibilidad para consumo), además de las probables actividades de mejoramiento urbano comúnmente realizadas en esta época.

En lugares donde la actividad de mejoramiento durante los meses de temporada de vacaciones puede aumentar en varias veces la media anual, aumentando la proporción de residuos domésticos y comerciales.

En lugares donde la generación de residuos industriales representa un porcentaje importante del total, el patrón de generación queda determinado por el tipo de industrias presentes.

1.5.2 CARACTERÍSTICA DE LOS RESIDUOS

HUMEDAD

Es una característica importante para los procesos a que puede ser sometida la basura. Se determina generalmente de la siguiente forma:

Tomar una muestra representativa, de 1 a 2 Kg, se calienta a 80°C durante 24 horas, se pesa y se expresa en base seca o húmeda. La ecuación 1.2 nos indica cómo obtener la humedad.

$$Humedad = \frac{Peso_{Inicial} - Peso_{Final}}{Peso_{Inicial}} \cdot 100 \quad \dots\dots(1.2)$$

Se expresa en porcentaje

Si el denominador es $Peso_{Inicial}$, se habla de humedad en base húmeda

Si el denominador es $Peso_{Final}$, se habla de humedad en base seca

[4]

DENSIDAD

La densidad de los sólidos rellenos depende de su constitución y humedad, porque este valor se debe medir para tener un valor más real. Se deben distinguir valores en distintas etapas del manejo.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Densidad suelta: Generalmente se asocia con la densidad en el origen. Depende de la composición de los residuos; fluctúa entre 0.2 a 0.4 Kg/l o Ton/m³.

Densidad transporte: Depende de si el camión es compactador o no y del tipo de residuos transportados. El valor típico es del orden de 0.6 Kg/l.

Densidad residuo dispuesto en relleno: Se debe distinguir entre la densidad recién dispuesta de la basura y la densidad después de asentado y estabilizado el sitio; la densidad recién dispuesta fluctúa entre 0.5 a 0.7 Kg/l y la densidad de la basura estabilizada fluctúa entre 0.7 a 0.9 Kg/l

PODER CALORÍFICO

Se define como la cantidad de calor que puede entregar un cuerpo. Se debe diferenciar entre poder calorífico inferior y superior. El Poder Calorífico Superior (PCS) no considera corrección por humedad y el inferior (PCI) en cambio sí se mide en unidades de energía por masa, [cal/gr], [Kcal/kg], [BTU/lb]. Se mide utilizando un calorímetro.

Gracias a la ecuación 1.4 también se puede conocer a través de un cálculo teórico, el cual busca en la bibliografía valores típicos de PC por componentes y se combina con el conocimiento de la composición de los residuos:

$$PC = n_0 PC_0 + n_1 PC_1 + \dots + n_n PC_n \quad \dots\dots\dots(1.3)$$

en donde

n_i = Porcentaje en peso del componente

PC_i = Poder calorífico de i

Ejemplo : PC plástico es de 9000 (cal/gr), madera 5000 – 6000 (cal/gr)

[4]

1.6 RECOLECCIÓN

La recolección es la etapa más importante en términos de costos dentro de la gestión de los residuos; la realizan en general cuadrillas de hombres con equipos de recolección consistente en camiones de diversas características.

El sistema de recolección más satisfactorio que pueda proporcionarse a la población resultará después de un estudio cuidadoso en donde inciden numerosos factores como:



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

- Tipo de residuo producido y cantidad
- Característica topográfica de la ciudad
- Clima
- Zonificación urbana
- Frecuencia de recolección
- Tipo de equipo
- Extensión del recorrido
- Localización de la basura
- Organización de las cuadrillas
- Rendimiento de las cuadrillas
- Responsabilidades

El punto de recolección más adecuado es la recogida en la acera, porque reduce el tiempo necesario para cada servicio. La recolección de basuras se realiza generalmente de día en las zonas residenciales y durante la noche en las zonas comerciales de las grandes ciudades, para evitar problemas con el tráfico.

SISTEMAS DE RECOLECCIÓN Y TRATAMIENTO

- **SISTEMA VERTICAL (CONTENEDOR):** Pueden ser cilíndricos o rectangulares. Estos están a la vista o no. Es usual agregar sistemas de compactación. No se aconseja su uso en el caso de hospitales (residuos biopeligrosos).
- **SISTEMA HORIZONTAL:** Existen una infinidad de variaciones sobre este procedimiento. Por ejemplo sistemas de carros a nivel municipal, o a menor escala, como recintos industriales, campos deportivos, etc.
- **SISTEMAS NEUMÁTICOS:** Unifica los sistemas anteriores. Consiste en hacer pasar una corriente de aire aproximadamente a 90 km/h por el ducto para llevar residuos a una central de almacenamiento. Eventualmente se combina con sistemas de tratamiento.

El Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) realizó un estudio de la cantidad de residuos se recolectaron en un periodo de 10 años (1996 - 2006) dicha información se muestra en la Tabla 1.2



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

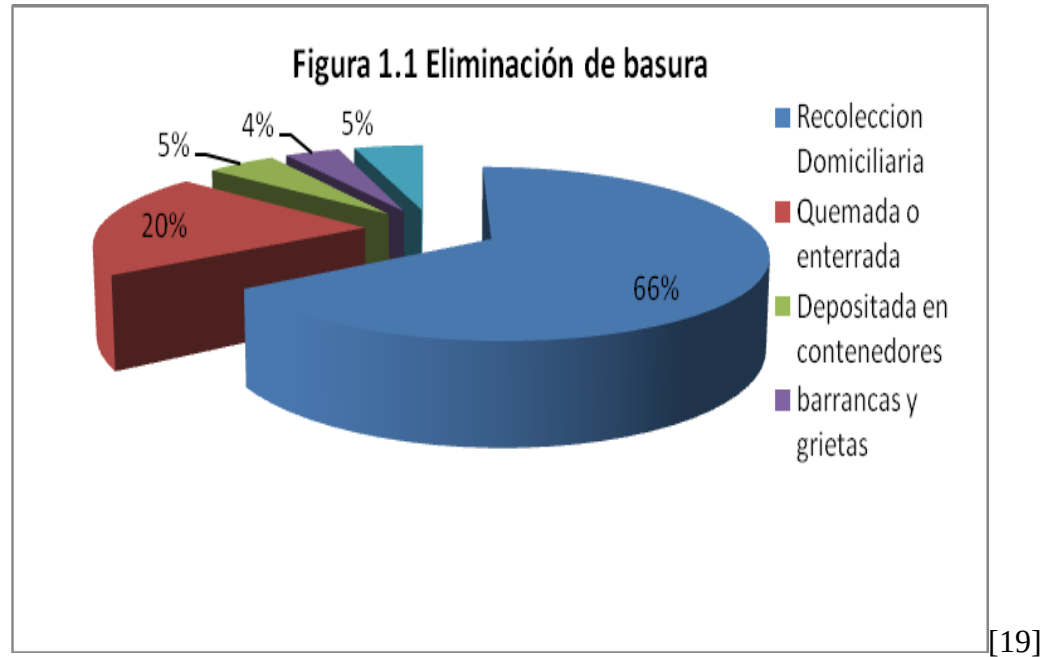
Tabla 1.2. Generación de residuos sólidos urbanos por tipo de basura

Unidades en Miles de Toneladas											
Tipo de Basura	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Total	31 959	29 272	30 550	30 952	30 733	31 489	32 174	32 916	34 603	35 383	36 135
Papel, cartón, productos de papel	4 497	4 119	4 298	4 355	4 324	4 430	4 527	4 909	5 160	5 276	5 388
Textiles	476	436	455	461	458	469	479	495	520	531	542
Plásticos	1 400	1 282	1 338	1 356	1 346	1 379	1 409	2 013	2 116	2 162	2 208
Vidrios	1 886	1 727	1 802	1 826	1 813	1 858	1 898	2 158	2 210	2 261	2 309
Metales	927	849	886	898	891	913	933	1 048	1 160	1 185	1 210
Aluminio	511	468	489	495	492	504	515	587	606	619	633
Ferrosos	257	236	246	249	247	253	259	283	329	336	343
Otros ferrosos ^a	158	145	151	153	152	156	159	178	225	230	234
<u>Basura de comida, de jardines y materiales orgánicos similares</u> ^b	16 747	15 339	16 008	16 219	16 104	16 500	16 859	16 590	17 441	17 953	18 335
Otro tipo de basura (residuos finos, pañal desechable, etc.)	6 028	5 521	5 762	5 838	5 796	5 939	6 068	5 703	5 996	6 015	6 143
NOTA: A partir de 1997 las cifras reportadas se han ajustado con base en estudios de generación per cápita llevados a cabo en pequeñas comunidades, donde se encontró que dicha generación es del orden de 200 a 350 g, cantidades inferiores a las reportadas por años anteriores. ^a Incluye cobre, plomo, estaño y níquel. ^b La parte orgánica de la basura en su proceso de descomposición natural (en la parte anaerobia), genera distintos gases conocidos como biogás, en el que aproximadamente el 50% es CO₂ y el otro 50% es gas metano, mismo que debe quemarse (acuerdos internacionales para el control de emisiones de gases de invernadero y por balance estequiométrico se reducen los gases de invernadero al 9.5%), lo deseable es aprovechar su poder calorífico para generar alguna fuente de energía; cuando la descomposición es controlada con un proceso aeróbico, se obtiene un mejorador de suelo conocido como composta. FUENTE: INEGI. Con base en SEDESOL. DGOT. Subdirección de Asistencia Técnica a Organismos Operadores Urbanos Regionales.											



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Una de las innovaciones del Censo General de Población y Vivienda 2000, fue captar cómo los mexicanos eliminamos la basura generada en casi 22 millones de viviendas; en la Figura 1.1 se muestra dicha eliminación.



En la Tabla 1.3 se observa la información recopilada durante un periodo de 8 años (1999-2006) la cual nos informa el destino de los residuos sólidos en la República Mexicana.



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Tabla 1.3 Disposición final de residuos sólidos urbanos por entidad federativa, 1999 a 2006

Entidad federative	Rellenos sanitarios a								Sitios no controlados y reciclaje							
	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Estados Unidos Mexicanos	16 936	16 912	18 604	19 211	21 140	22 305	22 931	23 523	14 016	13 821	12 884	12 963	11 775	12 297	12 453	12 612
Aguascalientes	241	237	243	274	299	314	327	334	35	39	42	20	0	0	0	0
Baja California	799	793	813	847	1 027	1 083	1 125	1 168	44	148	172	180	46	49	51	51
Baja California Sur	36	36	39	43	117	131	135	139	91	99	101	103	33	33	33	38
Campeche	86	58	58	58	59	60	62	73	149	131	133	135	138	159	162	159
Coahuila de Zaragoza	461	441	452	462	520	567	581	581	222	242	248	254	214	218	220	238
Colima	78	77	80	82	84	87	89	91	70	76	79	81	84	85	88	89
Chiapas	113	109	112	116	119	131	135	313	769	774	797	818	841	902	918	767
Chihuahua	766	752	784	814	848	910	935	953	184	242	246	248	251	258	264	281
Distrito Federal	4 351	4 351	4 351	4 351	4 380	4 500	4 550	4 599	0	0	0	0	0	0	0	0
Durango	263	259	266	271	277	310	309	353	154	141	141	142	143	146	147	111
Guanajuato	234	707	728	931	993	1 061	1 081	1 088	1 144	664	678	506	478	494	503	525
Guerrero	35	32	284	289	296	309	316	367	782	733	499	510	522	531	542	502
Hidalgo	88	83	86	88	91	97	103	134	423	428	438	447	456	472	483	461
Jalisco	1 767	1 699	1 743	1 781	1 836	1 935	1 981	2 005	491	469	478	486	482	492	501	523
México	2 774	2 658	3 429	3 019	3 296	3 406	3 600	3 598	2 317	2 315	1 719	2 292	2 179	2 303	2 302	2 454
Michoacán de Ocampo	60	58	60	118	347	392	397	379	914	905	922	880	668	685	694	727
Morelos	55	52	83	85	111	118	121	124	393	407	389	399	382	408	417	424
Nayarit	0	0	0	107	133	153	154	121	239	230	234	131	108	110	111	149



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Nuevo León	1 416	1 404	1 445	1 482	1 522	1 607	1 668	1 740	69	93	95	97	99	101	84	55
Oaxaca	0	0	0	0	0	0	11	12	682	685	703	720	730	773	781	791
Puebla	675	662	791	812	1 060	1 098	1 130	1 259	647	686	595	610	400	406	418	334
Querétaro Arteaga	313	309	321	332	345	367	377	386	77	107	111	115	119	122	126	132
Quintana Roo	228	225	168	181	195	209	219	227	17	44	118	120	123	127	133	142
San Luis Potosí	303	296	305	312	321	333	339	341	291	283	288	292	296	298	307	316
Sinaloa	402	375	384	625	639	691	700	697	396	384	392	165	168	170	172	192
Sonora	296	288	298	306	370	360	368	361	362	372	378	383	334	407	417	442
Tabasco	0	0	0	0	194	208	212	211	522	521	536	549	368	383	390	406
Tamaulipas	401	372	384	442	457	500	514	532	417	479	494	461	474	511	525	536
Tlaxcala	191	200	206	212	217	234	239	242	29	30	31	31	31	32	33	37
Veracruz de Ignacio de la Llave	237	125	430	437	645	707	715	674	1 589	1 600	1 325	1 343	1 162	1 206	1 212	1 279
Yucatán	266	256	263	269	277	299	307	305	169	182	186	190	194	197	203	217
Zacatecas	0	0	0	64	65	128	131	115	329	311	315	254	256	219	216	235



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

1.7 BIOMASA

Biomasa, abreviatura de masa biológica, es un término genérico que hace referencia a la cantidad de materia viva producida por plantas, animales, hongos o bacterias, en un área determinada. Suele utilizarse para hacer referencia a la materia prima del combustible energético que se obtiene directa o indirectamente de estos recursos biológicos.

Hay otra característica que diferencia a la biomasa de otros recursos naturales, y es el hecho de que es un recurso potencialmente renovable. El carbón, el gas, el petróleo y otros combustibles fósiles, no se consideran biomasa, aunque deriven de material vivo. El tiempo necesario para la formación de estos combustibles (millones de años) hacen que no puedan ser considerados como renovables.

Para evaluar la factibilidad técnica y económica de un proceso de conversión de biomasa en energía, es necesario considerar ciertos parámetros y condiciones que caracterizan y determinan el proceso de conversión mas adecuado y permiten realizar proyecciones de los beneficios económicos y ambientales esperados.

1.7.1 TIPOS DE BIOMASA

a) Biomasa natural. Se produce de forma espontánea en la naturaleza, sin intervención humana. Por ejemplo, las podas naturales de los bosques.

b) Biomasa residual seca. Procede de recursos generados en las actividades agrícolas, forestales, de procesos de la industria agroalimentaria y de la industria de transformación de la madera. Este tipo de biomasa, se puede diferenciar la de origen forestal y la de origen agrícola.

c) Biomasa residual húmeda. Procede de vertidos biodegradables formados por aguas residuales urbanas e industriales y también de los residuos ganaderos.

d) Cultivos energéticos tanto forestales como agrícolas. Son aquellos cultivos realizados tanto en terrenos agrícolas como forestales y que están dedicados a la producción de biomasa con fines no alimentarios.

Los recursos biomásicos se presentan en diferentes estados físicos que determinan la factibilidad técnica y económica de los procesos de conversión energética que pueden aplicarse a cada tipo en particular. Por ejemplo, los desechos forestales indican el uso de los procesos de combustión directa o procesos termoquímicos, los residuos animales indican el uso de procesos anaeróbicos (bioquímicos), etc.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

1.7.2 FUENTES DE BIOMASA

Las fuentes de biomasa que pueden ser usadas para la producción de energía cubren un amplio rango de materiales y fuentes: los residuos de la industria forestal y la acuicultura, los desechos urbanos y las plantaciones energéticas, se usan generalmente, para procesos modernos de conversión que involucran la generación de energía a gran escala, enfocados hacia la sustitución de los combustibles fósiles.

Los residuos agrícolas, como la leña y el carbón vegetal, han sido usados en procesos tradicionales en los países en vías de desarrollo y a usos primarios en pequeña escala, por ejemplo, la cocción de alimentos o las pequeñas actividades productivas como panaderías, calderas, secado de granos, etc.

El estado físico de la biomasa puede clasificarse según el tipo de recurso, como se indica en la Tabla 1.4

Tabla 1.4 Características físicas de distintos recursos de biomasa

Recursos de biomasa	Tipo de residuo	Características físicas
Residuos Forestales	Restos de aserrío: corteza aserrín, astillas.	Polvo, sólido, Humedad relativa (HR)>50%
	Restos de ebanistería: aserrín, trozos, astillas	Polvo sólido, HR 30-45%
	Restos de plantaciones: ramas, corteza, raíces.	Sólido, HR >55%
Residuos agropecuarios	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales,	Sólido, alto contenido humedad
	Cáscara y polvo de granos secos (arroz, café)	Polvo, HR<25%
	Estiércol	Sólido, alto contenido humedad
	Residuos de cosechas: tallos y hojas, cáscaras, maleza, pastura.	Sólido HR>55%
Residuos industriales	Pulpa y cáscara de frutas y vegetales	Sólido, humedad moderada
	Residuos de procesamiento de carnes	Sólido, alto contenido humedad
	Aguas de lavado y precocido de carnes y vegetales	Líquido
	Grasas y aceites vegetales	Líquido, grasoso
Residuos Urbanos	Aguas negras	Líquido
	Desechos domésticos orgánicos (cáscaras de vegetales)	Sólido, alto contenido humedad
	Basura orgánica (madera)	Sólido, alto contenido humedad

[2]



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

1.7.3 CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA

Para evaluar la factibilidad técnica y económica de un proceso de conversión de biomasa en energía, es necesario considerar ciertos parámetros y condiciones que caracterizan y determinan el proceso de conversión mas adecuado y permiten realizar proyecciones de los beneficios económicos y ambientales esperados.

- **COMPOSICIÓN QUÍMICA Y FÍSICA**

Las características químicas y físicas de la biomasa determinan el tipo de combustible o subproducto energético que se puede generar, por ejemplo, los desechos animales producen gas metano, mientras que la madera pueden producir el denominado "gas pobre", que es una mezcla rica en monóxido de carbono (CO). Por otro lado, las características físicas influyen en el tratamiento previo que sea necesario aplicar.

- **CONTENIDO DE HUMEDAD RELATIVA (H.R)**

El contenido de humedad de la biomasa es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%. Muchas veces, los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad muy superior, que obliga a implementar operaciones de acondicionamiento, antes de ingresar al proceso de conversión de energía.

- **PORCENTAJE DE CENIZAS**

El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. En los procesos que incluyen la combustión de la biomasa, es importante conocer de generación de ceniza y su composición, pues, en algunos casos, ésta puede ser utilizada.

