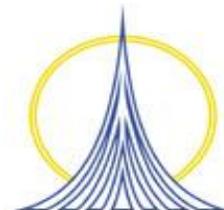


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FES "ZARAGOZA"



CARRERA: INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS QUE PRESENTA: ARACELI CISNEROS CASTRO

TÍTULO:

**PROPUESTA PARA EL APROVECHAMIENTO DE DESECHOS  
PORCINOS Y AVÍCOLAS GENERADOS EN LA GRANJA  
VILLAVICENCIO, UBICADA EN AMECAMECA SAN PEDRO;  
MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN BIORREACTOR.**

**DIRECTOR DE TESIS: I. Q. EDUARDO LOYO ARNAUD**

**ABRIL 2008**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

\*ZARAGOZA\*

JEFATURA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA  
QUÍMICA

OFICIO: FESZ/JCIQ/008/08

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNO: CISNEROS CASTRO ARACELI  
P R E S E N T E

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

PRESIDENTE	I. Q. Eduardo Loyo Arnaud
VOCAL	Dr. Roberto Mendoza Serna
SECRETARIO	I. B. Q. Víctor Alberto Corvera Pillado
SUPLENTE	Biol. María de los Ángeles Galván Villanueva
SUPLENTE	I. Q. Fausto Calderas García

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

México D. F., a 5 de Marzo de 2008

JEFE DE LA CARRERA

I. Q. RAÚL RAMÓN MORA HERNÁNDEZ



## AGRADECIMIENTOS

Gracias **DIOS**, por permitirme llegar a este día tan importante en mi vida, con la culminación de éste trabajo, que ahora te dedico.

Gracias mamá, gracias papá; por darme la vida y por inculcarme los valores que ahora poseo, y que han sido fundamentales en todos mis logros.

Gracias Genaro, por darle sentido a mi vida, por toda tu paciencia, apoyo y confianza a lo largo de mi carrera. Te amo.

Gracias a mis hermanas Andrea y Alicia por su disponibilidad, por sus sonrisas, por su compañía, por su amistad; simplemente gracias por ser mis hermanas.

Gracias a mis abuelos Epifanía y Daniel, a mis segundos padres Matilde y Rodo, por todas sus oraciones.

Gracias a cada uno de mis maestros, que a lo largo de la carrera han compartido sus conocimientos conmigo y mil gracias a cada uno de mis sinodales por sus oportunas intervenciones y aportaciones a éste trabajo, especialmente a mi director de tesis Ing. Eduardo Loyo

Gracias a quien me dio la oportunidad de conocer el deporte más apasionante: Fausto García. Mi entrenador de lucha olímpica ¡Gracias!

Gracias a mis amigos que han estado conmigo, apoyándome para realizar este trabajo: Alicia, Pablo ("*thank's*"), Ernesto, Maestra Ángeles, Don Saúl y Víctor. Mil gracias.

Gracias a todos mis amigos de la Facultad por su amistad; sin ustedes la vida no sería tan divertida.

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México, por hacer de mi lo que ahora soy. ¡Te llevo en el corazón!

## ÍNDICE

<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>1</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>3</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>5</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>6</b>
1.1 Proyectos en México.....	8
1.2 Proyectos en Europa.....	9
1.3 Objetivos.....	13
<b>2. GENERALIDADES.....</b>	<b>14</b>
2.1 Aspectos básicos de los biorreactores.....	14
2.1.1 Biorreactores.....	14
2.1.2 Balances de materia y energía.....	15
2.1.3 Diseño de biorreactores para digestión anaerobia.....	17
2.1.4 Clasificación general de biorreactores para digestión anaerobia.....	18
2.2 Biogás.....	20
2.2.1 Origen histórico del biogás.....	21
2.2.2 El metano en la atmosfera.....	23
2.2.3 Composición del biogás.....	24
2.2.4 Metano y dióxido de carbono en el biogás.....	24
2.2.5 Gases que se encuentran en menor proporción en el biogás.....	26
2.2.6 Homogeneidad en el biogás.....	29
2.2.7 Biogás, solubilidad en agua.....	29
2.2.8 Densidad del biogás.....	29
2.2.9 Punto crítico del biogás.....	31
2.2.10 Valor calorífico mínimo y máximo del biogás.....	31
2.2.11 Relación aire-combustible.....	32
2.2.12 Temperatura mínima de auto-ignición.....	34
2.2.13 Velocidad de flama.....	34
2.2.14 Límites de flamabilidad.....	35
2.2.15 Toxicidad y corrosividad.....	38
2.2.16 Purificación del biogás.....	38
2.2.17 Antecedentes de la utilización del biogás.....	43
2.2.18 Utilización del biogás.....	45