- **PODER CALÓRICO**

El contenido calórico por unidad de masa es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa. Su poder calórico está relacionado directamente con su contenido de humedad. Un elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia de la combustión debido a que una gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material.

- **DENSIDAD APARENTE**

Esta se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que presenta, bajo condiciones dadas. Combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requiriéndose menores tamaños de los equipos y aumentando los períodos entre cargas. Por otro lado, materiales con baja densidad aparente necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte y, algunas



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

veces, presentan problemas para fluir por gravedad, lo cual complica el proceso de combustión, y eleva los costos del proceso.

- **RECOLECCIÓN, TRANSPORTE Y MANEJO**

Las condiciones para la recolección, el transporte y el manejo en planta de la biomasa son factores determinantes en la estructura de costos de inversión y operación en todo proceso de conversión energética. La ubicación del material respecto a la planta de procesamiento y la distancia hasta el punto de utilización de la energía convertida, deben analizarse detalladamente para lograr un nivel de operación del sistema por encima del punto de equilibrio, con relación al proceso convencional.

1.7.4 APLICACIONES ENERGÉTICAS

La transformación de la biomasa puede dar origen a distintas energías:

Energía térmica. Agua o aire caliente, vapor. Es la aplicación más extendida de la biomasa natural y residual. Los sistemas de combustión directa se pueden utilizar directamente para cocinar alimentos, para calefacción o secado. Además, es posible aprovechar el vapor que se desprende para producir electricidad o para procesos industriales.

Energía eléctrica. Se obtiene, sobre todo, a partir de la transformación de biomasa procedente de cultivos energéticos, de la biomasa forestal primaria y de los residuos de las industrias. En determinados procesos, el biogás resultante de la fermentación de la biomasa también se puede utilizar para la producción de electricidad. La tecnología a utilizar para conseguir energía eléctrica depende del tipo y cantidad de biomasa. Así se tiene:

Ciclo de vapor: está basado en la combustión de biomasa, a partir de la cual se genera vapor que es posteriormente expandido en una turbina.

Turbina de gas: utiliza gas de síntesis procedente de la gasificación de un recurso sólido. Si los gases de escape de la turbina se aprovechan en un ciclo de vapor se habla de un ciclo combinado.

Motor alternativo: utiliza gas de síntesis procedente de la gasificación de un recurso sólido o biogás procedente de una digestión anaerobia.

Energía mecánica. Son los biocombustibles, pueden sustituir total o parcialmente a los combustibles fósiles, permitiendo alimentar motores de gasolina con bioalcoholes y motores diesel con bioaceites. En muchos países, este tipo de combustibles son ya una



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

realidad, por ejemplo, en Brasil ya son millones los vehículos propulsados con alcohol casi puro obtenido de la caña de azúcar.

La forma de transformar la biomasa en energía depende, fundamentalmente, del tipo de biomasa que se esté tratando y del uso que se quiera dar a esta energía. Los sistemas comerciales para utilizar biomasa residual seca se pueden clasificar en función de que estén basados en la combustión del recurso (hay gran número de calderas para biomasa en el mercado) o en su gasificación. Los sistemas comerciales para aprovechar la biomasa residual húmeda están basados en la pirólisis. Para ambos tipos de recursos, existen varias tecnologías que posibilitan la obtención de biocarburantes.

1.7.5 COGENERACIÓN

La cogeneración consiste en la producción conjunta de energía térmica y eléctrica. Se basa en el aprovechamiento de los calores residuales de los sistemas de producción de electricidad.

Es interesante en instalaciones en donde tanto el consumo térmico como el eléctrico se han elevado.

1.7.6 ENERGÍA QUE PROPORCIONA LA BIOMASA

Aproximadamente:

- **1 kilogramo de biomasa** proporciona **3,500** kilocalorías.
- **1 litro de gasolina** proporciona **10,000** kilocalorías.

Es decir, se necesitan 3 kg de biomasa para obtener la misma cantidad de energía que nos proporciona un litro de gasolina, o lo que es lo mismo, cuando desperdiciamos 3 kg de biomasa estamos desaprovechando el equivalente a un litro de gasolina. [2]

1. 8 BIOGÁS

Mezcla gaseosa producida por la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas y cuyos principales componentes son el Metano (CH_4) y el Dióxido de carbono (CO_2) resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire por la acción de un microorganismo.

Al no contar con una alternativa de uso el metano es arrojado a la atmósfera contribuyendo al incremento en la concentración de gases de efecto invernadero, no obstante si se cuenta con un sistema apropiado de recolección y acondicionamiento puede ser usado como combustible, convirtiéndose por combustión en CO_2 y vapor de



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

agua, el cual es asimilado por los cultivos y retornado en su mayoría al suelo, disminuyendo así su concentración en la atmósfera.

El Biogás es una mezcla de gases que está compuesta básicamente por:

- Metano (CH_4): 40 - 70 % vol.
- Dióxido de carbono (CO_2): 30 - 60 % vol.
- Otros gases: 1 - 5 % vol.
- Incluyendo:
- Hidrógeno (H_2): 0 - 1% vol.
- Sulfuro de hidrógeno (H_2S): 0 - 3 % vol.

El biogás puede ser utilizado como cualquier otro combustible, en sustitución de la leña, el queroseno, el gas licuado, etc., como para el alumbrado, mediante lámparas adaptadas. Mezclas de biogás con aire, con una relación 1:20, forman un gas detonante altamente explosivo, lo cual permite que también sea empleado como combustible en motores de combustión interna adaptados.

Las propiedades características del Biogás dependen de la presión y la temperatura. El valor calorífico del biogás es de aproximadamente 6 kWh/m^3 que corresponde aproximadamente a la mitad de un litro de combustible diesel; el valor calorífico neto depende de la eficiencia de los quemadores o de su aplicación. [13]

Es importante aclarar que este gas puede usarse como combustible sólo cuando el metano se encuentra en concentraciones mayores o iguales a 50 %.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

CAPITULO 2 BIODIGESTORES

La tecnología del biogás es conocida en la mayoría de los países en vías de desarrollo, misma que ha alcanzado un extenso uso en las últimas décadas. Los biodigestores en estos países son generalmente alimentados con estiércol animal, un recurso biomásico con un gran potencial. También se han instalado con éxito unidades más pequeñas, alimentadas con los desperdicios de las cocinas, lirios acuáticos, excremento humano y paja.

2.1 ANTECEDENTES

En el año de 1970, el gobierno chino desarrolló el primer programa de biomasa a gran escala cuando instaló 7 millones de biodigestores, principalmente en la provincia de Sechuán, que proporcionan biogás para cocinar y alumbrar a unos 25 millones de chinos. Los biodigestores chinos pueden producir de 1 a 4 m³ de biogás aproximadamente.

El segundo programa más grande fue lanzado en la India en 1985, se instalaron 280 mil biodigestores. En ese país se encuentran en uso varios modelos de biodigestores, sin embargo "Deenbabdhu" (que significa amigo del pobre) es considerado como el más económico. Un gran número de granjas lecheras, que durante muchos años habían sido una fuente importante de contaminación para los ríos, están usando los biodigestores para procesar el estiércol animal y otros desechos, y el biogás resultante se usa para generar energía. Los biodigestores indios producen también entre 1 y 4 m³ de biogás.

Los países industrializados han construido biodigestores más grandes y con un control más elaborado. En estos países, los biodigestores de metano tienden más a utilizar los lodos de aguas residuales, los desechos municipales sólidos o las aguas residuales de origen industrial (procesamiento alimenticio, lecherías, cerveceras, farmacéuticas, pulpa, papel y producción de alcohol). En Alemania se ha implementado la primera planta piloto con el fin de satisfacer su demanda de electricidad usando las aguas residuales y los desechos para obtener energía a través de la conversión anaerobia.

El gas producido en los rellenos sanitarios está adquiriendo gran importancia. Existen algunas plantas generadoras de energía por medio del biogás que ya están operando en Austria, Francia, Finlandia, el Reino Unido y los Estados Unidos. La planta más grande que genera energía a partir de los rellenos sanitarios en Europa está en Viena (Austria) mostrada en la Figura 2.1 la cual ha recuperado gas para producir energía desde 1991, y algunos países con clima seco como Israel han instalado plantas de biogás para la explotación de los desechos municipales y agrícolas, así como también de las aguas residuales.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Se han desarrollado algunos programas de computación a fin de proporcionar una evaluación preliminar acerca de la viabilidad técnica y económica de la digestión anaerobia del estiércol animal, los desechos y las aguas residuales industriales, los desechos municipales sólidos o de combinaciones (co-digestión). Los programas son completamente interactivos, permitiendo la selección de varios tipos de biodigestores y materias primas.

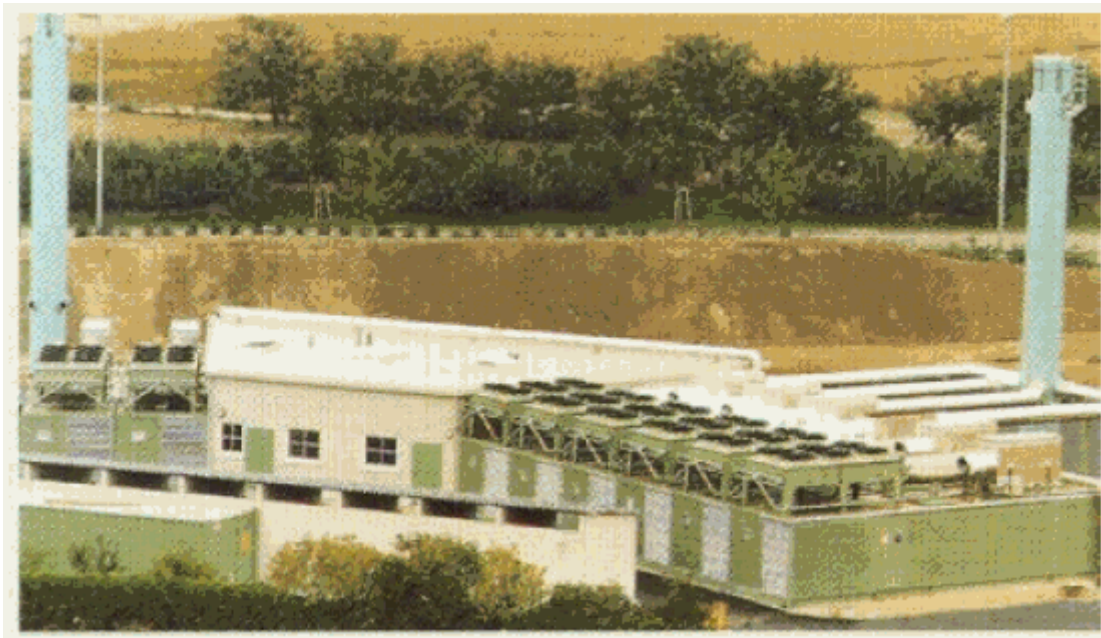


Figura 2.1 Recuperación de gas de un relleno sanitario. (Foto Jenbacher AG/BMWA planta térmica y de fuerza motriz combinada, Austria.) [15]

2.2. DEFINICIÓN DE BIODIGESTOR

Un digestor de desechos orgánicos o biodigestor es un contenedor cerrado, hermético e impermeable (reactor), dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos de animales y humanos, desechos vegetales, *no se incluyen cítricos ya que acidifican*) con una determinada cantidad de agua para que se descompongan, produciendo gas metano (biogás) y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio. En la Figura 2.2 se muestran las partes de un biodigestor.

La digestión anaeróbica es realizada mediante un grupo de bacterias que no requieren de oxígeno para vivir, también llamadas microorganismos bacterianos anaeróbicos. Al actuar sobre los desechos orgánicos de origen vegetal y animal (estiércol, residuos alimenticios, residuos forestales, desechos agrícolas), producen una mezcla de gases con alto contenido de CH_4 (metano) llamada biogás, sumamente eficiente si se emplea como combustible.

PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

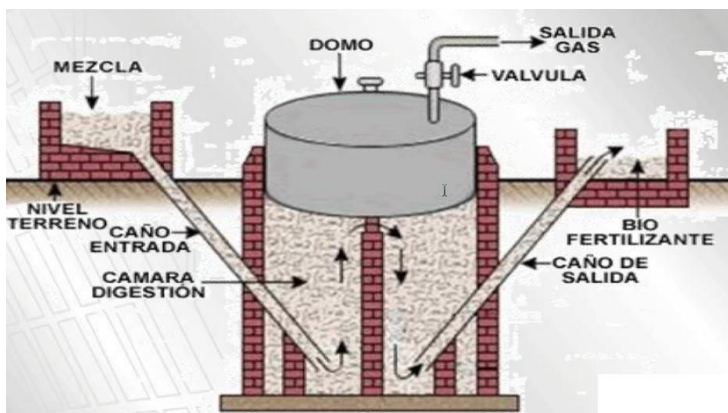


Figura 2.2 Esquema de un Biodigestor [15]

Es así que el principal componente en el sistema para la digestión anaeróbica son las bacterias anaeróbicas que digieren bajo condiciones controladas la materia orgánica a fin de producir biogás. Casi toda la porción líquida orgánica es digerida, y lo que queda es mayormente agua, que puede pasar a otro depósito para su evaporación, o ser utilizada en riego y fertilización orgánica.

Como resultado de este proceso se generan residuos con un alto grado de concentración de nutrientes y materia orgánica (ideales como fertilizantes) que pueden ser aplicados frescos, pues el tratamiento anaerobio elimina los malos olores y la proliferación de moscas. Inicialmente los fertilizantes orgánicos se habían considerado solamente un producto secundario, pero actualmente se está considerando de la misma importancia, o mayor que el biogás ya que provee un fertilizante natural que mejora de manera significativa el rendimiento de las cosechas.

Los beneficios como resultado de la digestión anaeróbica son:

- Formación de biogás.
- Potencial para generar electricidad.
- Reprocesar el calor generado.
- Reducción de patógenos, virus, protozoarios y otros organismos causantes de enfermedades.
- Mejoramiento en la aplicación de nutrientes al suelo, porque casi 70% del nitrógeno contenido en el material orgánico se convierte en amonio que es una fuente primaria en los fertilizantes orgánicos.
- Reducción de malos olores.
- Disminución hasta un 90% en el riesgo de contaminación en el agua.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

2.3 REACTORES Ó SISTEMAS ANAEROBIOS.

En el presente hay a nivel mundial decenas de tipos de reactores o biodigestores anaerobios ya aplicados o se están estudiando con intensidad a escala de laboratorio.

Existen diferentes maneras de clasificar los reactores anaerobios que procesan aguas residuales, pero la forma más general es agruparlos y clasificarlos en biodigestores de primera generación y de segunda generación tal como lo muestra la Tabla 2.1

Tabla 2.1 Clasificación de los reactores anaerobios

De 1ra generación	De 2da generación	
	Con crecimiento en soporte	Con crecimiento disperso
Tanques sépticos	Híbrido	Lodo activado anaerobio
Lagunas anaerobias	Lecho fijo	UASB
Minibiodigestores	Lecho fluidizado o expandido	EGSB
Biodigestores convencionales	Filtro anaerobio con carbón activado	Circulación interna
	Inmovilización de microorganismos	Con ascensión de gas
	Asociado a partículas suspendidas	Modificado de alta velocidad
	Contactor rotatorio anaerobio	Membrana
	Columna de plato	Flujo horizontal con deflectores
		Dos etapas
		Percoladores en serie
		Tubular inclinado

[2]

En los reactores de primera generación, el tiempo de retención hidráulico es igual al tiempo de retención de sólidos. En los de segunda generación, el tiempo de retención de sólidos es mayor que el tiempo de retención hidráulico y como consecuencia, el proceso es mucho más eficiente.

PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Los sistemas de tratamientos anaerobios de segunda generación más aplicados son los siguientes: reactor o biodigestor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodo (UASB), reactor anaerobio de lecho fijo, proceso de contacto anaerobio o biodisco anaerobio o contactor rotatorio anaerobio, reactor anaerobio con circulación interna (ICSB), reactor anaerobio con lecho granular expandido (EGSB), reactor híbrido, lecho fluidizado y/o expandido.

2.3.1 MINIBIODIGESTORES

Estos biodigestores son utilizados fundamentalmente, para obtener biogás a partir de residuos domésticos y/o residuos agropecuarios (Souza, 1984; Larrondo, 1983). En el primer caso sirven a una familia, o a pocas personas si son varias familias, y en el segundo caso, a pequeñas instalaciones pecuarias respectivamente. En general éstos consisten en fosas o pequeños tanques que funcionan, casi siempre, en forma semicontinua.

En general no son altamente eficientes desde el punto de vista de la biodegradación de los residuos y además necesitan elevados tiempo de retención para lograr un buen comportamiento del proceso. Los minibiodigestores más utilizados a nivel mundial son los de tipo indio o los del tipo chino, existiendo cientos de miles y millones, respectivamente.

Los minibiodigestores operan bajo el principio hidrostático de que la entrada de la carga diaria residual al biodigestor es por gravedad hasta el fondo del tanque, además de producir agitación, provoca la salida de un volumen equivalente de lodos digeridos.

El biodigestor tipo indio consiste en un tanque vertical que tiene instalado una campana flotante recolectora de biogás. De esta forma, la presión del gas sobre la superficie de la mezcla es muy baja, de alrededor de 300 mm de columna de agua. Con esta campana se logra, además, una presión constante, lo que permite una operación eficiente de los

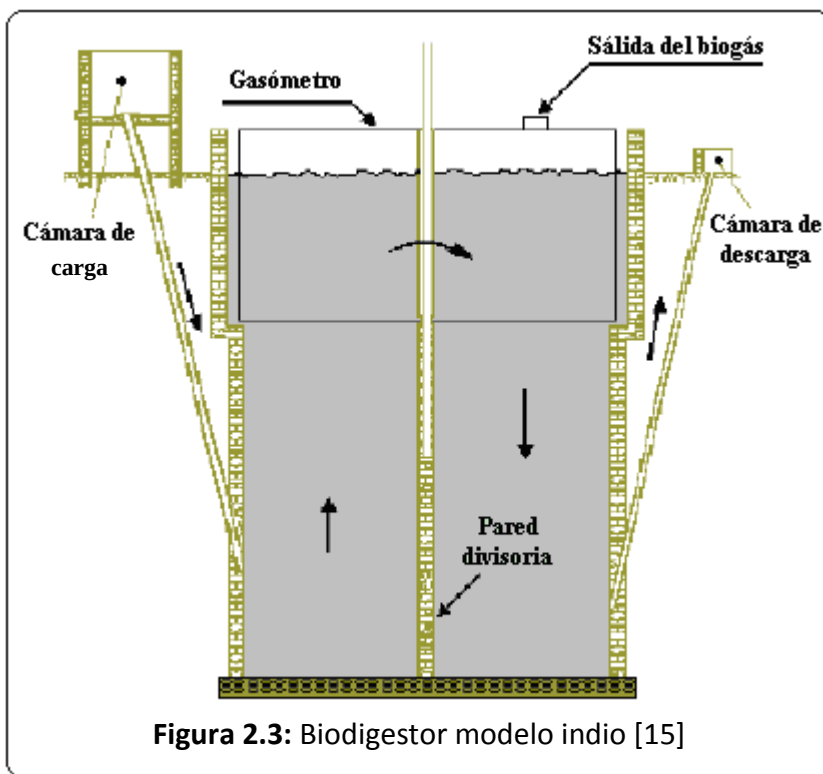


Figura 2.3: Biodigestor modelo indio [15]

PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

equipos a los que alimenta. La campana también ayuda al rompimiento de la espuma que se forma en muchos biodigestores. En estos se alcanzan productividades volumétricas (Pv) de 0.5 a 1m³ de biogás/volumen de reactor por día. Un esquema de dicha instalación se muestra en la Figura 2.3.

El biodigestor chino no tiene campana flotante, sino techo fijo para la recolección del biogás. Son tanques redondos y achatados en el techo y el piso es en forma de domo; en este caso, a medida que aumenta la producción de gas, aumenta la presión en el domo o cúpula fija, forzando al líquido en los tubos de entrada y salida a subir, llegándose a alcanzar presiones internas de hasta más de 10 mm de columna de agua. Como consecuencia de la variación de presión, la que aumenta al generarse el gas y disminuye al consumirse éste, lo que reduce la eficiencia en los equipos consumidores. La Pv en los biodigestores chinos está, generalmente, entre 0.15 y 0.2 m³ /m³ *día. Un esquema de dicha instalación se muestra en la figura 2.4. Los tiempos de retención de operación para los biodigestores chinos son de 30 a 60 días. Se requiere para alcanzar la misma eficiencia (máximo 50% de reducción de la materia orgánica) de 1/2 a 1/3 de este tiempo de retención en los biodigestores tipo indio.

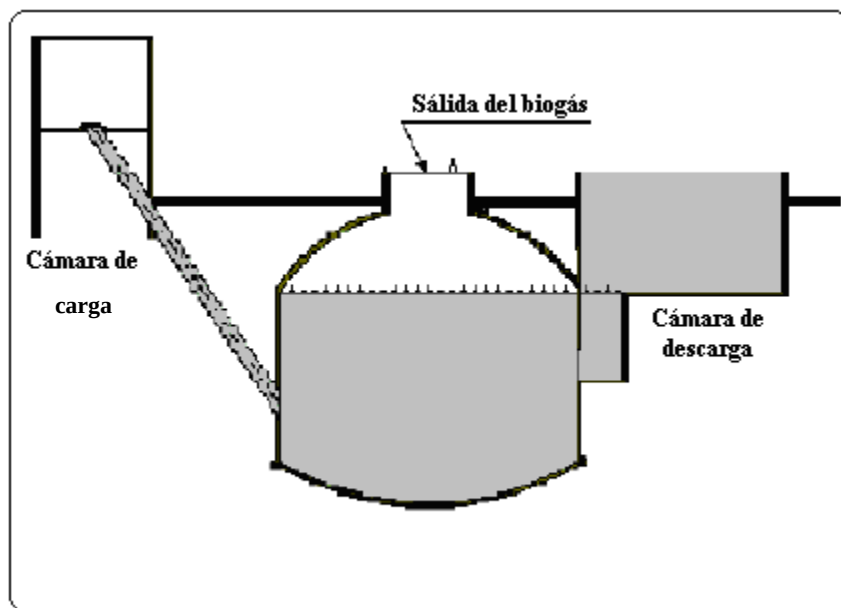


Figura 2.4 Biodigestor modelo chino [20]

PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

2.3.2 DIGESTORES HORIZONTALES DE DESPLAZAMIENTO

Generalmente son alargados y enterrados a poca profundidad, semejando un canal y operados a régimen semicontinuo. Entra la carga por un extremo del digestor y salen los lodos por el otro extremo; figura 2.5

Se recomiendan estos biodigestores cuando se requiere trabajar con volúmenes mayores a 15m³. En México existen varios biodigestores de este tipo en:



Figura 2.5 Biodigestor Horizontal[15]

- El Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), Cuernavaca, Morelos; este tiene la finalidad de producir biogás que es utilizado para generar energía eléctrica.
- La Universidad Autónoma de Chapingo (UACH) se produce biogás a partir de excremento de cerdos
- La Fundación de Ecodesarrollo Xochicalli en Ameca Ameca

2.3.3 DIGESTORES DE RÉGIMEN CONTINUO

Este tipo de biodigestores son usados principalmente para el tratamiento de aguas residuales, en la actualidad se han usado para otros sustratos; generalmente son muy grandes ya que su aprovechamiento es en aplicaciones industriales.

2.3.4. DIGESTORES DE OTRO TIPO

Las investigaciones en este tema buscan la eficiencia para la obtención del biogás, degradación de la materia prima, reducción del tiempo de retención; por lo que se ha llevado al desarrollo de diversos biodigestores como:

- **Filtros anaerobios:** (Construidos en el CINVESTAV) Consta de un sistema de alimentación continua y alta dilución (1 al 1.5% de sólidos totales), logrando retener a los microorganismos dentro del digestor durante 20 a 30 días mientras que el líquido activo pasa a través del sistema en tiempos de 1 a 5 días, logrando



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

reducir el tamaño de la planta, disminución de costos de instalación, operación y mejora en la eficiencia de la obtención de biogás.

- **Digestores de etapas múltiples:** Diseñados para aislar grupos de bacterias en cámaras separadas, cada una de las cuales trabaja en las condiciones óptimas para el desarrollo del tipo de microorganismos que contiene, logrando una mayor degradación de materia orgánica alimentada y consecuentemente el aumento del biogás obtenido.

2.4 APLICACIONES DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia es considerada como una de las fuentes de energía más económicas y de fácil adquisición para pequeñas comunidades. El biogás obtenido puede ser utilizado para múltiples aplicaciones: cocción de alimentos, iluminación, refrigeración, calefacción ambiental para uso residencial y comercial, calor útil para procesos industriales, poner a trabajar las bombas de agua y otras maquinarias agrícolas, motores de combustión interna para energía motriz, y generación de electricidad tal como lo muestra en la figura 2.6.

Entre los factores que determinan el uso de la digestión anaerobia como una alternativa viable que garantiza una fuente de energía renovable y confiable más limpia podemos citar los siguientes:

- Ayuda a mitigar el cambio climático, al prevenir que el metano sea liberado en el aire.
- Reduce la contaminación del agua, al usar las materias primas que podrían terminar en ríos o lagos.
- La materia prima es de fácil recuperación en ganado estabulado o donde los costos laborales son bajos.
- Es económicamente viable con un abastecimiento regular de estiércol de ganado o de otra materia prima.
- Requiere un área pequeña, en comparación con la disposición de los desechos municipales sólidos.
- Incrementa las condiciones de higiene al reducir las molestias causadas por el olor.
- Ayuda a reducir la flora, que como los lirios acuáticos se han vuelto una plaga.

PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Además del combustible, el proceso de fermentación proporciona lodos residuales que pueden usarse como alimento para animales o como abono de excelente calidad y de más rápida producción, contribuyendo de esta manera a la conservación y el sostenimiento de la fertilidad del suelo.

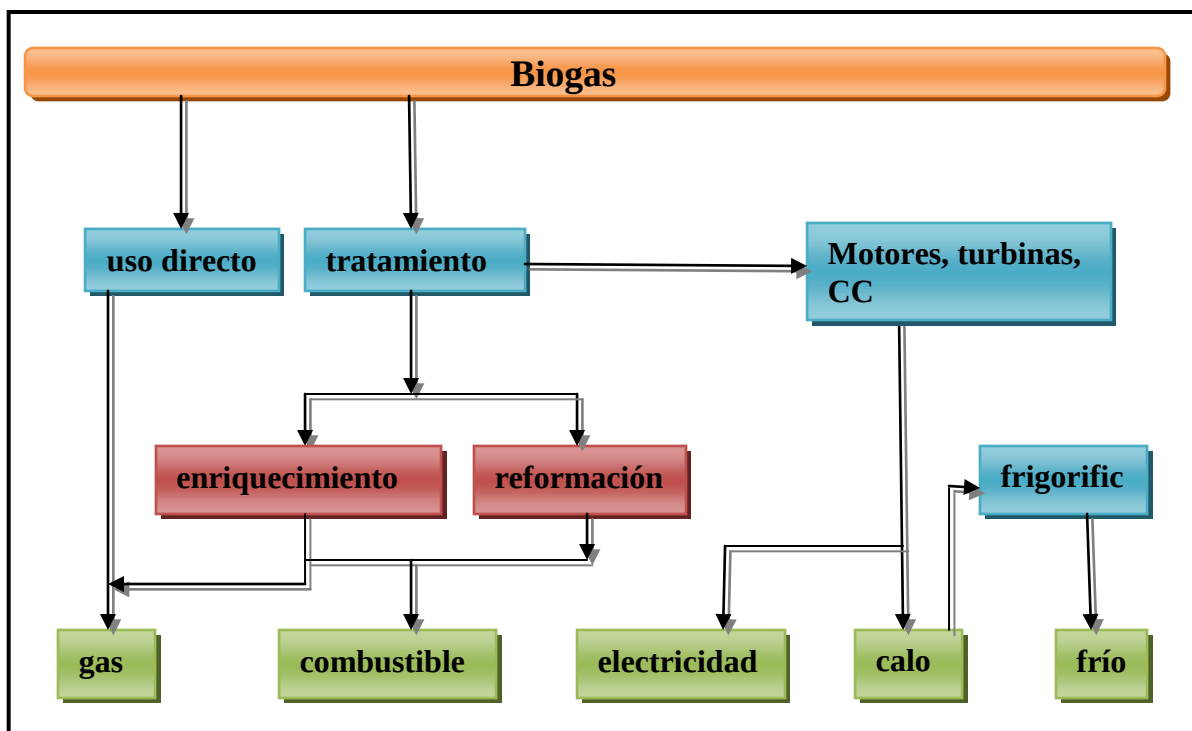


Figura 2.6 Aplicaciones de la digestión anaerobia

2.5 PROCESOS DE CONVERSIÓN DE LA BIOMASA

Antes de que la biomasa pueda ser usada para fines energéticos, tiene que ser convertida en una forma más conveniente para su transporte y utilización. A menudo, la biomasa es convertida en formas derivadas tales como carbón vegetal, briquetas, gas, etanol y electricidad.

Las tecnologías de conversión incluyen desde procesos simples y tradicionales, como la producción de carbón vegetal en hogueras bajo tierra, hasta procesos de alta eficiencia como la dendro-energía y la cogeneración. Los principales procesos de conversión son:

a) Conversión Termoquímica

La conversión termoquímica está basada en la descomposición de la biomasa por medio de calor. Esta transforma a la biomasa en productos con un más alto valor o más convenientes, dependiendo de las condiciones del proceso, se obtienen diferentes proporciones de productos sólidos, líquidos y gaseosos:



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Combustión. Se somete a la biomasa a altas temperaturas con exceso de oxígeno. Es el método tradicional para la obtención de calor en entornos domésticos, para la producción de calor industrial o para la generación de energía eléctrica.

Pirólisis. Se somete a la biomasa a altas temperaturas (alrededor de 500 °C) sin presencia de oxígeno. Se utiliza para producir carbón vegetal y también para obtener combustibles líquidos semejantes a los hidrocarburos.

Gasificación. Se somete a la biomasa a muy altas temperaturas en presencia de cantidades limitadas de oxígeno, las necesarias para conseguir así una combustión completa. Según se utilice aire u oxígeno puro, se obtienen dos productos distintos, en el primer caso se obtiene gasógeno o gas pobre, este gas puede utilizarse para obtener electricidad y vapor, en el segundo caso, se opera en un gasificador con oxígeno y vapor de agua y lo que se obtiene es gas de síntesis. La importancia del gas de síntesis radica en que puede ser transformado en combustible líquido.

b) Conversión Bioquímica

Consiste** en la transformación de la biomasa por la acción de microorganismos o de enzimas, que son añadidas a los medios de reacción como catalizadores. Los métodos bioquímicos son más adecuados a biomazas con un alto contenido de humedad, debido a que tanto los microorganismos como las enzimas sólo pueden ejercer sus acciones en ambientes acuosos, entre los procesos de conversión bioquímica se encuentran:

- Digestión anaerobia
- Fermentación alcohólica

c) Conversión Fisicoquímica (Prensado/extracción)

La ruta de conversión fisicoquímica produce un biocombustible líquido a partir de la biomasa que contiene aceite vegetal. Esta tecnología es similar a las rutas de conversión para producir aceite vegetal en la industria alimenticia.

El aceite vegetal se produce al prensar y/o extraer el aceite de la semilla. De manera que sólo se pueden usar especies que contienen aceite, como la semilla de colza, el girasol, el frijol de soya y el aceite de palma, etc.

2.6 DESCOMPOSICIÓN ANAEROBIA

El proceso anaerobio es aquel en que se efectúa la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno molecular como aceptor de electrones. Tal es el caso, por ejemplo, de los procesos de producción de alcohol, los procesos de desnitrificación y de digestión anaerobia, éstos dos últimos empleados en el tratamiento de aguas residuales.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Los procesos de digestión anaerobia ocurren normalmente en la naturaleza, siendo los nichos de estos procesos el fondo de los ríos, los lagos y el mar, las ciénagas y el tracto intestinal de prácticamente todos los animales.

El proceso de digestión anaerobia se emplea en el tratamiento de residuales sólidos o líquidos cuando la concentración de materia orgánica es tan elevada que no resulta económico el tratamiento aerobio. Esta situación se presenta generalmente cuando la concentración de la demanda química de oxígeno (DQO) es relativamente elevada así como la demanda biológica de oxígeno (DBO).

La ventaja principal de los procesos anaerobios con relación a los aerobios se fundamenta en la transformación de la materia orgánica a través de una tecnología de bajo consumo energético, obteniéndose, un balance comparativo de energía y de masa entre ambos procesos, los resultados se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Balance energético de los procesos aerobios y anaerobios de degradación

Proceso aerobio	Proceso anaerobio
Durante los procesos aerobios cerca del 60% de la energía se consume durante la síntesis de nueva biomasa (células de microorganismos) y el 40% de la energía se pierde en la forma de calor de reacción.	Durante los procesos anaerobios casi 90% de la energía que existe originalmente en el sustrato (residuos) se retiene en el biogás que se produce durante estos procesos perdiendo solamente el 7% de la energía inicial como calor de reacción.
Durante los procesos aerobios cerca del 50% del carbono contenido en el sustrato se convierte a biomasa y otros 50% pasa a bióxido de carbono.	Durante los procesos anaerobios cerca del 95% pasa a biogás (metano (CH_4 , CO_2) y sólo el 5% es convertido a biomasa.

[7]

Lo anterior trae como consecuencia los aspectos prácticos siguientes:

- En los procesos anaerobios se consume mucho menos energía externa, fundamentalmente eléctrica, que en los procesos aerobios, no necesitándose equipos mecánicos para el desarrollo de estos (por ejemplo compresores o agitadores mecánicos) además, se obtiene energía, en forma de gas combustible, útil para cualquier fin energético.
- En los procesos anaerobios sólo se generan del 10% al 30% de los lodos que se producen en los aerobios, lo que disminuye considerablemente los costos de disposición final de estos; además, los lodos anaerobios están mucho más estabilizados que los aerobios.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

- En los procesos anaerobios no se producen aerosoles potencialmente peligrosos para el ambiente circundante de la planta de tratamiento.
- Por cada kilogramo de DBO eliminado por el metabolismo bacteriano, la vía aerobia (lodo activado) requerirá 1 Kwh de energía eléctrica para el equipo de aeración. Mientras la vía anaerobia producirá el equivalente de 3 Kwh, como energía química acumulada en el CH_4 , la cual puede ser convertida en una máquina de combustión acoplada a un generador eléctrico de eficiencia media (20%), lo que resulta en 0.6 Kwh de energía eléctrica/Kg de DQO removida.
- La aplicación de un proceso anaerobio previo a un sistema aerobio puede mejorar la sedimentabilidad del lodo contribuyendo a mantener valores constantes del índice volumétrico de lodo y un control mayor del fenómeno de abultamiento en el sistema aerobio.

2.7 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

Durante mucho tiempo se consideró a la digestión anaerobia como un sistema bifásico, compuesto por la fase no metanogénica en que las bacterias anaerobias transformaban los sustratos en productos solubles y gaseosos incluyendo acetatos, CO_2 , H_2 ; y otra, la metanogénica donde las bacterias formadoras de metano (CH_4) utilizaban el acetato, mezclas de H_2 y CO_2 entre otros sustratos para su metabolismo. Los términos con que se han identificado estas fases (acidificación y gasificación) no fueron del todo correctos; por cuanto, en la primera etapa no todos los productos que se forman son ácidos; así como no todos los productos gaseosos son derivados de la llamada etapa de gasificación. Más tarde, se admitió que en la fermentación bacteriana intervienen poblaciones microbianas diversas, en la que se distinguen cuatro etapas: *hidrólisis*, *acidogénesis*, *acetogénesis* y *metanogénesis*.

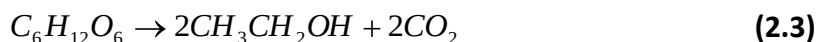
- **Hidrólisis o licuefacción:** Durante esta primera etapa la materia orgánica está compuesta esencialmente de biopolímeros (polisacáridos, lignina, proteínas, ácidos nucleicos y lípidos). Estos sustratos están presentes en forma sólida, estado bajo el cual es difícil que los microorganismos bacterianos anaeróbicos toman los nutrientes necesarios si no fuera por la acción de las exoenzimas (estas son excretadas por bacterias) que hidrolizan las sustancias de alto peso molecular, generando una mezcla de oligómeros y monómeros. Por ejemplo: las proteínas son hidrolizadas en peptonas (solubles en agua y soluciones salinas), aminoácidos y cetoácidos, mientras que la hidrólisis de polisacáridos dan como resultado la formación de azúcares más simples (principalmente hexonas), ácidos orgánicos y alcoholes. Ejemplo de lo anterior, es la actividad de *Clostridium thermocellum* que transforma la celulosa en etanol, hidrógeno y gas carbónico, y la celobiosa en ácido



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

acético y ácido láctico. En esta fase, la flora microbiana implicada es muy variada y comprende grupos anaerobios facultativos.