2.3 Biomasa.....	45
2.3.1 La biomasa en el contexto de la Unión Europea.....	46
2.3.2 Tipos de biomasa.....	48
2.3.3 Características energéticas de la biomasa.....	49
2.3.4 Aplicaciones energéticas.....	51
2.3.5 Ventajas y desventajas.....	53
<b>3. DIGESTIÓN ANAEROBIA.....</b>	<b>56</b>
3.1 Procesos bioquímicos que originan el biogás.....	56
3.1.1 Proceso digestión anaerobia.....	56
3.1.2 Proceso aeróbico.....	56
3.1.3 Proceso anaeróbico.....	57
3.1.4 Biosíntesis de metano.....	64
3.2 Parámetros que determinan la digestión anaerobia.....	68
3.2.1 Temperatura y formas de control.....	68
3.2.2 Tiempo de residencia.....	69
3.2.3 Porcentaje de sólidos.....	71
3.2.4 Relación carbono/nitrógeno.....	75
3.2.5 pH.....	79
3.2.6 Agitación.....	81
3.2.7 Fuerza iónica y salinidad.....	82
3.2.8 Toxicidad e inhibición.....	82
3.2.9 Tasa de dilución.....	83
3.3 Biorreactores más utilizados en la digestión anaerobia.....	83
3.4 Utilización del bioabono.....	90
<b>4. PARÁMETROS A CONSIDERAR PARA EL DISEÑO DEL BIORREACTOR.....</b>	<b>93</b>
4.1 Diseño del proceso.....	93
4.2 Producción de metano.....	95
4.3 Cinética del proceso anaeróbico.....	96
4.4 Aspectos microbiológicos.....	101
4.5 Consideraciones acerca de la transferencia de masa.....	103
4.6 Efectos térmicos: generación y pérdida por conducción.....	105
<b>5. SISTEMA EXPERIMENTAL DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.....</b>	<b>107</b>
5.1 Material y equipo.....	108
5.2 Construcción y método.....	109
5.3 Resultados.....	111
5.4 Discusión de resultados.....	115

<b>6. PROPUESTA DEL DISEÑO DEL BIORREACTOR PARA LA GRANJA VILLAVICENCIO.....</b>	<b>117</b>
6.1 Aspectos básicos del diseño.....	117
6.2 Volumen del biorreactor.....	118
6.3 Carga orgánica másica.....	119
6.4 Carga orgánica volumétrica.....	119
6.5 Tiempo de retención celular.....	120
6.6 Diseño del biorreactor.....	121
6.7 Base de cálculo.....	124
6.8 Descripción del proceso.....	126
6.9 Lugar de instalación.....	128
<b>7. CONCLUSIONES.....</b>	<b>130</b>
<b>8. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>130</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>131</b>
<b>ANEXO</b>	

ÍNDICE DE TABLAS	PÁGINA
Tabla1: Utilización de recursos naturales.....	7
Tabla2: Composición del biogás.....	24
Tabla 3: Constantes de Henry y volúmenes disueltos de componentes de biogás en agua.....	30
Tabla 4: Densidad de metano y biogases de varias composiciones.....	31
Tabla5: Puntos críticos.....	32
Tabla 6: Valores caloríficos mínimos del biogás y algunos otros combustibles.....	32
Tabla 7: Equivalencias de volúmenes entre biogás y otros combustibles.....	33
Tabla 8a: Relación estequiometrica aire-combustible para biogás y otros combustibles.....	33
Tabla 8b: Comparación determinada experimentalmente.....	36
Tabla 9: Velocidades de flama para el metano y otros combustibles.....	36
Tabla 10: Valores de velocidad de flama, como influencia para el método experimental por una estequiometria de una mezcla aire-metano.....	36
Tabla 11: Contenido energético de algunos recursos englobados bajo el término biomasa residual seca.....	49
Tabal 12: Contenido energético de algunos recursos englobados bajo el término biomasa residual húmeda.....	507

Tabla 13: Sistemas de generación de energía eléctrica con biomasa en general.....	52
Tabla 14: Valor del poder calorífico de diferentes combustibles y su equivalente referido al biogás.....	55
Tabla 15: Clasificación taxonómica de las bacterias metanogénicas.....	61
Tabla 16: Relación Carbono/Nitrógeno de diversos desechos disponibles en medio rural.....	76
Tabla 17: Relación Carbono/Nitrógeno de desechos orgánicos.....	77
Tabla 18: Datos promedios en distintos tipos de residuos orgánicos.....	78
Tabla 19: CIPAV Centro para la investigación de sistemas sostenibles.....	107
Tabla 20: Datos promedio de temperatura, pH, y producción de biogás.....	113
Tabla 21: Resultados de pruebas químicas.....	115
Tabla 22: Intervalos de DQO, DBO y SST para sobrenadantes.....	116

ÍNDICE DE FIGURAS	PÁGINA
Figura 1: Parque Ecológico 18 de marzo.....	9
Figura 2: Planta de biogás Pastitz en Alemania.....	11
Figura 3: Proceso básico de digestión anaerobia.....	17
Figura 4: Diseños de reactores de primera generación.....	18
Figura 5: Algunos diseños de reactores de segunda generación.....	19
Figura 6: Proceso básico de una planta de biogás.....	22
Figura 7: Límites de flamabilidad en el sistema metano-aire-dióxido de carbono.....	37
Figura 8: Proceso aeróbico de composteo.....	57
Figura 9: Fuentes de desechos orgánicos.....	58
Figura 10: Resumen de la digestión anaerobia.....	63
Figura 11: Producción de gas a diferentes temperaturas.....	70
Figura 12: Datos promedio del contenido de sólidos totales.....	73
Figura 13: Producción de gas vs %sólidos totales.....	74
Figura 14: pH en el digestor.....	79
Figura 15: Digestor por lotes.....	85
Figura 16: Digestor tipo hindú.....	87
Figura 17: Campana del digestor tipo hindú.....	87
Figura 18: Digestor tipo chino.....	88
Figura 19: Digestor Horizontal.....	89