- **Acidogénesis:** Los ácidos grasos, los aminoácidos y, los azúcares son convertidos por las bacterias acidogénicas en alcoholes, bióxido de carbono, hidrógeno y en ácidos carboxílicos como el ácido acético, valérico, propiónico, butírico también llamados ácidos grasos volátiles (AGV). Los ácidos grasos de cadena larga son transformados en ácidos grasos de cadena corta por sucesivas β -oxidaciones (Graindorge, 1990). La β -oxidación transforma un ácido de n carbonos en un ácido de $(n-2)$ carbonos liberando al mismo tiempo acetatos y, de esta manera, los ácidos con número par de carbonos producen acetatos únicamente, mientras que los ácidos con número impar dan como resultado acetatos y propionatos. Las siguientes reacciones (2.1-2.3) describen globalmente el proceso bioquímico de acidogénesis pudiendo acompañarse éste de una fermentación alcohólica (reacción 2.3):



La flora acidogénica es muy diversa y está constituida de bacterias anaerobias facultativas (entero-bacterias, *Streptococos*, *Bacillus*, *Micrococcus*, etc.), entre las cuales se puede mencionar a la *Ruminicola clostridium* y *Bifido bacterium*. García (1983) señala que en el grupo de las acidogénicas anaerobias, *Clostridium* representa el género más importante. Si los AGV generados no son degradados durante la fase de acetogénesis, éstos se acumulan progresivamente, lo que trae consigo una disminución en el pH del medio cuando el efecto amortiguador del medio es rebasado. Esta acidificación puede ser la causa de la inhibición en el desarrollo de los microorganismos acetogénicos y metanogénicos, debido a que ambos crecen en un medio neutro.

- **Acetogénesis:** Durante el curso de esta etapa, los AGV y los alcoholes formados anteriormente, son transformados en acetato, gas carbónico, e hidrógeno. El desarrollo de las bacterias acetogénicas es relativamente lento. Estas bacterias forman grupos muy heterogéneos, según Graindorge (1990), este grupo tiene tres poblaciones distintas:
 - I. **Bacterias fermentativas.** En cultivo puro, estas bacterias producen alcoholes, acetatos e hidrógeno y se caracterizan también por orientar su metabolismo hacia la producción privilegiada de acetato. Estas poblaciones participan

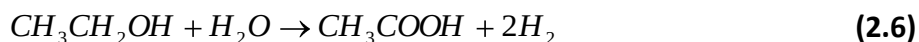


PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

también en la etapa de hidrólisis, por ejemplo, los géneros *Selomonas*, *Clostridium*, *Ruminococcus*; de forma más específica Kubiak y Dubuis (1985) mencionan a *Clostridium thermoaceticum*, *Clostridium formicoaceticum* y *Acetobacterium woodii*.

- II. **Bacterias productoras obligadas de hidrógeno (OHPA por sus siglas en inglés).** Estas bacterias degradan los AGV (propionato, butirato, lactato, entre otros) y alcoholes (etanol) en acetato. Los principales géneros son *Syntrophomonas* y *Syntrophobacter*, los cuales (en presencia de Archaea) degradan primeramente el butirato y valerato y el propionato en segundo término. El desarrollo de estas bacterias es muy lento.
- III. **Bacterias homoacetogénicas.** Estas bacterias producen acetato como único metabolito, esto puede ser a partir de azúcares o a partir de mezclas H_2/CO_2 es poco significativo en comparación con la metanogénesis (se han contabilizado 100 veces menos bacterias homoacetogénicas que Archaea en los biotipos anaerobios según Braun y colaboradores, 1981).

Las reacciones siguientes (2.4-2.6) describen en forma general el proceso de acetogénesis, a partir de ácido propiónico, butírico y del etanol respectivamente (Dumont y colaboradores, 1993):

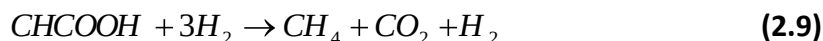


- **Metanogénesis:** Durante esta etapa, el ácido acético y el metanol (u otros compuestos simples eventualmente formados) son transformados en gas carbónico y en metano. En este proceso el hidrógeno es utilizado para la reducción del CO_2 y la formación de metano. Según Barlaz (1997) los sustratos más comunes para las Archaea son el acetato y la mezcla H_2/CO_2 . Los otros sustratos posibles son el formiato, el metanol y aminas o sulfuros metilados. La conversión del lactato en metano es igualmente posible, en la cual, de acuerdo a lo reportado por Cappenberg y Printis (1974) el lactato es consumido durante el proceso más rápido que el acetato. En los biodigestores, la conversión de acetato (acetoclastia) es la principal vía de producción de metano (Ferry 1989). Por su parte Braindorge (1990), menciona que en un biodigestor, aproximadamente 70% del metano producido proviene de la vía acetato y 30% de la vía H_2/CO_2 . En esta misma fase también pueden ser transformados otros sustratos, sin embargo estas otras vías son despreciables por la cantidad de biogás generado.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Mediante las reacciones (2.7-2.10) se describe la fase de la Metanogénesis a partir de diversos sustratos (Dumont y colaboradores 1993).



Las Archaea tienen un crecimiento muy lento, el cual puede ser de 5 a 6 veces más lento que el de las bacterias acidógenas (Kubiak y Dubuis, 1985). Por lo anterior, la fase de metanogénesis puede llegar a ser la etapa cinéticamente limitante en un biodigestor, cuando son utilizados sustratos de hidrólisis rápida. Se considera que las Archaea son parte de una clase diferente en el reino de los protistas. Estos microorganismos son llamados así para subrayar su carácter ancestral y su metabolismo adaptado a las condiciones del medio en las que la vida se originó en la tierra. Las Archaea pertenecen a dos grupos:

- I. **Las acetoclastas**, que comprenden los géneros *Methanosarcina* y *Methanothrix*, las cuales metabolizan el acetato, el metanol, las metilaminas y, para algunas *Methanosarcina*, la mezcla H_2/CO_2 .
- II. **Las hidrogenófilas**, que reagrupan un número más elevado de géneros, quienes utilizan la mezcla H_2/CO_2 y, para ciertos géneros, el sustrato utilizado es el formiato.

La morfología de la Archaea es variada, podemos encontrar bacilos, espirilos, cocos y sarcinas. De acuerdo a lo reportado por Petroff (1983), los tiempos de generación varían con la especie y el sustrato consumido, que van desde algunas horas (utilizando la mezcla H_2/CO_2) hasta varios días (utilizando acetato, nueve días a $35^\circ C$ para *Methanothrix soehngenii*).

Las cuatro etapas metabólicas que ocurren en los procesos de digestión anaerobia pueden ser representadas en la Figura 2.7.

En el proceso de conversión anaerobia también intervienen otros factores como por ejemplo: pH, temperatura, disponibilidad de nutrientes, presencia de sustancias tóxicas, tiempo de retención, relación carbono – nitrógeno (C:N) y nivel de carga (An, 1996).

PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

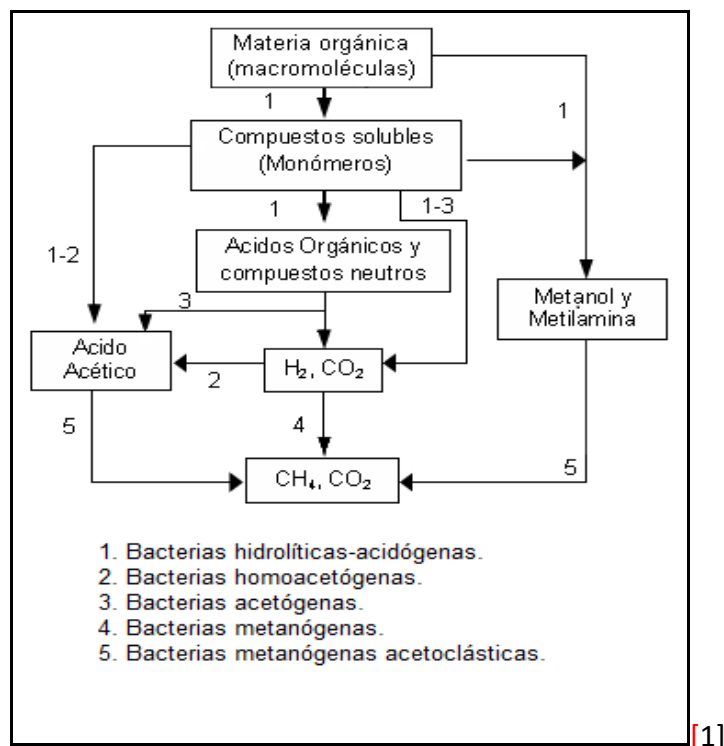


Figura 2.7. Etapas de la fermentación bacteriana (Montalvo, 2003)

2.7.1 pH

La mayor parte de las bacterias se desarrollan óptimamente a pH cercano a la neutralidad, ejemplo de lo anterior son las bacterias acetogénicas las cuales se desarrollan de una manera óptima a pH de 7 a 7.4. Sin embargo, también existen bacterias que trabajan a pH's menores a 6 y se adaptan relativamente fácil a medios con pH próximo a 4, tal es el caso de las bacterias acidogénicas. En lo que respecta a los hongos, estos se desarrollan mejor en un rango de pH de 5 a 6.

Las poblaciones microbianas más sensibles a las variaciones de pH son las bacterias acetogénicas (con pH óptimo de 7.2) y las Archaea (pH óptimo entre 7 y 8) (Graindorge, 1990), por esta razón estos microorganismos son inhibidos de forma tal a un pH inferior a 6.0, lo que puede traer como consecuencia una acumulación de ácidos orgánicos. Los cambios de pH son atenuados de forma natural por el efecto regulador del medio (efecto buffer), el cual depende esencialmente de la concentración de carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^{1-}) y CO_2 disueltos, así como de los iones amonio presentes en el medio. Estos últimos son producidos durante la degradación anaerobia de las proteínas. Por último, los ácidos orgánicos y sus sales formadas durante las fases de acidogénesis y acetogénesis, también contribuyen en el efecto regulador de pH.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Existen dos métodos prácticos para corregir los bajos niveles de pH en el biodigestor. El primero consiste en parar la alimentación del biodigestor y dejar que las bacterias metanogénicas asimilen los AGV; de esta forma aumentará el pH hasta un nivel aceptable. Deteniendo la alimentación disminuye la actividad de las bacterias y se reduce la producción de los AGV. Una vez que se haya restablecido el pH se puede continuar la alimentación del biodigestor, después se puede ir aumentando gradualmente para evitar nuevos descensos.

El segundo método consiste en adicionar sustancias buffer para cambiar el pH, como el agua con cal. El carbonato de sodio constituye una variante más costosa. Los requerimientos de buffer varían según el residuo.

2.7.2 TEMPERATURA

Los niveles de reacción química y biológica normalmente aumentan con el incremento de la temperatura. Para los biodigestores de biogás esto es cierto dentro de un rango de temperatura tolerable para diferentes microorganismos. Las altas temperaturas causan una declinación del metabolismo, debido a la degradación de las enzimas; y esto es crítico para la vida de las células. Los microorganismos tienen un nivel óptimo de crecimiento y metabolismo dentro de un rango de temperatura bien definido, particularmente en los niveles superiores, los cuales dependen de la termoestabilidad de la síntesis de proteínas para cada tipo particular de microorganismo.

Las bacterias metanogénicas son más sensibles a los cambios de temperatura que otros organismos en el biodigestor. Esto se debe a que los demás grupos crecen más rápido, como las acetogénicas, las cuales pueden alcanzar un catabolismo sustancial, incluso a bajas temperaturas; existen diferentes rangos de temperatura para la digestión de residuales como se muestra en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Temperatura de digestión de residuales

Tipo de microorganismo	Temperatura		Temperatura
	Mínima	óptima	Máxima
Mesófilo	5 – 15	30 – 45	35 – 47
Psicrófilo	-5 + 5	12 – 15	15 – 20
Psicrótrofo	-5 + 5	25 – 30	30 – 35
Termófilo	40 – 45	55 – 75	60 – 90

[7]



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Se han realizado numerosos trabajos sobre la digestión termofílica en países templados. Sin embargo, se requieren considerables cantidades de energía para calentar los residuales hasta 55 °C. Existen algunas restricciones para el uso de esta temperatura en la digestión anaerobia, como son la necesidad de utilización de: reactores anaerobios de lecho fijo (UASB), inóculos mesofílicos, un tiempo de retención alto y mantener una acidificación baja.

CONTROL DE LA TEMPERATURA

La temperatura se puede controlar de diversas formas, pero se tiene que hacer con recursos disponibles y que no afecten el propósito de obtener biogás.

- Aislar el digestor desde su construcción
- Enterrar el digestor para que la tierra sirva de aislante
- Construirlo en una zona con temperatura media de 30°C
- Para acelerar el crecimiento de las bacterias precalentar el agua de alimentación con energía solar.

2.7.3 NUTRIENTES

Además de una fuente de carbono orgánico, los microorganismos requieren de nitrógeno, fósforo y otros factores de crecimiento que tienen efectos complejos. Los niveles de nutrientes deben de estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes. Sin embargo, la deficiencia de nutrientes no debe ser un problema con los alimentos concentrados, pues estos aseguran suficientemente las cantidades de nutrientes.

Por otra parte, la descomposición de materiales con alto contenido de carbono ocurre más lentamente, ya que el período de producción de biogás es más prolongado. Los materiales con diferentes relaciones de Carbono-Nitrógeno (C:N) difieren en la producción de biogás. Por ejemplo: la relación de C:N en excremento porcino es de 9 a 3; en vacunos de 10 a 20; en gallinas de 5 a 8; y para residuos vegetales es de 3 a 5. La relación óptima se considera en un rango de 3 a 1, una relación menor de 8 a 1 inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio.

Los microorganismos consumen de 15 a 30 veces más carbono que nitrógeno, es por esta razón que por lo general se considera que la relación óptima se encuentra entre 20 y 35. Sin embargo, hay que señalar que los datos mencionados anteriormente son el resultado de una estimación global.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Si la relación C/N es muy alta (superior a 35), la biodegradación se verá limitada por la carencia de nitrógeno. Por el contrario, si la relación C/N es baja (inferior a 5), el nitrógeno excedente es liberado bajo forma de amoníaco (NH_3).

El ion amonio es benéfico a bajas concentraciones. Sin embargo, este ion a concentraciones altas resulta un inhibidor en la metanogénesis, sobre todo si el pH es elevado. Para Mccarty y McKinney (1961a), la concentración inhibidora del nitrógeno amoniacal es de 3 g/L.

En la Tabla 2.4 se muestra un cuadro comparativo de los diferentes tipos de materia orgánica y la cantidad obtenida de biogás.

Tabla 2.4 Materia Orgánica

Material Orgánico	Sustancia Orgánica Seca (SO) (%)	C/N	Generación de biogás (m^3/SO)
Excremento vacuno	77 – 85	10 - 20	0.18 – 0.4
Excremento de cerdo	77 – 78	8 - 15	0.3 – 0.52
Excremento de gallina	75 – 83	7-10	0.33 – 0.65
Excremento de ovino/cabra	72	12-25	0.16 – 0.42
Excremento de caballo	-	18-25	0.2 – 0.35
Hojas de remolacha	78.5	14 - 18	0.5 – 0.73
Planta de papas	79	17 - 25	0.55 – 0.7
Lodos de aguas residuals	10		0.31 – 0.65
Cáscaras de manzanas	95	6 - 7	0.45 – 0.65
Cáscaras de papas	90	13 - 19	0.4 – 0.7
Cáscara de trigo	87 – 90	10 - 11	0.6 – 0.8
Restos de verduras	76	15	0.5 – 0.62
Restos de frutas	93	50	0.5 – 0.62
Restos de comida	90 – 95	15 - 20	0.6 – 0.81
Basuras orgánicas	230 – 70	40 - 80	0.29 – 0.8

[4]

Nota: Para aumentar la eficiencia de obtención de biogás y disminuir la cantidad de fibra de las frutas y verduras, es conveniente digerir primero desechos fecales de animales ya sea cerdos, vacas o gallinas, los cuales sirven como activador del proceso, disminuyendo el tiempo de residencia



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

2.7.4 TOXICIDAD

Los compuestos tóxicos incluso en bajas concentraciones, afectan la digestión y disminuyen los niveles de metabolismo. Las bacterias metanogénicas son generalmente las más sensibles, aunque todos los grupos pueden ser afectados.

Un nutriente esencial también puede ser tóxico si su concentración es muy alta. En el caso del nitrógeno, mantener un nivel óptimo para garantizar un buen funcionamiento sin efectos tóxicos, es particularmente importante. Por ejemplo, en alimentos de alto contenido de proteína para el ganado, un desbalance por altos contenidos de nitrógeno y bajas disponibilidades energéticas, causa toxicidad por generación de amonio. Usualmente, el nivel de amonio libre debe ser mantenido en 80 partes por millón (ppm). Sin embargo, una concentración más alta, alrededor de 1500-3000 ppm, puede ser tolerada.

Se debe tener precaución para evitar la entrada al biodigestor de ciertos iones metálicos, sales, bactericidas y sustancias químicas sintéticas, llevando un control de la reducción de gas cuando son utilizadas excretas de animales tratados con antibióticos.

2.7.5 NIVEL DE CARGA

Este parámetro es calculado como la materia seca (MS) o materia orgánica (MO) que es cargada o vertida diariamente por metro cúbico de volumen de biodigestor. La materia orgánica (MO) o sólidos volátiles (SV) se refiere a la parte de la materia seca (MS) o sólidos totales (TS), que se volatilizan durante la incineración a temperaturas superiores a 500 °C. Los sólidos volátiles (SV) contienen componentes orgánicos, los que teóricamente deben ser convertidos a metano. Los residuales de animales pueden tener un contenido de materia seca (MS) mayor del 10 % de la mezcla agua estiércol. Según los requerimientos operacionales para un reactor anaerobio, el contenido de materia seca (MS) no debe exceder el 10 % de la mezcla agua estiércol en la mayoría de los casos. Por eso, los residuales de granjas se deben diluir antes de ser tratados.

La eficiencia de la producción de biogás se determina generalmente expresando el volumen de biogás producido por unidad de peso de materia seca (MS) o sólidos volátiles (SV). La fermentación de biogás requiere un cierto rango de concentración de materia seca (MS) que es muy amplio, usualmente desde 1% al 30%. La concentración óptima depende de la temperatura. En China, la concentración óptima es del 6% en el verano a temperaturas entre 25-27 °C y entre 10 y 12 % en la primavera a temperaturas de 18-23 °C.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

2.7.6 PORCENTAJE DE SÓLIDO

La materia orgánica está compuesta por un porciento de agua y otros porciento de fracción sólida llamándosele “sólidos totales”.

Es un factor importante para el proceso ya que determina la eficiencia de este, debido a que las bacterias requieren una mayor área de contacto, lo cual disminuye al formarse las natas en la superficie del licor.

Los desechos de frutas y verduras contienen grandes cantidades de fibra originando mayor cantidad de natas, por lo que al procesarlas es necesario controlar cuidadosamente la concentración de sólidos; para calcular el volumen de agua a mezclar es necesario saber la cantidad de sólidos de la materia prima, el porcentaje de sólidos óptimo para que las bacterias se desarrollen de forma ideal van del 7% al 15% de sólidos totales de la mezcla.

2.7.7 AGITACIÓN

Aun y cuando las bacterias cumplan su función se requiere que el proceso biológico se realice en las mejores condiciones, las bacterias y el sustrato necesitan estar en contacto íntimo, por lo que es necesario agitar la masa interna del biodigestor.

La materia orgánica que no alcanza a digerirse en su totalidad se acumula en la superficie formando una capa sólida “nata”, que llega a solidificarse impidiendo la libre salida del biogás.

Nota: Una alternativa de solución a este problema consiste en hacer la carga diaria para romper las natas o en su defecto una agitación suficiente que impida que la nata solidifique.

2.7.8 TIEMPO DE RETENCIÓN

Existen dos parámetros para identificar el tiempo de retención de las sustancias en el biodigestor:

- El tiempo de retención de los sólidos biológicos (TRSB) que se determinan dividiendo la cantidad de materia orgánica (MO) o sólidos volátiles (SV) que entra al biodigestor entre la cantidad de materia orgánica (MO) que sale del sistema cada día. El tiempo de retención de los sólidos biológicos (TRSB) es asumido para representar la media del tiempo de retención de los microorganismos en el biodigestor.
- El tiempo de retención hidráulico (TRH) es la relación entre el volumen del biodigestor (VD) y la media de la carga diaria.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Estos parámetros son importantes para los biodigestores avanzados de alto nivel, los cuales han alcanzado un control independiente del tiempo de retención de los sólidos biológicos (TRSB) y del tiempo de retención hidráulico (TRH) a través de la retención de la biomasa. La medición del tiempo de retención hidráulico (TRH) es más fácil y más práctica que el tiempo de retención de sólidos biológicos (TRSB) al nivel de las granjas.

Los tiempos de retención de operación varían según el tipo de biodigestor. En la Tabla 2.5 se muestra el tiempo de retención entre un biodigestor Chino y el Indio.

Tabla 2.5 Tiempo de Retención

Tipo de Biodigestor	Tiempo de retención (días)
Chino	30-60
Indio	15-30

[4]

2.8 CONCEPTO DE MUERTE DE UN MICROORGANISMO

Desde el punto de vista microbiológico, un microorganismo muere cuando pierde de forma irreversible la capacidad de dividirse. El fundamento de esta definición es que si un microorganismo ha perdido la capacidad de dividirse no podrá formar una colonia sobre un medio de cultivo y no será posible detectar su presencia por los métodos microbiológicos tradicionales. Es decir, cuando no se produce aumento en el número de microorganismos no hay crecimiento. Sin embargo, un microorganismo puede estar muerto desde el punto de vista microbiológico y continuar desarrollando una actividad metabólica que se traduzca, por ejemplo, en liberación de toxinas.

Por otra parte, hay que considerar que la capacidad de multiplicación (crecimiento) de un microorganismo puede verse transitoriamente afectada por lesiones o por las condiciones físicas o químicas del entorno. En estos casos, podríamos considerar como muertos microorganismos que pueden reanudar su crecimiento si las condiciones son de nuevo favorables.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

CAPITULO 3 DISEÑO DE BIODIGESTOR CASERO

3.1 CRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE UN BIODIGESTOR

Los criterios para seleccionar un biodigestor deben ser lo más apropiados y cercanos a la realidad porque de esto depende el buen funcionamiento de éste.

La metodología que se presenta en esta investigación es sólo una parte pero se considera lo más importante.

Para la construcción de un biodigestor uno de los factores importantes es la aceptación de la comunidad, ya que el éxito o fracaso de este depende de la aceptación que tenga entre la sociedad; recurriendo a personal capacitado sociólogos, psicólogos, trabajadores sociales que dan a conocer los gustos, intereses y percepción hacia la nueva tecnología.

Conociendo las necesidades actuales para combatir la contaminación provocada por los gases emanados por los residuos sólidos almacenados en los basureros, dejando en un segundo plano a la utilización del biogás, siendo necesario que un organismo promueva el uso de los biodigestores.

En la Tabla 3.1 se muestran diferentes tipos de digestores y características que nos servirá de apoyo para la elección del digestor y diseño.

3.2 MODELO MATEMÁTICO PROPUESTO

Describiendo los aspectos básicos en el modelamiento planteado por Riggs, así como las diversas partes que conformaran el modelo matemático basado en experimentaciones realizadas con reactores continuos horizontales y verticales, en los Estados Unidos por W.H.Smith y colaboradores.

Para llegar a la propuesta del modelo matemático que se ajuste a las necesidades teóricas se harán una serie de consideraciones empíricas.

3.2.1 ENFOQUE SISTEMÁTICO PARA MODELAR

En cuanto a las aplicaciones en ingeniería química los modelos son usados para **aproximar** ciertas características de un proceso; un modelo nunca puede ser “verdadero” o una representación exacta de un proceso porque tendría que ser el mismo o una réplica exacta.

El uso de los modelos provee información real acerca de un proceso desde las condiciones



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Tabla 3.1 Tipos y Características de Digestores

TIPO DE DIGESTOR	DESECHOS CONVENIENTES	VOLUMEN Y % SOLIDOS	TIEMPO DE RETENCIÓN	GRADO DE: 1.MEZCLA 2. CONTROL	TEMP °C	1.PRODUCCIÓN TÍPICA DE GAS 2.MODOS DE OPERACIÓN
Batch	Agrícolas de temporada irregular fibroso y difíciles de digerir	Bajos volúmenes Arriba del 25%	60 más	1. Necesita poco 2. Necesita poco solo al empezar	30 - 35	1.Irregular y discontinuo 50 – 70% CH ₄ 2.Sucio _ Consume tiempo para empezar, dificultad al vaciarlo, operación discontinua
De desplazamiento horizontal y vertical	Agrícolas continuos con relativo bajo contenido en fibra	Grandes volúmenes del 5 – 15%	30 – 60	1.Ocasionalmente 2.Simple 1. Regular	30 – 35 33 - 35	Experiencia en biodigestor vertical. 1.Regularidad y continua 55 – 65% CH ₄ 2. Remover las natas – es sucio al cargarlo Experiencia en Biodigestor Horizontal 1.Regular continuo 60 – 65% CH ₄



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

				2. Automático		2. La carga se puede automatizar, conveniente para combinaciones más sofisticadas.
Continuos para aguas negras	Continuo flujo de aguas negras	Volúmenes muy grandes 4 – 10%	10 - 30	1. Regular 2. Más sofisticado	30 – 35	1. Continuo 2. Automático
Filtro anaerobio	Industrial	Menos del 3%	0.5 - 5	1.Continuo 2. Sofisticado	30 -35	Como el de contacto



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

de operación usando un proceso con la relativa facilidad, los procesos son usados para las siguientes aplicaciones: **Control de procesos, diseño de procesos y optimización de procesos.**

Un modelo empírico asume la forma de una relación funcional entre la entrada y salida de las variables del proceso. Se usan datos del proceso para determinar los parámetros o constantes de la relación funcional, la utilidad de los modelos empíricos depende de la elección de las relaciones funcionales y que el modelo sea empleado dentro del intervalo de los datos sobre los cuales está basado. Los modelos empíricos son mejores cuando son usados de una manera interpolaría, pero son peligrosos inseguros cuando es usado por extrapolación.

Los modelos fenomenológicos emplean ecuaciones de conservación (masa, energía y momentum) para desarrollar las relaciones entre las variables a la entrada y salida del proceso. Al emplear ecuaciones de conservación pueden requerir de un número de relaciones consecutivas; por ejemplo, ecuaciones de estado, de relaciones de equilibrio de fases y expresiones de cinética química. Los modelos fenomenológicos van desde modelos microscópicos (modelos con parámetros distribuidos) hasta modelos macroscópicos (modelos con parámetros agrupados). Los modelos fenomenológicos son los más comúnmente usados por ingenieros.

El procedimiento recomendado para desarrollar estos modelos es:

- ✓ **DEFINIR EL PROBLEMA:** Se determinar lo que se busca predecir con los daros de entrada; además se tiene que determinar cómo serán usados los resultados del modelo
- ✓ **IDENTIFICAR LOS FACTORES A CONTROLAR:** Para completar esta tarea, se necesita desarrollar una descripción física de cómo operar el proceso, para así determinar cuáles son los factores que controlan el comportamiento de éste, es obviamente uno de los pasos más importantes en el desarrollo del modelo.
- ✓ **EVALUAR LOS DATOS DEL PROBLEMA:** Son 2 tipos de datos los que hay que analizar; a) datos de los parámetros y b) datos del proceso. Parámetros tales como coeficientes de dispersión, coeficientes de difusión y conductividades que son usualmente requeridos en el desarrollo de modelos. La incertidumbre que existe con parámetros usados por un modelo necesitan ser estimadas porque esto tendría un efecto directo sobre la validación del modelo; en algunos casos no se podrán obtener valores independientes medibles para los parámetros necesarios. Para estos casos se tienen que usar técnicas predictivas para obtener los parámetros o se tienen que usar datos del proceso para esa propuesta. Cuando los datos del proceso son usados, se tiene que reconocer que se está moviendo de los modelos fenomenológicos a los modelos empíricos; aun cuando no se usen



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

parámetros determinados empíricamente, es necesario estimar la incertidumbre asociada con los datos del proceso si estos se usan en la validación del modelo.

- ✓ **DESARROLLAR UNA SERIE DE ECUACIONES PARA EL MODELO:** El primer paso es definir explícitamente la localización y tipo de límites del sistema; es decir, se tiene que determinar el sistema que se está modelando y cuáles son sus límites. Entonces las ecuaciones pueden ser desarrolladas cuando describen las variables determinantes dentro de los límites definidos. El modelo resulta en un conjunto de ecuaciones. El mayor problema con el desarrollo de ecuaciones es determinar el grado de detalle, que debe incluirse para alcanzar los objetivos; entre mayor es el detalle más complicadas son las ecuaciones y por lo tanto una mayor dificultad para resolverlas, cuanto más detallado mas parámetros son requeridos, la cantidad de características del proceso determinan el grado de detalle requerido. En la elección del grado de detalle se pueden emplear suposiciones que deberán ser verificadas durante la validación del procedimiento, las suposiciones de simplificación can desde el conocer los factores controlantes y definir el problema. En ingeniería química las ecuaciones del modelo son la aplicación de los balances de materia, momentum y energía para los procesos con algún tipo de hipótesis asociada a su comportamiento.
- ✓ **IMPLEMENTAR UNA SOLUCIÓN AL PROCEDIMIENTO:** No solo se necesita un procedimiento que tenga solución numérica en donde seguramente se resuelven las ecuaciones para dar salida deseada, sino que también es necesario que esté de acuerdo con todos los objetivos del problema.
- ✓ **VALIDAR EL MODELO:** Nunca se puede validar completamente un modelo, sólo se puede probar con u número finito de casos dentro de un intervalo; entre los procedimientos empleados para validar el comportamiento de un modelos tenemos: **verificar hipótesis, comprobar que el comportamiento del modelo general es de acuerdo al comportamiento del proceso, desarrollar soluciones analíticas para caos simplificados, comparar con otros modelos usando un problema en común, ejecutar un análisis sensitivo para evaluar los efectos de parámetros inciertos, comparar el modelo directamente con datos del proceso.**

El modelo necesita ser probado por el comportamiento del proceso, un intento muy usado para validar el modelo, es la aplicación del modelo para un caso particular para cuando se pueda obtener una solución analítica.

3.2.2 DESCRIPCIÓN TEÓRICA DE LOS BIODIGESTORES IDEALES

En el biodigestor ideal para la producción de biogás, se busca llevar a lo óptimo la producción sobre cualquier otro producto o subproducto, para ello se prefieren los desechos vegetales como frutas y verduras las cuales tienen mejor rendimiento calórico como materia prima principal.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Si al realizar una digestión se mantienen en condiciones óptimas en 40 días aproximadamente se puede lograr el 75% del gas teórico; el modelo matemático que se propone se basa en el conjunto de ecuaciones que recomienda Smith para digestores continuos, donde el gas se obtiene en cuestión de horas. Como en el caso de la biodegradación de desechos de frutas y verduras se contempla el uso de un digestor que funcione durante 40 días, es necesario hacer una serie de ajustes al emplear las ecuaciones propuestas por Smith.

3.2.3 CINÉTICA DE LA DEGRADACIÓN DE BIOMASA

Cualquier biomasa que se use como alimentación contiene muchos componentes y cada uno puede degradarse a diferente velocidad; se considera que la estructura de la biomasa consiste de dos componentes uno biodegradable (BM_r) y otro lentamente biodegradable (BM_l)

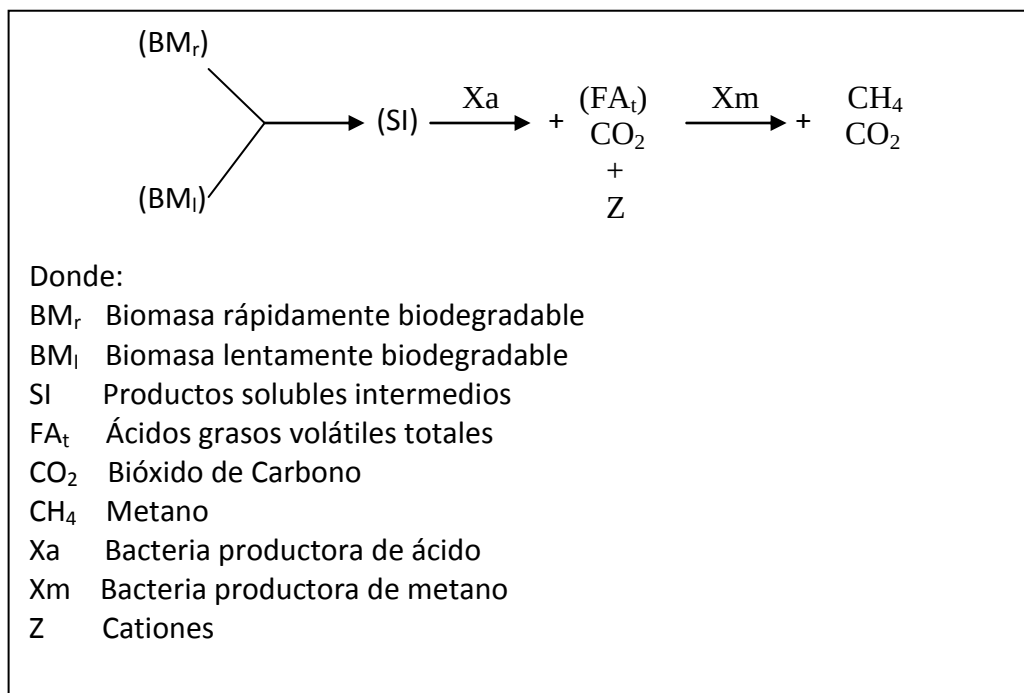


Figura 3.1 Reacción de biodegradación

En el primer paso de la descomposición ambas formas de biomasa se transforman en productos solubles intermedios (SI), el segundo paso consiste en la transformación de los productos solubles intermedios (SI) a ácidos grasos volátiles (FA_t) por acción de la bacteria acidogénicas (X_a) con producción de bióxido de carbono (CO_2), cationes (Z) y bacterias acidogénicas; el tercer paso consiste en la conversión de ácidos grasos a metano (CH_4), por acción de la bacteria metanogénica (X_m) con producción de CO_2 (Bióxido de carbono) y mas bacterias metanogénicas.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Los valores numéricos se basan en la hipótesis de la forma en la que se descompone la biomasa. En la hidrólisis, la demanda química de oxígeno equivalente (DQO_e) de los productos intermedios solubles es igual DQO de la biomasa destruida y entonces el coeficiente Y₁ es igual a 1.0, el coeficiente de generación interna de cationes, en este caso, no se tomara en cuenta.

Tabla 3.2 Resumen de los parámetros encontrados por Smith.

Parámetro	Valor	Relación
Y ₁	1.0	$\frac{mgSI}{mgBM}$
Y ₂	0.035	$\frac{mgX_m}{mgFA_t}$
Y _a	0.75	$\frac{mgFA_t}{mgSI}$
Y _b	0.17	$\frac{mgX_a}{mgSI}$
Y _c	0.13E-03	$\frac{L CO_2}{mgSI}$
Y _d	0.33E-03	$\frac{L CH_4}{mgFA_t}$
Y _e	0.33E-03	$\frac{L CO_2}{mgFA_t}$
K ₁	8.50	$\frac{1}{día}$
K _{1p}	0.45	$\frac{1}{día}$
K ₂	0.16E-03	$\frac{L}{mg * día}$
K _{d1}	0.04	$\frac{1}{día}$
K _{d2}	0.04	$\frac{1}{día}$
K _I	3000.0	$\frac{mg}{L}$
K _{Ip}	4000.0	$\frac{mg}{L}$
K _s	20.0	$\frac{mg}{L}$
D	25.5	$\frac{L}{mol}$
MU _{hat}	0.54	$\frac{1}{día}$



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

3.2.3.1 REACCIÓN CINÉTICA

La velocidad de hidólisis de BM_r y BM_l es de primer orden con respecto a la concentración de BM_r y BM_l , fue propuesta por Eastman y Ferguson (1981) Gujer y Zehner (1983). La expresión cinética es la siguiente:

$$\gamma(BM_r) = -K_l (BM_r) \quad 3.1$$

$$\gamma(BM_l) = -K_{lp} (BM_l) \quad 3.2$$

()	Concentración (mg COD _e /L)
K_l	Constante de velocidad de primer orden para hidrólisis de BM_r
K_{lp}	Constante de velocidad de primer orden para hidrólisis de BM_l

Para modelar el crecimiento de los microorganismos se utiliza la expresión global que se indica.

$$\text{Velocidad de crecimiento} = MU_{hat} \frac{\text{Sustrato}}{K_s + \text{Sustrato}} \quad 3.3$$

MU_{hat}	Velocidad máxima de crecimiento de la bacteria (día ⁻¹)
K_s	Coeficiente de saturación (mg COD _e /L)

La velocidad de crecimiento de la bacteria productora de ácido es proporcional a la concentración de SI.

$$\text{Velocidad de crecimiento } X_a = K_2 (SI)(X_a) \left\{ 1 - \frac{(FA_t)}{(FA_t) + KI} \right\} \quad 3.4$$

K_2	Constante de velocidad a crecimiento de X_a (L/mg-día)
K_I	Coeficiente de inhibición de X_a (mg COD _e /L)

La masa bacteriana decrece con el tiempo y la velocidad de muerte de la bacteria acidógena es proporcional a su concentración.

$$\text{Velocidad de muerte } X_a = K_{dl1}(X_a) \quad 3.5$$

K_{dl1}	Constante de velocidad de muerte de X_a (día ⁻¹)
-----------	--

La velocidad de crecimiento neta es la velocidad de crecimiento menos la velocidad de muerte por lo tanto al combinar la ecuación 3.4 y 3.5 se obtiene:



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

$$\gamma(X_a) = K_2 (SI)(X_a) \left\{ 1 - \frac{(FA_t)}{(FA_t) + KI} \right\} - K_{dl1}(X_a) \quad 3.6$$