Figura 20: Velocidades de crecimiento calculadas a 37°C.....	97
Figura 21: Datos de producción de gas.....	99
Figura 22: Producción de gas.....	99
Figura 23: Representación gráfica de una compilación de datos de la digestión anaerobia de desperdicios de ganado lechero.....	100
Figura 24: Constante específica de reacción como una función de la temperatura.....	101
Figura 25: Cálculos de transferencia de masa para microorganismos en digestores típicos.....	104
Figura 26: pH tomado cada hora durante 20 días.....	112
Figura 27: Temperatura tomada cada hora durante 20 días.....	112
Figura 28: Temperatura promedio por día en el biorreactor.....	114
Figura 29: Biogás promedio por día en el biorreactor.....	114
Figura 30: pH promedio por día registrado en el biorreactor.....	115
Figura 31: Campana flotante.....	123
Figura 32: Bolsa de Geomembrana.....	123
Figura 33: Diagrama de distribución de la granja.....	125
Figura 34: DFP.....	126
Figura 35: Lugar de escalamiento.....	128
Figura 36: Mapa para la ubicación de la granja.....	128

NOMENCLATURA.

TRH ( $\phi$ ): Tiempo de retención hidráulico.

TRS ( $\phi_c$ ): Tiempo de retención de sólidos.

DQO: Demanda química de oxígeno

DBO: Demanda bioquímica de oxígeno

SST: Sólidos suspendidos totales.

RSU: Residuos Sólidos Urbanos

## 1. INTRODUCCIÓN

Es evidente la problemática de contaminación que existe en el mundo, México no se encuentra en una buena postura ante esta situación, debido a que es un país en vías de desarrollo por lo que la atención de éste está enfocada hacia dos cuestiones que son: energéticos y alimentos; la cultura y las tecnologías para atacar el problema se encuentran fuera de nuestro alcance; aunado a esto la problemática de energéticos nos pone en una situación más crítica, ya que debido al creciente aumento en el precio del petróleo y los combustibles, se ha producido un profundo efecto sobre las políticas energéticas no solo de México, sino también del resto de las naciones, como la explotación de reservas aparentemente ilimitadas de fuente de energía. Por ello, este proyecto invita a desarrollar tecnologías de bajo costo y dedicadas a preservar el medio ambiente.

En nuestro país, la población rural por encontrarse alejada de las redes de suministro de energía, no cuenta con ningún servicio de este tipo como es el caso de la granja Villavicencio ubicada en la comunidad de San Pedro en el Municipio de Amacameca Estado de México, que sólo cuenta con servicio de agua y luz (intermitente), pero no con abastecimiento de gas. Por otro lado el problema de contaminación de suelo y aire que está generando la granja, es preocupante para la comunidad y para los dueños de la misma.

En cuanto a los problemas planteados, existen alternativas para solucionarlos, como son la utilización de los recursos naturales y renovables tales como: el sol, el viento o la utilización de los **desechos orgánicos**. De esta manera sería posible generar energía en el medio rural, sin tener como obstáculo el aspecto económico y por supuesto conservando y protegiendo nuestro medio ambiente; ya que en el caso particular de la granja Villavicencio, los desechos orgánicos que se generan, se lanzan en su totalidad a una barranca que se encuentra dentro de esta propiedad, teniendo un problema severo de contaminación de suelo y aire.

La utilización de estos recursos para generar energía útil a las comunidades rurales, podría realizarse de diversas formas como se muestra en la Tabla1:

FUENTE DE ENERGÍA	APLICACIÓN
Energía solar	Construcción de calentadores para agua, incubadoras, etc.
Energía eólica	Bombeo de agua, molienda de granos, generación de electricidad, etc.
Energía hidráulica	Riego, bombeo de agua, generación de electricidad, etc.
Desechos orgánicos	Obtención de biogás, composteo, etc.

Tabla 1: Utilización de recursos naturales

El proyecto se enfoca en proponer una forma de aprovechamiento de desechos porcinos y avícolas, que se generan en la granja, mediante la implementación de un biorreactor que genere biogás, que sería una fuente energética para la granja Villavicencio, trayendo como ventajas minimizar la contaminación del suelo y el aire y así preservar del medio ambiente, y además obteniendo un coproducto de este proceso que es un excelente fertilizante.

Los sistemas generadores de biogás son un mecanismo ecológicamente puro para obtener potencia y energía, ya que proveen un combustible limpio, y además un fertilizante no patógeno rico en material orgánico, nitrógeno, fósforo y potasio.