La velocidad de crecimiento de las bacterias productoras de metano es también proporcional a su concentración, con relación entre ácidos grasos volátiles y la velocidad de crecimiento y sigue la inhibición, la cual es una función propuesta por Andrews Graef.

$$\text{Velocidad de crecimiento } X_m = \frac{MUhat(X_m)}{1 + \frac{K_s}{(FAH)} + \frac{(FAH)}{K_{lp}}} \quad 3.7$$

K_s	Coeficiente de saturación (mg COD _e /L)
$MUhat$	Velocidad máxima de crecimiento de la bacteria (día ⁻¹)
K_{lp}	Coeficiente de inhibición para X_m (mg COD _e /L)
FAH	Ácidos grasos no ionizados (mg COD _e /L)

La velocidad de muerte de las bacterias productoras es proporcional a la concentración

$$\text{Velocidad de muerte } X_m = K_{d2}(X_m) \quad 3.8$$

K_{d2} Velocidad de muerte de X_m (día⁻¹)

Combinando las ecuaciones 3.7 y 3.8 se obtiene que la velocidad neta de crecimiento sea:

$$\gamma(X_m) = \frac{MUhat(X_m)}{1 + \frac{K_s}{(FAH)} + \frac{(FAH)}{K_{lp}}} - K_{d2}(X_m) \quad 3.9$$

La expresión cinética para SI , FA_t , CH_4 , CO_2 puede establecerse usando su expresión cinética y sus coeficientes.

$$\gamma(SI) = Y_1 \{ K_1 (BM_r) + K_{lp} (BM_l) \} - \frac{1}{Y_b} K_2 (SI)(X_a) \left\{ 1 - \frac{(FA_t)}{(FA_t) + KI} \right\} \quad 3.10$$

$$\gamma(FA_t) = \frac{Y_a}{Y_b} K_2 (SI)(X_a) \left\{ 1 - \frac{(FA_t)}{(FA_t) + KI} \right\} - \frac{1}{Y_2} \left(\frac{MUhat(X_m)}{1 + \frac{K_s}{(FAH)} + \frac{(FAH)}{K_{lp}}} \right) \quad 3.11$$

$$\gamma(CH_4) = V \frac{Y_d}{Y_2} \left(\frac{MUhat(X_m)}{1 + \frac{K_s}{(FAH)} + \frac{(FAH)}{K_{lp}}} \right) \frac{1}{D} \quad 3.12$$

$$\gamma(CO_2) = V \frac{Y_c}{Y_b} K_2 (SI)(X_a) \left\{ 1 - \frac{(FA_t)}{(FA_t) + KI} \right\} \frac{1}{D} + V \frac{Y_e}{Y_2} \left(\frac{MUhat(X_m)}{1 + \frac{K_s}{(FAH)} + \frac{(FAH)}{K_{lp}}} \right) \frac{1}{D} \quad 3.13$$



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

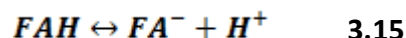
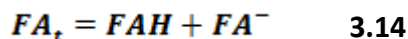
Nota: $\gamma((CO_2)) = \gamma((CO_2))/V$

V Volumen del reactor (litros)
D Constante del gas (litros/mol)

3.2.3.2 REACCIÓN QUÍMICA

Existen otras reacciones que influyen en la realización del proceso. La reacción que se muestra se usó como base para modelar la variación de especies químicas importantes en fase líquido y gas.

Los ácidos volátiles grasos (FA_t) consta de ambos ácidos grasos volátiles no ionizables (FAH) y ácidos grasos ionizables (FA^-) por ejemplo:



FAH Ácidos grasos volátiles no ionizables
 FA^- Ácidos grasos volátiles ionizables
 H^+ Ion hidrógeno

El FAH es un límite del crecimiento y un agente de inhibición (Andrews y Graef, 1971) para la bacteria degradadora de metano, las reacciones de ionizaciones son muy rápidas en comparación con las reacciones biológicas en el equilibrio, por lo que se tiene:

$$\frac{[FA^-][H^+]}{[FAH]} = Ka \quad 3.16$$

[] Concentración (mol/litros)
Ka Constante de disociación de los ácidos grasos volátiles, 3.2×10^{-5} mol/litro para el ácido acético a 38°

Por lo que la ecuación para encontrar los ácidos grasos volátiles no ionizables se combinan las ecuaciones 3.14 y 3.16

$$[FAH] = \frac{[H^+][FA_t]}{[H^+] + Ka} \quad 3.17$$

3.2.4 CONSIDERACIONES EMPÍRICAS

Las ecuaciones cinéticas desarrolladas por W. H. Smith y colaboradores fue el resultado de diversos experimentos con digestores continuos tanto horizontales como verticales.

PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Con base a la forma en la que se desarrollan las ecuaciones y para llegar a posponer el modelo matemático que teóricamente se ajuste a un digestor ideal, se tomaron a consideraciones empíricas.

3.2.4.1 MÉTODO NUMÉRICO

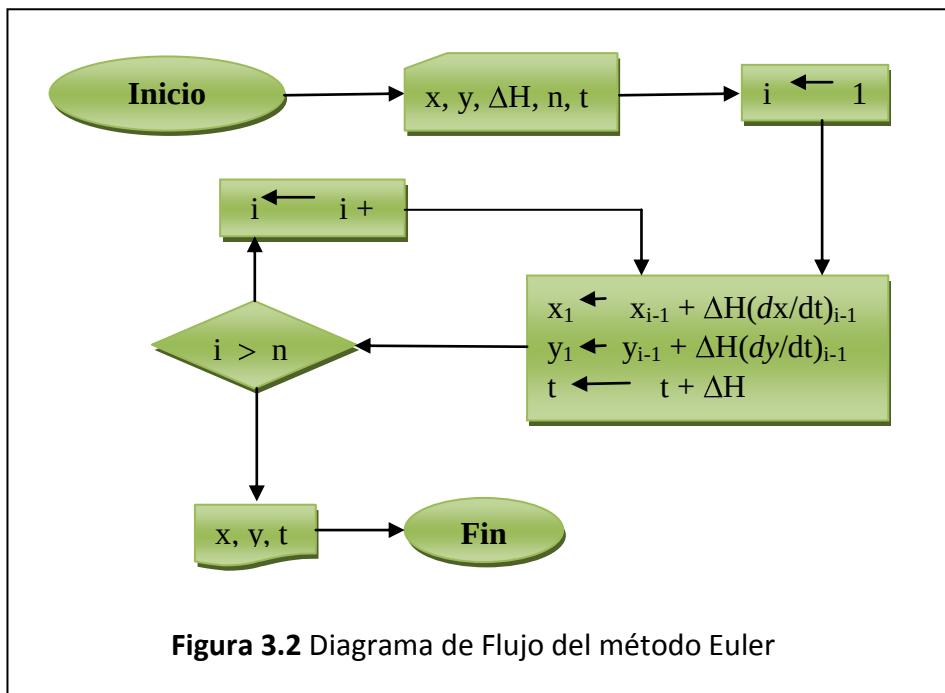
Primero se escogió un método numérico que resolviera sistemas de ecuaciones diferenciales. Porque al tratarse de ecuaciones cinéticas se tenía una diferencial de la concentración (dBM_i) sobre la diferencial del tiempo (dt) y de esta forma queda la ecuación diferencial:

$$\frac{d(BM_i)}{dt} = -K_i(BM_i) \quad 3.18$$

De los diversos métodos numéricos se encontró que el método Euler simple se adapta fácilmente a dichas ecuaciones.

Método Euler:

1. Dar un valor inicial a la(s) variable(s) con las que se va a iniciar el método.
2. Introducir un tamaño de paso apropiado para cada caso.
3. Iniciar un contador que nos indique cuantas iteraciones se realizan.
4. Empezar a resolver cada una de las ecuaciones que se tienen en el sistema.
5. Poner una condición para que el método termine o para que regrese al paso 4.
6. Imprimir resultados.





PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Una vez seleccionado el método numérico se procede a convertir todas las ecuaciones existentes en la forma que el método requiere.

3.2.4.2 CONGRUENCIA DE UNIDADES

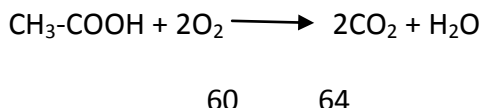
Las unidades con las que se trabaja son miligramos de Demanda Química de Oxígeno por Litro de Mezcla (mgDQO/L) y por esta razón es necesario hacer congruencia en todos los parámetros que se consideren.

En las reacciones cinéticas se usan dichas unidades, pero en la reacción química que sirve para obtener los ácidos grasos volátiles no ionizables (FAH) se tiene en unidades de mol por litro y por esta razón es necesario utilizar un factor que ajuste las unidades.

✓ Ácido acético (FA_t)

$$[FA_t] = (FA_t) * factor \quad (\text{mol/L}) \quad 3.19$$

Tomando como referencia el ácido acético, porque es el ácido que se forma primero y el que se encuen tra en mayor proporción en el licor, teóricamente el “factor” se obtiene de la siguiente forma:



$$\text{Factor} = (1\text{g}/1000\text{mg})(1/\text{PM O}_2) (\text{PM FA}_t/2 * \text{PM O}_2)$$

$$(1\text{g} / 1000\text{mg}) = \text{cambio de mg DQO por g DQO}$$

$$(1 / \text{PM O}_2) = \text{cambio de g DQO por mol DQO}$$

$$(\text{PM FA}_t / \text{PM O}_2) = \text{cambio de mol DQO por mol Fa}_t$$

$$\text{Factor} = (1 / 1000)(1 / 32) (60 / 64) = 0.000029$$

✓ Iones Hidrógeno (H^+)

La concentración de iones de Hidrógeno (H^+) va a depender del potencial de Hidrógeno (pH) de la mezcla en la alimentación y durante el proceso. Para la realización del simulador se supone un pH constante durante todo el proceso.

$$[\text{H}^+] = 10^{-\text{pH}} \quad (\text{mol/L}) \quad 3.20$$



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Al realizar los cálculos se obtiene de la concentración de ácidos grasos no ionizables (mol/L) por lo que es necesario regresar a mg DQO despejando la ecuación (3.19)

$$(FAH) = [FAH] / \text{factor} \quad (\text{mg DQO/L})$$

Tabla 3.3 Composición química de algunos desechos de frutas y verduras

Producto	%Hum	%Base Humeda			% Base Seca			C/N
		M.O.	Nit	Car.	M.O.	Nit.	Car.	
tomate	85.9000	1.1771	0.3453	1.0270	12.560	2.4489	7.285	2.9747
jitomate	91.4800	2.0975	0.1331	1.2165	26.153	1.6596	15.169	9.1401
rabo de cebolla	84.6250	0.4960	0.3775	0.2877	3.226	2.4553	1.871	0.7621
papa	68.3900	3.4160	0.4458	1.9813	10.810	1.4103	6.268	4.4444
col	87.3815	3.7225	0.3258	2.1590	29.500	2.5819	17.110	6.6269
chile poblano	85.9199	2.0410	0.2624	1.1838	14.494	1.8635	8.407	4.5113
lechuga	82.7340	0.5010	0.5064	0.2906	2.901	2.9329	1.683	0.5738
manzana	86.6035	1.8310	0.0544	1.0619	13.667	0.4061	7.927	19.5216
papaya	89.1360	0.8620	0.1083	0.4999	7.933	0.9968	4.602	4.6164
plátano	69.3344	1.6445	0.2122	0.9538	5.362	0.6919	3.110	4.4948
sandía	92.4842	1.4230	0.125	0.8253	18.923	1.6220	10.970	6.6027
naranja	81.4725	2.2050	0.1607	1.2789	11.901	0.8673	6.903	7.9583

[10]

Hum = Humedad

MO = Materia Orgánica

C / N = Relación Carbono – Nitrógeno

N = Nitrógeno

C = Carbono

% = Por ciento Peso

La alimentación al digestor se medirá en Kg por lo que es necesario hacer el cambio de Kg/L de desecho por mg DQO/L; esta consideración se hace en forma teórica ideal donde se supone que el carbono se oxida de una manera eficiente con el Oxígeno, prácticamente existe un análisis para determinar la demanda química de oxígeno.

Para encontrar el factor que ajuste en todo momento en la conversión del desecho a DQO se tiene la siguiente hipótesis:

- **Por ciento de Sólidos:** Este se debe ajustarse entre 8 – 15%, para realizar dicho ajuste, al mezclarse los desechos en diversas proporciones se tiene un cierto



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

porcentaje de sólidos que si sobrepasa el 15% es necesario agregar agua con la mezcla.

- **Relación Carbono-Nitrógeno:** La relación óptima es de 30 partes de carbono por una de nitrógeno pero para el caso de desechos de frutas y verduras la cantidad de nitrógeno es muy elevada y la relación se reduce a un máximo de 19.5: 1 para el caso en que la alimentación fuera únicamente manzana.

Para ilustrar lo anterior y llegar al factor se toma como base de cálculo 10Kg de desecho que contiene 10% peso jitomate, 50% de manzana y 40% de rabo de cebolla.

Cantidad	Producto	Humedad	Nitrógeno	Carbono	C/N
1	Jitomate	0.9148	0.001331	0.016500	-----
5	Manzana	4.3301	0.002720	0.053095	-----
4	Rabo de cebolla	2.7356	0.017832	0.079252	-----
10	Mezcla	7.9805	0.021883	0.148847	6.8019

Por lo tanto se tiene un Porcentaje de Sólidos igual a:

$$\%solidos = \left(1 - \frac{kg_{humedad}}{kg_{mezcla}}\right) 100 \quad \%solidos = \left(1 - \frac{7.9805}{10}\right) 100 = 20.195$$

Por los resultados anteriores se tiene que el porcentaje de sólidos sale del rango por lo que es necesario agregar agua para llevar lo a un 15%, en la mezcla existen 2.0195 kg de sólidos por lo que esto representa el 15% y por medio de un factor obtendremos el peso de la mezcla final y por diferencia la cantidad de agua que se tiene que agregar.

$$Kg \text{ de solidos} = (0.20195)(10Kg) = 2.0195 Kg \text{ de sólidos}$$

$$Kg \text{ de mezcla} = 2.0195kg \left(\frac{100}{15}\right) = 13.4633 Kg$$

$$Kg \text{ de agua} = 13.4633 - 2.0195 = 11.4438 Kg$$

$$Kg \text{ agua añadir} = 11.4438 - 7.9805 = 3.4633 Kg$$

La densidad de la mezcla es considerada como la del agua porque en su mayor parte es agua por lo que se tiene 13.4633L de mezcla la cual contiene 148.8g de carbono de donde:

$$\frac{148.8 \text{ gC}}{13.4633 \text{ L}} = 11052 \text{ mgC/L}$$

y por medio de un factor se llega a DQO.

$$\left(11052 \frac{\text{mgC}}{\text{L}}\right) \left(\frac{1 \text{ mgC}}{12 \text{ mgmol}}\right) \left(\frac{32}{12}\right) \left(32 \frac{\text{mgO}_2}{\text{mg}}\right) = 78592 \text{ mgDQO}$$

Factor = 7.111



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Finalmente se tiene que la ecuación cinética que calcula la cantidad que calcula la cantidad de metano devuelve el resultado en unidades de mol y aplicando la ecuación de los gases ideales, se tiene que el volumen del metano es:

$$V = \frac{\eta RT}{P}$$

- V Volumen del gas metano
 η Moles de metano generado
R Constante de los gases ideales 0.082 L-atm/(mol-K)
T Temperatura a la cual se experimento para encontrar las ecuaciones 38°C y que equivalen a 311 K
P Presión absoluta que en este caso es igual a la atmosférica porque dentro del biodigestor existe una presión despreciable 0.7697 atm.

3.2.4.3 VOLUMEN DEL BIODIGESTOR

El volumen del biodigestor depende de la cantidad de desperdicio que se quiera biodegradar; este volumen se puede dar por dos casos, el primero es el de conocer el dato pero desconocer la cantidad máxima de desecho que se le pueda alimentar y el otro es de tener una cantidad conocida de desecho pero desconocer el volumen del biodigestor para contener el desperdicio.

Ejemplos:

▪ Caso 1

Se tiene un biodigestor con capacidad máxima de 0.1m³ y se desea saber cuánta es la capacidad máxima de desperdicio que pueda contener, como ya se vio antes la densidad del desecho se considera aproximadamente 1000Kg/m³ además se tiene que teóricamente el digestor debe estar a 2/3 de su capacidad total por lo que:

$$M = V * \delta * \frac{2}{3}$$

- V Volumen del digestor
M Peso del desperdicio
 δ Densidad del desperdicio
2/3 Capacidad del desecho



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

$$M = 0.1 * 1000 * \frac{2}{3} = 66.66 \text{ Kg}$$

▪ Caso 2

Se tienen 100Kg de desecho y se desea calcular el volumen del digestor; por lo tanto se tiene:

$$V = \frac{M}{\delta} * \frac{2}{3}$$

Donde:

V	Volumen del digestor
M	Peso del desperdicio
δ	Densidad del desperdicio
$\frac{2}{3}$	Factor de ajuste

$$V = \frac{100}{1000} (1.5) = 0.15m^3 = 150L$$

Por lo que es necesario construir un digestor de $0.15m^3$ como mínimo para que pueda contener todo el desecho y además tenga espacio para almacenar gas y soportar la presión.

3.2.4.4 VALOR INICIAL DE BACTERIAS

La cuantificación de las bacterias es muy difícil en primera porque se tendría que hacer un análisis para cada desecho, en condiciones diferentes y en segunda es necesaria hacer tal forma que se pudiera conocer los mgDQO/L que requieren para degradar la materia orgánica.