Estos sistemas productores de biogás operan a partir de casi toda la materia orgánica, especialmente de residuos agrícolas y basuras, así como de desechos animales y humanos; de esta manera se resuelve al mismo tiempo otro problema referente a la contaminación, ya que al convertir desechos en recursos útiles, se eliminan las larvas de moscas y las moscas, las cuales constituyen focos de infección importantes.

Los residuos que genera la granja son principalmente porcinos, avícolas, y desechos de alimentos. Los estudios que se han hecho aproximadamente desde los años 70 principalmente en Alemania, China y la India son en condiciones diferentes a las que prevalecen en el campo mexicano; sin embargo el principio es el mismo.

### **1.1 Proyectos en México.**

En México también se realizan este tipo de proyectos, sin embargo; esta tecnología no es tan marcada como en otros países, donde ya hay nuevas tecnologías para mejorar el proceso de digestión. En nuestro país en el Distrito Federal, en Nuevo León y en el Estado de México ya existe algo concreto.

La basura que se genera en la delegación Miguel Hidalgo tiene el potencial para generar suficiente energía eléctrica para todos sus edificios públicos y alumbrado e incluso más, afirman expertos en energías renovables. (Reforma, Metrópoli, 25 de mayo de 2005)

La descomposición de los residuos orgánicos emite un biogás que tiene en su composición mayoritaria al metano, el cual puede generar electricidad al pasar por un proceso de combustión (cogeneración).

La delegación Miguel Hidalgo tiene un proyecto para aprovechar el biogás que se genera en su planta de composta y generar 4 mega-watts/hora para suministrar luz a sus 14 edificios delegacionales y al alumbrado público de la demarcación.

El gas metano está dentro de los gases que afectan el cambio climático y cada vez es más necesario promover proyectos que nos ayuden a recuperar el biogás que se genera y utilizarlo, en vez de dejarlo escapar a la atmosfera.

Es un proyecto desde el punto de vista técnico muy interesante, ya que por un lado transforma la basura orgánica evitando que sea dispuesta en su totalidad en un relleno sanitario y por el otro genera un energético que representará ahorros para las autoridades por concepto de alumbrado público.

Al mismo tiempo que se evita la contaminación del medio ambiente, se reducen significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero. La basura es un problema a nivel nacional y una potencial fuente de energía.

Las nuevas instalaciones estarán dentro de la planta de composta de la delegación, en una sección del Parque Ecológico 18 de marzo. Figura 1.

La energía obtenida será introducida a una red de alta tensión o una subestación para su distribución. La inversión inicial en los tanques de almacenamiento se calcula en un millón 500 mil pesos, y el sistema tiene un costo aproximado de 60 millones, y requerirá de un gasto por mantenimiento de 150 mil pesos anuales aproximadamente. (Reforma, Metrópoli, 25 de mayo de 2005)



Figura 1: Parque ecológico 18 de marzo, Fuente: Reforma. Metrópoli, 25 de mayo de 2005.

## 1.2 Proyectos en Europa.

Podemos hacer un pequeño comparativo con lo que se hace en Alemania, pioneros en Europa, en este tipo de proyectos a gran escala.

El dueño de la planta es AEP Putbus GmbH, la ubicación la Isla R gen, Alemania, la capacidad de la planta es de 100,000 t/a de desechos agrícolas y desperdicios orgánicos (t/a- toneladas por año), el tiempo de construcción fue de 8 meses y se finalizó en febrero de 1997.

Esta  nica planta de biogás ofrece una amplia gama de beneficios incluyendo la generación de biogás, que como ya sabemos es una energía renovable, además un fertilizante de alta calidad, y al mismo tiempo tiene control sobre la emisión de gases, previniendo así la contaminación del aire y agua, todo bajo un costo moderado.

A mitad de los años 90 las leyes estrictas ambientales comenzaron a tener un mayor impacto por toda Europa, en Alemania la comunidad agrícola de la Isla R gen se enfrent  a un significativo reto ambiental, la comunidad agrícola había vivido en armonía con los turistas de verano por muchos años. Al paso del tiempo la isla se convertía en un popular destino turístico; y la pregunta era como crear un balance entre la agricultura y el turismo en un terreno tan reducido, el control de olores y la protección del agua fueron dos de los más grandes problemas identificados, tomando en cuenta también el

aspecto económico. La respuesta fue encontrada en ECB Envairo, Berlín AG's *Intégrated Waste Management System*. (Sistema de Control de desecho Integrado).

La solución: los desechos de ganado, desechos orgánicos de los hoteles, restaurantes, hospitales, escuelas, y desechos municipales, fueron mezclados, tratados y 100% reciclados en un proceso que produce fuentes de energía: eléctrica y térmica, y un desecho líquido inodoro y rico en nutrientes que se emplea de nuevo en la tierra de los campesinos.

La energía térmica derivada del proceso es vendida y utilizada para la calefacción de hospitales escuelas y casas aledañas, la energía eléctrica es retroalimentada al sistema que provee una significativa fuente de ingresos, para la cooperativa de pequeños a medianos campesinos involucrados en proyecto de la isla Rügen; el tratamiento para los residuos industriales y municipales garantiza de una manera eficaz el tratamiento de desperdicios y una estabilidad económica y social por un largo tiempo.

ECB maneja este proceso altamente automatizado, bajo una entidad de negocios llamada "*Biogas Plant Pastitz*" (Planta de biogás Pastitz), esta organización fue establecida con la participación de cooperativas campesinas.

La tecnología de ECB fue utilizado porque ECB:

- Ofrece entrenamiento asesoría y apoyo operacional para el sistema de manejo integral para desperdicio.
- Han demostrado su habilidad para efectivamente preparar y operar su sistema a través de la operación de otro sistema de control de desecho localizado en Berlín.
- Han desarrollado sistemas propios para ofrecer beneficios tecnológicos y operacionales.
- Es una compañía reconocida y experimentada que sirve como consultante para las naciones unidas y la comisión Europea en la tecnología de biogás.

La entrega y distribución de materiales de entrada para fertilizantes a partir de desecho tratado, son proveídos a través de ambas compañías una de vehículos de trasporte o compañías locales de carga, cada entrega es cuidadosamente pesada, registrada y analizada en el lugar del tratamiento, varios materiales de entrada son seccionados y científicamente mezclados, en tanques mezcladores antes de la fermentación, después de que el proceso de fermentación concluye, el abono producido, es entregado a la granja en donde es almacenado en tanques listos para la aplicación, durante el proceso de tratamiento, cualquier exceso de gas dentro de dicho lugar debe ser capturado y limpiado por un "biofiltro" antes de ser liberado a la atmósfera. Figura 2.

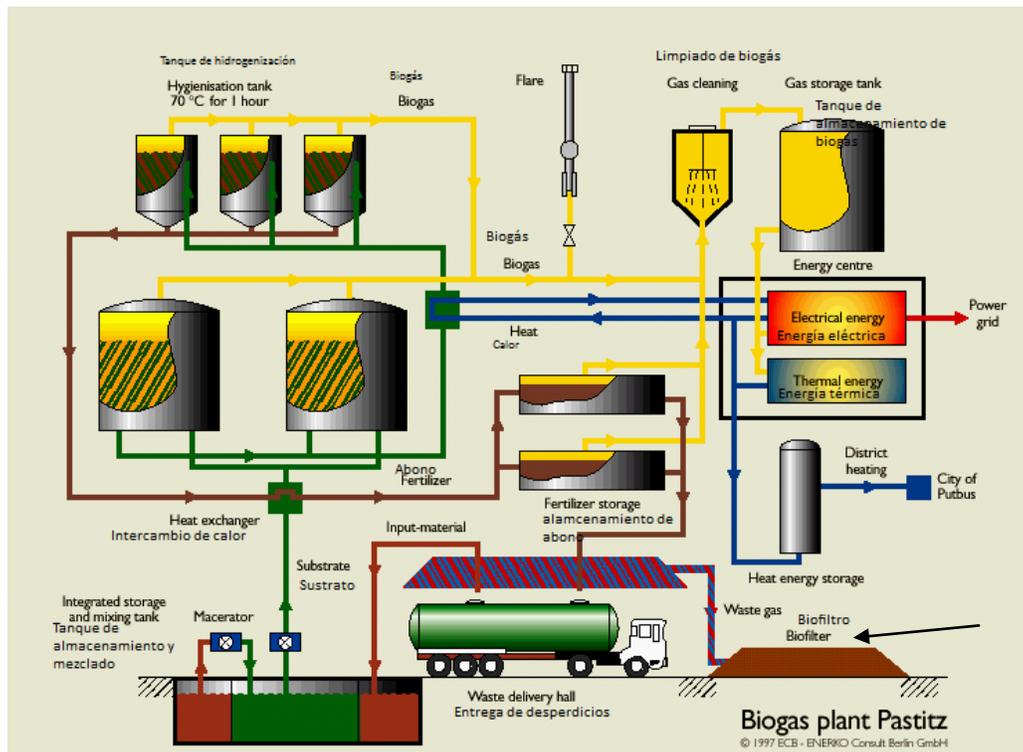


Figura 2: Planta de biogás Pastitz en Alemania.

El material pretratado es calentado aproximadamente a 52° C, lo que quiere decir un intercambio de calor y es continuamente alimentado por dos reactores de biogás en operación, el material es retenido por aproximadamente 15 días, el sustrato es entonces alimentado en el tanque de higienización y calentado a una temperatura de 70° C por una hora, toda la energía requerida es provista dentro de la planta de biogás y todo el proceso es automáticamente controlado por un sistema PLC.

La cofermentación del desecho y residuos orgánicos en la planta de biogás es un proceso biológico completamente natural que produce abono rico en nutrientes, el proceso de higienización mata posibles agentes patógenos y permite de una manera amable el tratamiento de residuos orgánicos en el medio ambiente.