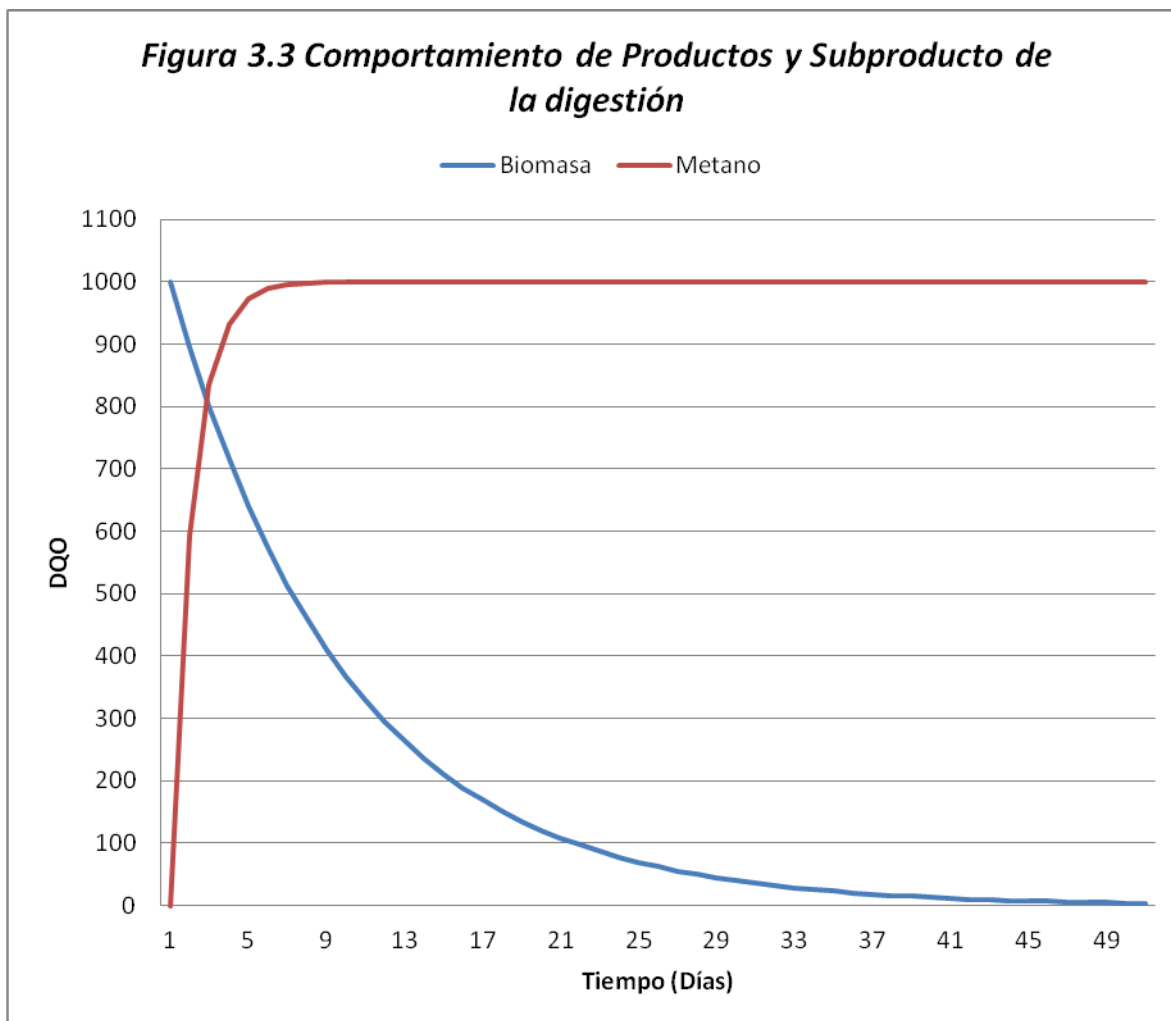
En muchas de las experimentaciones no se tiene conocimiento exacto del número de colonias de bacterias que intervienen en la degradación y mucho menos los mgDQO que consumen. Esto no es de gran relevancia en una experimentación ya que lo importante es saber cuánto se alimenta y cuanto se obtiene sin interesar si son pocas o muchas las bacterias que intervienen.

P.H. Smith y colaboradores obtuvieron empíricamente que se tienen 0.17mg de bacterias acidogénicas (Xa) por cada mg de SI con esta relación se hace la suposición que el valor inicial de Xa dependerá de la cantidad de SI que contenga el licor.

PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

De igual forma se obtiene el valor inicial de bacterias metanogénas (X_m) que aunque estas existen solo en lugares anaerobios su número inicial no es cero y existen como bacterias que se mutan o como bacterias aerobias que al cambiar de medio se vuelven anaerobias. La relación encontrada por Smith es la de 0.035 mgX_a por cada mgFA_t .

3.2.4.5 TIEMPO DE OBTENCIÓN DE LOS PRODUCTOS Y SUBPRODUCTOS



Los tiempos de obtención de los productos y subproductos dependen de las constantes de velocidad de las ecuaciones cinéticas y ya que estas fueron encontradas para digestores tipo filtro continuo donde el metano se obtenía en cuestión de horas es necesario ajustarlas para un biodigestor horizontal o vertical donde la obtención del metano es en aproximadamente 40 días. Para conocer el valor de dichas constantes es necesario suponer primero el comportamiento de los productos y subproductos a través del tiempo de la digestión.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Se tiene que según Smith la biomasa (BM) se disuelve para obtener los solubles intermedios (SI) y conforme se obtienen los SI estos pasan a ácidos grasos con ayuda de las X_a y estos a su vez a metano con ayuda de X_m . La literatura reporta que la mayor cantidad de metano se obtiene en 20 días, para la biomasa (BM) se supone que se solubiliza en su mayor parte en el sexto día y que los ácidos grasos se obtienen desde el primer día.

3.3 ELECCIÓN DE BIODIGESTOR Y DISEÑO

El diseño propuesto es bastante común, al ser **semi-continuo** permite adicionar residuos orgánicos diariamente con una carga relativamente pequeña en comparación al contenido total, esta se deposita en la cámara de carga e igualmente se debe extraer de la cámara de descarga un volumen igual del efluente líquido para así mantener el volumen constante, produciendo biogás permanentemente. Una limitante importante es la disponibilidad de agua, debido a que la carga debe ser una mezcla de una parte del material orgánico y cuatro de agua (proporción 1:4).

Para el diseño de este biodigestor se considerada aprovechar los residuos orgánicos para producir biogás pudiendo construir un **biodigestor anaeróbico** casero a partir de un tanque de polietileno con capacidad entre 120 y 220 litros, tubería de PVC (Policloruro de Vinilo) y valorando el volumen con que se cuenta.

Tabla 3.4 Tabla de valoración para selección

Ventajas	Desventajas
• Pueden procesarse una gran variedad de materiales, la carga puede juntarse en campo abierto porque aunque tenga tierra u otro inerte mezclado, no entorpece la operación del biodigestor. • 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 materia prima no sea continua, sino periódica. • No requiere prácticamente ninguna atención diaria.	• La carga requiere de considerable tiempo y paciencia de trabajo. • La limpieza y descarga resulta ser trabajosa.

PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

MATERIALES, DESCRIPCIÓN DE CONSTRUCCIÓN Y COSTOS

El reactor y la entrada de materiales

- Un tanque, tambo o tambor de entre 120 y 220 litros de capacidad. Generalmente son azules con tapa de cierre hermético.
- Tapón de limpieza sanitario (4"): Es una especie de adaptador con tapón enroscable.
- Segmento corto de tubo (4"): Pasa a través de la abertura y conecta el "adaptado-tapón" en el exterior con la reducción en la parte interna del tanque. Debe ser suficientemente corto para permitir que tanto la reducción como el adaptador-tapón aprisionen la pared de la tapa del tanque y así permitir una mejor sujeción y sellamiento. También se pueden usar bridas sanitarias pegadas con silicona al tanque.
- Reducción PVC de 4" a 3"
- Tubo PVC sanitario (3"): Desde la reducción hasta 5cm antes del fondo del tanque.

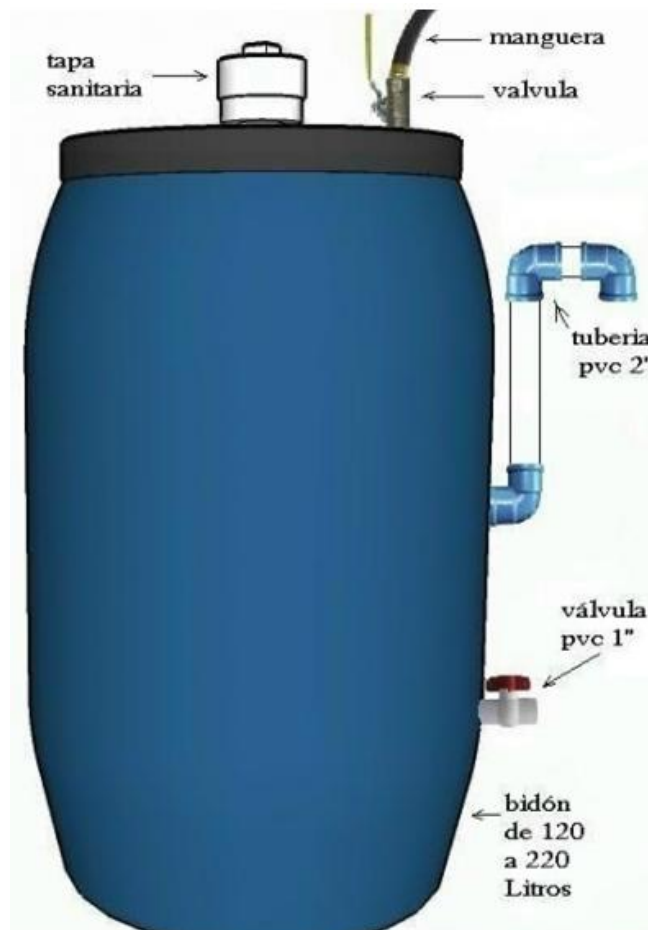
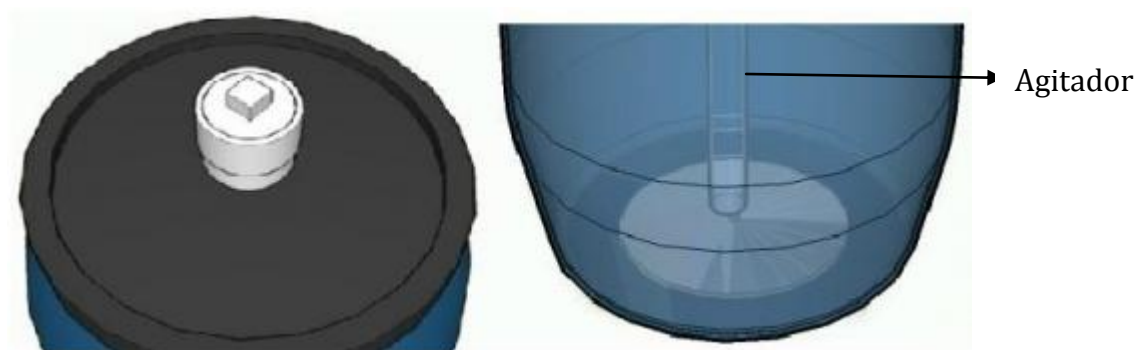


Figura 3.4 Biodigestor Casero

Figura 3.5 Parte superior e inferior





PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Tabla 3.5 Tabla de Costos para biodigestor

Para la salida del efluente:	
Adaptador de tanque (2")	\$50.00
Tubo PVC (2") para la tubería de salida del efluente	\$150.00
3 Codos PVC (2")	\$75.00
Adaptador de tanque (1") para conectar la válvula	\$40.00
Válvula de esfera PVC (1") Para la salida inferior del efluente más pesado.	\$80.00

Para la salida del biogás (en orden):	
Conector de tanque (1/2")	\$40.00
Válvula de esfera con roscas (1/2")	\$65.00
Adaptador para manquera	\$25.00
Manguera	\$150.00

Para unir las partes y sellar:	
Soldadura (pegamento) para PVC	\$80.00
Silicona selladora transparente, ¡resistente a hongos!: Para sellar alrededor de las uniones al tanque e impedir filtración.	\$100.00

Tanque o tambo de 120 o 220 Lts \$220.00

Total: \$1,075.00

PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

CONSTRUCCIÓN:

Al tanque se le realizan dos agujeros laterales y dos en la tapa. Uno en la parte lateral-inferior para la válvula de 1 pulgada; otro en la parte media para la salida de efluente. En la tapa uno será para la entrada del material y el otro para la salida del biogás, siempre del diámetro de la pieza que lo atraviesa.

Para almacenar el biogás se utiliza un depósito de campana flotante, muy fácil de construir con dos bidones; uno grande donde va el agua y otro ligeramente más angosto que se sitúa boca abajo dentro del anterior. La manguera que viene del digestor se introduce al tanque mayor y burbujea de tal forma que el gas sube y queda atrapado en el tanque menor el cual tiene una válvula para la salida del gas con una manguera y una trampa de agua.

A continuación se muestra una serie de imágenes para observar la construcción del biodigestor:



Figura 3.6 Cortes a realizar en el tambo



Figura 3.7 Se muestra como hacer el orificio para la tapa sanitaria (alimentación) y de agitador



Figura 3.8 Interior del biodigestor para tubería de salida del efluente

PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO



Figura 3.9 Sellando biodigestor

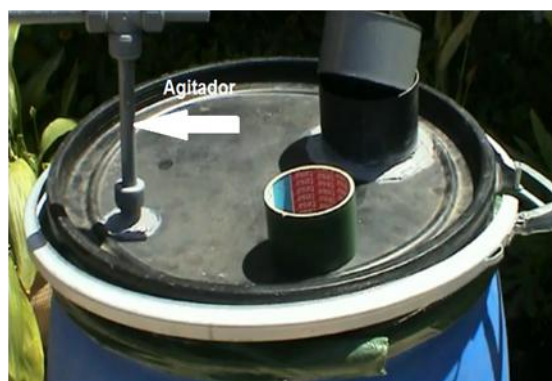


Figura 3.10 Colocando agitador y se continua sellando

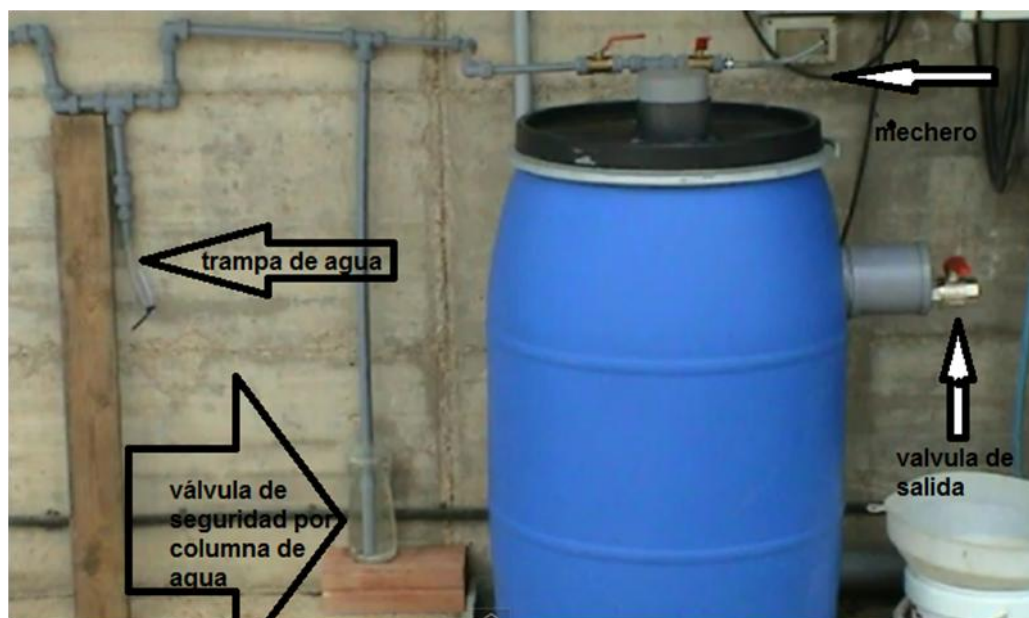


Figura 3.11 Muestra de instalación



Figura 3.12 Cubrir para generar calor



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

3.4 FUNCIONAMIENTO

El biodigestor inicialmente deberá llenarse (los 3/4) con la mezcla de materia orgánica y agua en pocos días para evitar que se liberen olores de forma excesiva. Luego del llenado no se adicionará más mezcla hasta que haya comenzado bien la producción de metano y mantenerlo así por varios días. Posteriormente se adicionará diariamente la carga calculada para el biodigestor en particular, siempre por la tapa PVC en la parte superior del digestor.

El tubo de salida del biodigestor será el rebosadero por donde saldrá el efluente líquido o biol cada vez que se adiciona la carga al aparato.

En cuanto a la cantidad de biogás que se producirá no hay un “número mágico” para todos los sustratos posibles.

Sin olvidar que estas solo son algunas pautas y que puede experimentar variando el tiempo de retención, los materiales orgánicos, la dilución de la carga u otros aspectos.

3.4.1 PAUTAS DE USO

Para poder utilizar el biodigestor su constructor deberá instalar previamente las conexiones, mangueras, válvula de seguridad, depósito de biogás y quemador, así como también revisar las conexiones con el fin de evitar fugas de gas o la entrada de aire al aparato. Ya resueltos estos preparativos se podrá proseguir con el llenado de este.

Inicialmente, dependiendo del tanque disponible así será la cantidad de biogás producido por el digestor. Los usos para este biogás podrían ser: cocinar algunos alimentos, calentar una estancia, iluminar o simplemente para proyectos o experimentos caseros. Para esto último sería muy útil un mechero Bunsen ya que permite regular el flujo de gas y la mezcla de aire-biogás de forma sencilla.

No hay que olvidar que este biodigestor es “experimental”, es decir que constituye una unidad para hacer pruebas y recopilar información aun no se considera como fuente estable para uso doméstico, así se compruebe genere biogás; es por eso el título de este trabajo: “ Propuesta de diseño de un biodigestor casero”

3.4.2 MATERIA ORGÁNICA UTILIZABLE

- Estiércol fresco o purines de animales herbívoros u omnívoros (ejemplo: conejo).
- Residuos de cocina y restos de alimentos, (excepto de cítricos).
- Aceite de cocinar usado (solo el 5%)
- Restos de vegetales de plaza de mercado.
- Césped recién cortado -mezclado con otros materiales-
- Aserrín (serrín) “viejo” -mezclado con otros materiales-



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Existen otras materias que no se recomiendan debido a que son más difíciles de degradar o no aptos para un biodigestor de estas características. En general no deben utilizarse residuos de frutas cítricas, semillas o granos enteros, paja o tallos de cereales, virutas de madera, hojas secas, restos de podas, excremento de animales carnívoros como gatos o perros y tampoco materia fecal humana. Están fuera de toda consideración para este uso los huesos, piedras, vidrio, metal, plástico y cascarilla de arroz.

Para permitir una rápida degradación, todos los materiales que se utilizarán deben ser triturados, desmenuzados o machacados según sea el caso, en fragmentos no mayores a 10 mm los más blandos y menores a 5 mm los más consistentes; estos pueden ser cortados con el cuchillo, molidos y hasta licuados, entre más pequeños mejor.

3.4.3 CARGA

La carga se constituirá por la mezcla de un 20 a 25 % de material orgánico y de un 80 a 75% de agua. Parte del agua puede reemplazarse por el líquido (efluente) tratado que sale del biodigestor también conocida como “biol” (biofertilizante en fase líquida), y de esa forma producir más biogás a expensas de obtener menos fertilizante.

3.4.4 TIEMPO DE RETENCIÓN Y CARGA DIARIA

De acuerdo a la temperatura ambiental, así será el tiempo de retención de los materiales añadidos al biodigestor. En la siguiente tabla extraída de la Guía de Biodigestores Familiares se indica el tiempo de retención de acuerdo a la temperatura.

Tabla 3.6 Tiempo de Retención

Región característica	Temperatura (°C)	Tiempo de retención(días)
Trópico	30	20
Valle	20	30
Altiplano	10	60

[6]

3.4.5 TIEMPO DE RETENCIÓN SEGÚN TEMPERATURA

Se dejará un espacio de “aire” en el biodigestor de un 25% (1/4) en tanque-biodigestor, por lo que solo se utilizará el 75% de la capacidad de este, al cual llamaremos **volumen de trabajo (VT)**. El tubo de salida se dispondrá a modo de rebosadero, de tal forma que siempre quede 1/4 de la capacidad para la fase gaseosa.[4]

La carga de mezcla que se debe adicionar diariamente se calcula como se indica a continuación:

1. $VT = CTT \times 0,75$
2. $CD = VT/TR$

PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Siendo:

VT: volumen de trabajo en litros (lts)

CTT: capacidad total del tanque en litros (lts)

CD: carga diaria de mezcla que se debe añadir.

TR: tiempo de retención (días) (ver tabla)

Ejemplo: En clima cálido, para un biodigestor de 120 litros, el volumen de trabajo será 90 litros ($120 \text{ L} \times 0.75 = 90$) y la carga diaria de mezcla será 4.5 litros ($90 \text{ L} / 20 = 4.5 \text{ L}$).

3.5 DEPOSITO FLOTANTE DE BIOGAS

Una forma de **almacenar el biogás** producido en un biodigestor pequeño es con un depósito de **cúpula flotante**. Este puede mantener una presión relativamente constante. La instalación de este depósito es opcional. Además

- Da un mejor indicador del volumen de biogás almacenado.
- Es durable y menos tedioso de usar.
- En un depósito de campana se aprovecha que el agua no dejará escapar el gas encerrado en el contenedor sumergido con la boca hacia abajo. Para el depósito se utilizan un par de **tanques plásticos cilíndricos** de distinto diámetro. La idea es poder introducir uno dentro del otro sin problemas y sin quedar demasiado espacio entre uno y otro.
- Al tanque más ancho se le quitará la tapa o si fuere necesario se le retirará la parte superior cortándola. El tanque de menor anchura se colocará sin tapa y con la boca hacia abajo dentro del otro tanque.
- La **entrada del biogás** en el depósito puede estar situada tanto en la parte inferior de tal forma que el gas burbujee y quede atrapado en el tanque o también por la parte superior de este, que técnicamente es el fondo y para lo cual haría falta taladrar una vez e instalar una conexión, una válvula y el adaptador para colocar la manguera.
- El tanque base debe llevar unos rieles o varillas metálicas proyectadas hacia arriba; servirán de guías al tanque superior e impedirán que este se vuelque al elevarse por el biogás almacenado. Del mismo modo, el tanque superior debe tener una tablilla pegada al fondo (parte superior) con perforaciones o ranuras en los extremos por donde se insertarán las varillas guías.



Figura 3.11 Montaje de depósito flotante de biogas



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

MATERIALES Y COSTOS

Tabla 3.7 Costos para deposito flotante

El reactor y la entrada de materiales

1 o 2 tanque o tambo de entre 120 o 220 Lts de capacidad	\$220.00	c/u
1 o 2 tanque o tambo de entre 100Lts de capacidad	\$180.00	c/u
Tramo de 1.50m de madera	\$50.00	
Base de herrería	\$500.00	

Para la entrada del agua:

Adaptador de tanque (2") para conectar la válvula	\$50.00
Tubo de PVC (2") para la entrada del efluente	\$150.00
Válvula de esfera PVC (2")	\$90.00

Para la entrada del biogás

Conector de tanque (1/2")	\$40.00
Adaptador de tanque (1/2") para conectar la válvula	\$30.00
Válvula de esfera con roscas (1/2")	\$65.00
Adaptador de manguera	\$25.00
Manguera	\$150.00

Para la salida del biogás:

Codo de (1/2")	\$40.00
Válvula de esfera PVC con roscas (1/2")	\$65.00
Tubo PVC (1/2")	\$150.00
Adaptador para manguera	\$25.00
Manguera	\$150.00

Para unir las partes y sellar:

Soldadura (pegamento) para PVC	\$80.00
Silicona selladora transparente, para sellar alrededor de las uniones al tanque.	\$100.00
Cinta	\$60.00

Total \$2,220.00



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

3.6 FACTORES A CONSIDERAR

3.6.1 CALIDAD DE LOS SÓLIDOS VOLÁTILES

Para mejorar la producción de metano de los biodigestores, es conveniente mejorar los sólidos volátiles (SV), es decir, que la mezcla se encuentre balanceada en la cantidad de Carbono/Nitrógeno, que sea homogénea en cuanto a que no hayan impurezas como trozos de materia mayores a 1cm^3 , que se encuentre con niveles de pH balanceados y que posea una alta cantidad de organismos metanizantes.

3.6.2 HUMEDAD DEL BIOGÁS

Las características naturales de generación del biogás hacen que este sea un gas naturalmente húmedo y que en las cañerías se almacene un elevado porcentaje de humedad, esta no siempre es conveniente ya que disminuye la caloría por m^3 , produce oxidación de materiales y además obstruye cañerías, por lo que es conveniente su eliminación si queremos comprimir el biogás. Una forma de hacerlo es mediante filtro de dióxido de silicio llamado comúnmente silicagel.

En el caso de nuestro biodigestor manejamos una trampa de agua ayudando a eliminar la humedad del biogás. (Figura 3.8)

3.6.3 ELIMINACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO

Este compuesto debe ser eliminado no solo porque es venenoso, sino que acelera el fenómeno de oxidación de una manera increíble, envejeciendo toda la instalación (motivo por el cual se escogió PVC (Policloruro de vinilo)).

○ AIREACIÓN

Otro tratamiento común de agua con sulfuro es aireación. Sulfuro de hidrógeno (H_2S) se elimina físicamente agitando el agua a través de burbujeo ó caída en cascada y entonces separando o "decapando" el sulfuro de hidrogeno (H_2S) en un recipiente. El sulfuro de hidrógeno que no se desea se elimina como un gas volátil soplando dentro de una tubería para desperdicios o al exterior. Aireación es más eficaz cuando las concentraciones son más bajas de 2.0 mg/l . En concentraciones más altas, éste método puede que no elimine todo el olor desagradable a menos que se utilice el aire para oxidar el sulfuro de hidrógeno químicamente el cual entonces se filtra.

En un sistema típico de aireación, el aire de ambiente se introduce al agua utilizando un compresor o calefactor. Tanques bien diseñados de aireación mantienen un bolso de aire en la tercera parte o por la mitad del tanque; si el tanque no tiene un bolso de aire, el olor a sulfuro puede retornar. La mayoría de las fuentes de abastecimiento contienen menos de 10 mg/l de sulfuro, en cual caso el tanque de aireación es casi del mismo tamaño que el tanque de filtro ($10'' \times 54''$). Cuando los niveles de sulfuro exceden 10 mg/l , tanques de aireación, sistemas de represurizar, sistemas de cloración puede que se necesiten.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

La aireación no es siempre el tratamiento de agua más práctico, especialmente si las concentraciones del sulfuro de hidrógeno exceden 10 mg/l, porque esto requiere condiciones muy ácidas (pH 4.0-5.0), tiempos de contacto extendido y agua para mezclar, y por lo regular requisitos de espacio amplio. Además, el agua tratada tal vez necesite ser represurizada para distribución dentro del hogar y olores desagradables deben ser eliminados ventilando el gas.

○ **MAGNESIO GREENSAND**

Normalmente, se recomienda para agua que contiene menos que 6.0 mg/l de sulfuro de hidrógeno (H_2S). Un filtro de magnesio greensand tiene una capa especial que oxida el sulfuro de hidrógeno a partículas de azufre sólido, que se filtran. Cuando se consume todo el óxido de magnesio, el greensand debe regenerarse periódicamente basados en el uso del agua y la concentración de contaminante. Cuando se usa greensand para tratar concentraciones de sulfuro de hidrógeno, la regeneración ocurre más frecuentemente.

3.7 SUGERENCIAS SOBRE SEGURIDAD

- Cuidar que no se produzcan un incendio o explosión; si se producen se puede comenzar por una chispa producida por un interruptor de luz, una herradura o un cigarrillo encendido.
- Cuando se pone en marcha la red de distribución está llena de aire y hay que eliminarlo, debe purgar el biodigestor de los primeros gases generados. Cuando ya se tiene la producción normal, hay que dejar correr el gas por todas las cañerías y dejarlo escapar a la atmósfera. Para esto sugerimos que se ventilen los ambientes dado que la toxicidad del biogás es muy parecida a la del gas natural.
- Evitar un posible retroceso de llama.
- Colocar válvula de seguridad por columna de agua para control de presión,
- Trampa de agua para limpiar un poco el biogás.
- Periódicamente constatar la inexistencia de pérdidas en la línea de gas, en todas las uniones, acoplamientos, válvulas, etc, de la instalación.
- Asegurar la eliminación de H_2S (sulfuro de hidrógeno), sea para evitar su acción tóxica, como corrosiva, ya que esto último a la larga origina pérdidas y lo primero mata.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

CONCLUSIONES

Actualmente el país comienza a tener problemas con los rellenos sanitarios por diferentes factores; como no contar con el hábito de separar “basura”, generando toneladas diarias de esta, en la cual los desperdicios orgánicos son de los principales y generan gases que están siendo desperdiciados y al no ser utilizados propician una mayor contaminación.

En base a este problema ambiental se ha propuesto el diseño del biodigestor de este trabajo, que promete contribuir al uso de desechos orgánicos para la producción de un combustible para diversas aplicaciones y biofertilizantes, es decir, un aparato que genera productos aprovechables casi en su totalidad. Además un dispositivo económico, versátil para una variedad de desechos y de fácil instalación y adquisición de sus componentes.

En la ciudad de México y Área Metropolitana la utilidad de este biodigestor casero puede entrar en tela de juicio esto por no contar con el espacio que ocupa, existen casas con espacios que pueden ser adaptadas para el montaje de este. Con respecto a los edificios que están en construcción se les puede hacer una modificación e instalar uno y hacer consciente a los inquilinos de la importancia de aprovechar al máximo este recurso, de igual forma con los edificios que ya están contruidos se podría realizar adaptaciones, pensando en los edificios al ser mayor la materia prima puede ser factible la utilización del biogás para generar energía eléctrica para el alumbrado de pasillos y escaleras de estos.

Pensando en la sociedad rural donde no se cuenta con toda la infraestructura tecnológica, el construir este biodigestor puede ser de gran ayuda ya que dichas comunidades manejan el 60% de la materia prima para la función de este siendo de gran utilidad para la producción de un biogás y hasta generar energía eléctrica, siendo autosuficientes; un ejemplo de esto en rancherías hay animales que el abono puede ser utilizado como materia prima y el biogás se transforma en energía para hacer funcionar la bombas para sacar agua de los pozos, otro caso es en pequeños poblados donde se vive con mucha pobreza les ayudaría tener biodigestor.

Este prototipo experimental de biodigestor casero, instalado en el jardín de 2 x 2 m de mi domicilio en la ciudad de Aguascalientes, ayuda con la generación de gas metano orgánico para mi familia, con el fin de cocinar, ya que solo ha sido empleado para dicha función y por el tamaño de este, considerando además el uso del depósito flotante de biogás para generar energía eléctrica, aún cuando el motor es un poco costoso y no siempre se tendría la suficiente producción de biogás para arrancarlo; la construcción es relativamente económica y sencilla de realizar ya que los materiales a utilizar se consiguen en cualquier ferretería o tlapalería, a excepción de los tambos ya que hay poca venta de estos.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

Pensando en el tratamiento de los lodos generados se puede decir que pueden venderse como fertilizante ayudando aún más en la economía de la persona que tenga uno de estos al ser autosuficiente ahorramos en gas (actualmente precio del gas LP \$10.43 el kilo en el Distrito Federal) analizando el ahorro que obtenemos con el uso de este aunque solo sea para guisar es considerable.

En este trabajo se analizaron los factores más relevantes en la selección de un biodigestor y un procedimiento de instalación, que permiten contar con un aparato que puede servir para pruebas experimentales futuras, con el propósito de confirmar los resultados esperados durante su operación en otras condiciones diferentes a las de esta tesis.

Creo que en México estamos comenzando con todo lo que respecta a este tipo de temas ambientales ya que en el país se están construyendo plantas generadoras de biogás (Aguascalientes) y algunos rellenos sanitarios están siendo o han sido adaptados para obtener el gas metano (Zapopan, Jalisco).

Analizando los beneficios que tiene como:

- Tener una generación alterna de combustible
- Considerar en descentralizar la energía eléctrica
- Reutilizar los desechos ayudando al medio ambiente
- Ganar un poco de dinero

Por las razones expuestas este prototipo de biodigestor casero muestra tener gran alcance.



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

ACRÓNIMOS

CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CH ₄	Metano
H ₂ S	Sulfuro de Hidrógeno
NO _x	Óxido de Nitrógeno
SO ₂	Dioxido de Azufre
CFC's	Clorofluorocarbonos
CRETIB	Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Tóxico ambiental, Inflamable, Biológico Infeccioso
PPC	Producción Per-Capita
PCS	Poder Calorífico Superior
PCI	Poder Calorífico Inferior
TRS	Tiempo de Retención de Sólidos
UASB	Biodigestor anaerobio de flujo ascendente con manro de lodo
ICSB	Reactor anaerobio con circulación interna
EGSB	Reactor anaerobio con lecho granular expandido
Pv	Presión volumétrica
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DBO	Demanda Biológica de Oxígeno
AGV	Acidos Grasos Volátiles
OHPA siglas en ingles	Bacteria Productoras obligadas de Hidrógeno
MS	Materia Seca
MO	Materia Orgánica
SV	Sólidos Volátiles
TS	Sólidos Totales
TRSB	Tiempo de Retención de Sólidos Biológicos
TRH	Tiempo de Retención Hidráulico
VD	Volumen del Biodigstor
PVC	Policloruro de vinilo
BM _r	Biomasa rápidamente biodegradable
BM _l	Biomasa lentamente biodegradable
SI	Productos solubles intermedios
FA _t	Ácidos grasos volátiles totales
Xa	Bacteria productora de ácido
Xm	Bacteria productora de metano



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1	Robles Martínez, F. Factores importantes en la degradación de los residuos Sólidos Municipales, Robles Martínez, F. Generación de Biogás y Lixiviados en los Rellenos Sanitarios, editorial IPN-México. México D.F., 2005, 30-32, 36,
2	Robles Martínez, F. Degradación Biofísicoquímica de los Residuos Sólidos en los Rellenos Sanitarios, Robles Martínez, F. Generación de Biogás y Lixiviados en los Rellenos Sanitarios, editorial IPN-México. México D.F., 2005, 48-53
3	BMWA, <i>Renewable Energy in Austria. Federal Ministry of Economics Affairs (BMWA)</i> , Vienna, 1998, 22 pp.
4	Contreras, L., <i>Producción de biogás con fines energéticos. De lo histórico a lo estratégico</i> . Revista futuros Volumen VI, 2006
5	Dobelman J.K. and D.H. Müller. "The sustainable winery". ABIRER, Germany. 2000.
6	Gil, S. R. <i>Información climatológica para la aplicación de energía de la biomasa</i> . Volumen, DOI, 2001
7	GTZ pectoral Project "Promotion of anaerobic technology for the treatment of municipal and industrial wastes and wastewater". L. Hulshoff Pol; H. Euler; S. Schroth; T. Wittur; D. Grohgan. En: Memorias V taller y Seminario Latinoamericano Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales, Viña del Mar, Chile, 1998.
8	Gustavsson, L., P. Börjesson, B. Johansson and P. Sverningsson. "Reducing CO ₂ Emissions by Substituting Biomass for Fossil Fuels." Energy 20(11), (1995). 1097-1113.
9	Graindorge, 1990; García, 1993; Braun y Colaboradores, 1981; Dumont y colaboradores, 1993; Barlaz, 1997; Capenberg y Printis, 1974; Ferry, 1989; Braindorge, 1990; Kubak y Dubuis, 1998; Petrof, 1983; Montalvo, 2003; An, 1996; Mc.Carty y Nickinney 1962; Souza, 1984; Larrondo, 1983.
10	Teisis Profesional "Simulación del Funcionamiento de un biorreactor que sirva para generar biogás usando desechos de frutas y verduras"; Raúl Gadiño Nieto; ESIQIE 1996.
11	Sanchez Serrano A.P. "Digestor Anaerobico, construcción, evaluación microbiana y química de efluente" Tesis Profesional, UACH, Chapingo
12	Introduccion a la Termodinamica en ingeniería Química J.M.Smith, H.C. Van Ness, M.M. Abbott; Edit. Mc Graw Hill, Edicion 2003
13	Perry, John H. et. Al Manual del Ingeniero Químico.
14	http://images.google.com.mx/imgres?imgurl=http://www.monografias.com/trabajos48/biomasa/Image4427.gif&imgrefurl=http://www.monografias.com/trabajos48/biomasa/biomasa2.shtml&h=397&w=424&sz=10&hl=es&start=10&um=1&tbnid=z-3Cl4y-S57LWM:&tbnh=118&tbnw=126&prev=/images%3Fq%3Dbiodigestor%26um%3D1%26hl%3Des%26rlz%3D1T4GZH_esMX242MX243%26sa%3DX
15	http://images.google.com.mx/imgres?imgurl=http://www.proteger.org.ar/archivos/4_BiodigestorCompacto800x600.jpg&imgrefurl=http://www.proteger.org.ar/doc228.h



PROPUESTA DE DISEÑO DE UN BIODIGESTOR CASERO

	tml&h=536&w=800&sz=81&hl=es&start=2&um=1&tbnid=2BDpHpDcNGyUvM:&tbnh=96&tbnw=143&prev=/images%3Fq%3Dbiodigestor%26um%3D1%26hl%3Des%26rlz%3D1T4GZHZ_esMX242MX243%26sa%3DX (marzo 2008)
16	http://www.p4.cl/pdf2007/biogas-hectormiranda.pdf , (abril 2008)
17	http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/119/htm/sec_8.htm , (marzo 2008)
18	“Estudio preliminar sobre la posibilidad de aprovechamiento de los desechos de productos hortofrutícolas y hortalizas que se generan en centros de distribución de alimentos” Tesis Profesional ESIQIE México, 1994, Morales A. Narciso
19	http://www.inegi.gob.mx (abril 2008)
20	http://images.google.com.mx/imgres?imgurl=http://www.monografias.com/trabajos48/biomasa/Image4427.gif&imgrefurl=http://www.monografias.com/trabajos48/biomasa/biomasa2.shtml&h=397&w=424&sz=10&hl=es&start=10&um=1&tbnid=z-3Cl4y-S57LWM:& (marzo 2008)
21	http://www.engormix.com/biodigestores_tabla_valores_ts_s_articulos_1237_POR.htm (abril 2008)