El material fermentado, el cual es sumamente neutral en olor (inodoro), es guardado en varios contenedores fríos, estas instalaciones funcionan como tanques de enfriamiento y almacenamiento, mientras que el abono está en espera su distribución. El biogás generado por el continuo proceso de fermentación, es capturado y alimentado al tanque de almacenamiento de biogás, después de ser pasado por el proceso ECB de limpieza de propiedades de gas. El tanque de almacenamiento de gas asegura un suministro de gas continuo para el centro de energía. Figura 2.

El biogás que contiene alrededor de un 65% metano, es limpiado y desulfurizado ( $\text{H}_2\text{S}$  20 ppm). En un proceso biológico muy especial, es generado el biogás, que es utilizado para la generación de energía y calor combinados. El proceso de fermentación sólo consume cerca del 15 a 20% de energía producida; el resto de la energía es entregado al almacén de energía local, como energía verde, para su distribución a cerca de 3000 hogares, el calor producido de una manera extra, es entregada a la ciudad de Putbus, como suministro de calor, para aproximadamente 630 hogares.

Las estrictas leyes ambientales, demandan la reducción de gases de efecto invernadero ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2$ ). La utilización del biogás es  $\text{CO}_2$  neutral y ayuda a sustituir a los combustibles fósiles. Adicionalmente las emisiones de olores indeseables e incontrolables debido al uso de depósitos para desechos inorgánicos y desechos orgánicos, son considerablemente reducidas a través de este proceso. (ECB ENVIRO 2004)

Hay diferencias muy grandes entre los dos ejemplos, desde la cultura de los alemanes para separar su basura, hasta la disposición del gobierno alemán para apoyar este tipo de proyectos, algo de lo cual carece nuestro país, especialmente en las zonas rurales, las cuales son las más abandonadas. Es por eso que es importante conocer e informarse sobre las formas de **aprovechamiento de desechos orgánicos**, objetivo principal de este trabajo.

*Es muy importante mencionar que el origen de este proceso es la digestión anaerobia, proceso complejo que se intenta explicar más adelante a grandes rasgos, ya que no es un objetivo entender la cinética de la reacción, ni aspectos biológicos muy profundos de este proceso, sino más bien se enfoca a cuestiones técnicas del proceso y describe la manera de cómo ciertas variables importantes influyen en el comportamiento del sistema.*

### 1.3 Objetivos:

- Proponer una forma de aprovechamiento de desechos porcinos y avícolas, mediante la construcción de un biorreactor.
- Proponer el uso de una fuente alterna de energía, al utilizar el biogás generado por el biorreactor como un combustible para usos básicos en el hogar (cocina y calentador de la casa).
- Proponer el diseño de dicho biorreactor específicamente para la granja Villavicencio.
- Construir un biorreactor piloto para poder respaldar la propuesta del diseño mencionado en el objetivo anterior.
- Minimizar la contaminación del suelo y aire, originada por arrojar los desechos al suelo.
- Prevenir posibles focos de infección.

En la elaboración de este trabajo se utilizarán las técnicas de investigación bibliográfica tradicional (libros, periódicos y revistas), modernas herramientas como internet, además de una fase experimental realizada en Laboratorio de desarrollo de procesos para el tratamiento de residuos y el Laboratorio de Investigación T-1422 de Ingeniería Química, de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza Campus II, que respaldará el diseño del biorreactor.

## 2. GENERALIDADES

### 2.1 Aspectos básicos de los biorreactores

#### 2.1.1 Biorreactores

El biorreactor, es sin duda, uno de los equipos fundamentales de la microbiología industrial. Es el recipiente donde se realiza el cultivo, y su diseño debe ser tal que asegure un ambiente uniforme y adecuado para los microorganismos.

Las "tareas" que realiza el biorreactor pueden resumirse del siguiente modo:

- a) Mantener los microorganismos uniformemente distribuidos en todo el volumen de cultivo a fin de prevenir la sedimentación o la flotación.
- b) Mantener constante y homogénea la temperatura.
- c) Minimizar los gradientes de concentración de nutrientes.
- d) Suministrar oxígeno a una velocidad tal que satisfaga el consumo sólo si la reacción no es anaerobia.
- e) El diseño debe ser tal que permita mantener el cultivo puro; una vez que todo el sistema ha sido esterilizado y posteriormente sembrado con el microorganismo deseado.

Para satisfacer los cuatro primeros puntos es necesario que el biorreactor esté provisto de un sistema de agitación, además para el punto d) se requiere de un sistema que inyecte aire en el cultivo solo si la reacción no es anaerobia.

El diseño de biorreactores es una tarea de ingeniería bastante compleja. Los microorganismos o células son capaces de realizar su función deseada con gran eficiencia bajo condiciones óptimas. Las condiciones ambientales de un biorreactor tales como flujo de gases (por ejemplo, oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono, etc.), temperatura, pH, oxígeno disuelto y velocidad de agitación o recirculación, deben ser cuidadosamente monitoreadas y controladas.

La mayoría de los fabricantes industriales de biorreactores usan recipientes, sensores, controladores y un sistema de control interconectados para su funcionamiento en el sistema de reacción.

La misma propagación celular puede afectar la esterilidad y eficiencia del biorreactor, especialmente en los intercambiadores de calor. Para evitar esto, el biorreactor debe ser fácilmente limpiable y con acabados lo más sanitario posible.

Se requiere de un intercambiador de calor para mantener el proceso a temperatura constante. La fermentación biológica es una fuente importante de calor, por lo que en la mayor parte de los casos, los biorreactores requieren de agua de enfriamiento. Pueden ser refrigerados con una chaqueta externa o, para recipientes sumamente grandes, con serpentines internos.

En un proceso aerobio, la transferencia óptima de oxígeno es tal vez la tarea más difícil de lograr. El oxígeno se disuelve poco en agua y es relativamente escaso en el aire. La transferencia de oxígeno usualmente se facilita por la agitación, que se requiere también para mezclar los nutrientes y mantener la fermentación homogénea. Sin embargo, existen límites para la velocidad de agitación, debidos tanto al alto consumo de energía (que es proporcional al cubo de la velocidad del motor) como al daño ocasionado a los organismos debido a un esfuerzo de corte excesivo.

Los biorreactores industriales usualmente emplean bacterias u otros organismos simples que pueden resistir la fuerza de agitación. También son fáciles de mantener ya que requieren sólo soluciones simples de nutrientes y pueden crecer a grandes velocidades.

### **2.1.2 Balances de materia y energía**

Para el análisis de biorreactores es necesario tener conocimiento de la cinética de la reacción, del balance de materia y en algunas ocasiones del balance de energía. Sin embargo; en la práctica, el estudio es mucho más complejo debido a la dependencia con el tiempo de las propiedades de los biocatalizadores, y a la presencia en la mayoría de los casos, de varias fases con varios componentes. Para desarrollar un modelo dinámico de un sistema, se recurre a herramientas de amplio uso en Ingeniería Química basadas en la solución de las ecuaciones de balances de materia y energía conocidas ampliamente.

Balance de materia:

El balance global de materia para un sistema, que se indica en la siguiente ecuación, se puede referir a cada uno de los componentes del sistema.

*Acumulación*

$$= \{ \text{Generación por reacción bioquímica} \} \\ + \{ \text{Flujo de entrada de materia} \} - \{ \text{flujo de salida de materia} \}$$

Al aplicar el balance en el entorno de un biorreactor, considerando que el término correspondiente al transporte difusional tiene una importancia cualitativa muy pequeña y que la corriente de transferencia solo es de interés para procesos entre fases resulta:

$$\frac{d(C_i \cdot V)}{dt} = V \cdot r_i - (Q_e \cdot C_{ie} - Q_s \cdot C_{is})$$

Donde:

$C_i$ : concentración de la especie  $i$

$r_i$ : *velocidad global del proceso fermentativo*

$Q_e$ : *caudal de alimentación al sistema.*

$Q_s$ : *caudal de salida del sistema.*

$C_{ie}$ : *concentración de la especie  $i$  en la entrada del sistema*

$C_{is}$ : *concentración de la especie  $i$  en la salida del sistema*

Que indica que el cambio en la concentración de un componente  $i$  ( $C_i$ ) con el tiempo depende de una generación del componente  $i$  debido a la reacción bioquímica y del flujo neto convectivo de materia en el sistema. En la mayoría de los casos la ecuación se simplifica significativamente cuando se aplica a un determinado tipo de biorreactor. (Gódida 2005)

Balance de energía:

Por lo general en los biorreactores se requiere suministrar energía para elevar la temperatura del medio de fermentación hasta la temperatura óptima durante la puesta en marcha, y retirar la energía generada por la reacción durante el proceso. Ambas operaciones requieren un control adecuado puesto que la actividad celular o enzimática es muy sensible a cambios de temperatura del medio de fermentación. En todo caso, los efectos térmicos en reacciones bioquímicas suelen ser de menor importancia, por lo que habitualmente los dispositivos de intercambio de calor implementados en biorreactores son sencillos y eficaces.

Los biorreactores que se emplean para la digestión anaerobia tienen una manera particular de diseño y varias clasificaciones, las cuales dependerán del autor.

### 2.1.3 Diseño de biorreactores para digestión anaerobia.

El proceso de reactor básico (mezcla completa sin lecho) se muestran en la figura 3.

El sistema convencional de baja carga mostrado se estratifica en varias capas. El fango de aportación entra al tanque cerca de su parte superior a la altura de la capa sobrenadante (una capa líquida parcialmente purificada). Por debajo se encuentra la capa digestora activa de fangos y en la capa inferior del tanque se asienta el fango estabilizado, listo para su extracción. Estos digestores convencionales o de baja carga se caracterizan por que sufren agitaciones intermitentes, con aportes y extracciones de fango asimismo intermitentes (Reynolds, 1982). Cuando no se realiza agitación el contenido del digestor se estratifica tal y como se muestra en la figura 3.

Los digestores de alta carga se caracterizan por un agitación continua, excepto en las extracciones de fangos. Los digestores de alta carga poseen unos tiempos de retención hidráulica alrededor de la mitad que los de baja carga y su tasa de producción de gas casi dobla la de estos. En la siguiente figura se detallan las numerosas variaciones existentes en este proceso, incluyendo recirculación del gas, el lecho fluidizado, etc.

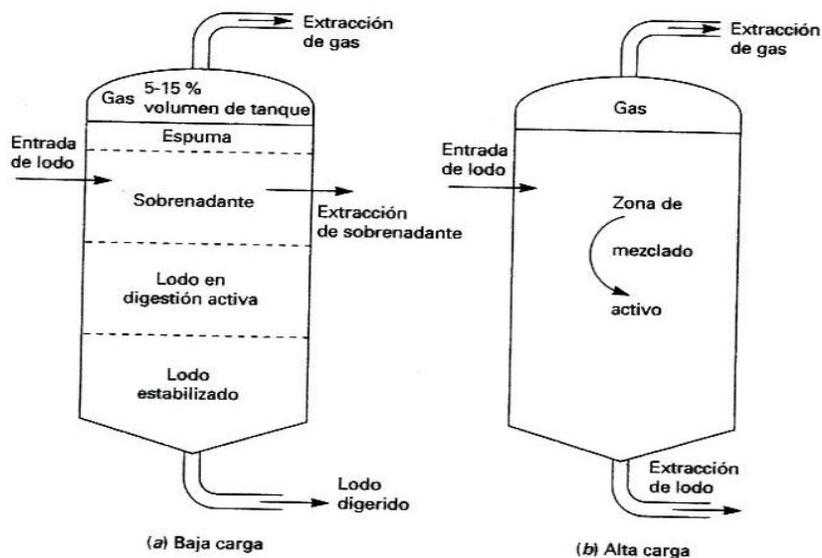


Figura 3: Proceso básico de la digestión anaerobia.

### 2.1.4 Clasificación general de los biorreactores para digestión anaerobia.

Los reactores se pueden clasificar, según Geraca Knely (2000), en:

1. Reactores de primera generación, donde el tiempo de retención hidráulico es igual al tiempo de retención de sólidos o lo que es lo mismo  $\phi = \phi_c$  (que se define a continuación). Tal y como se muestran en la figura 4, incluyen:

- a) Digestores por lotes o discontinuo
- b) Digestor de flujo de pistón
- c) Reactor continuo de mezcla completa RMC
- d) Reactor anaerobio de contacto

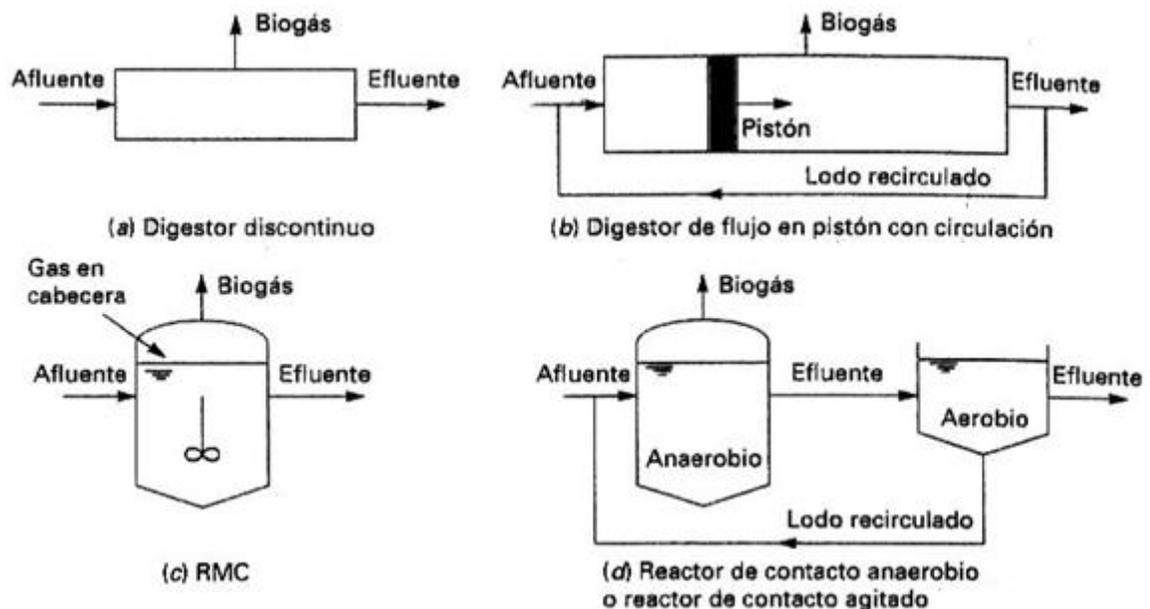


Figura 4: Diseños de reactores de primera generación.

2. Los reactores de segunda generación, en los que el tiempo de retención de sólidos es mayor que el tiempo de retención hidráulico quiere decir  $\phi_c > \phi$ . Tal y como se muestra en la figura 5, son:

- Filtro anaerobio de flujo ascendente-descendente
- Reactores de lecho fijo con flujo descendente en régimen estacionario
- Reactores de lecho fluidizado
- Reactores anaerobios de flujos ascendentes con lecho de lodos
- Reactores anaerobios híbridos de lodos

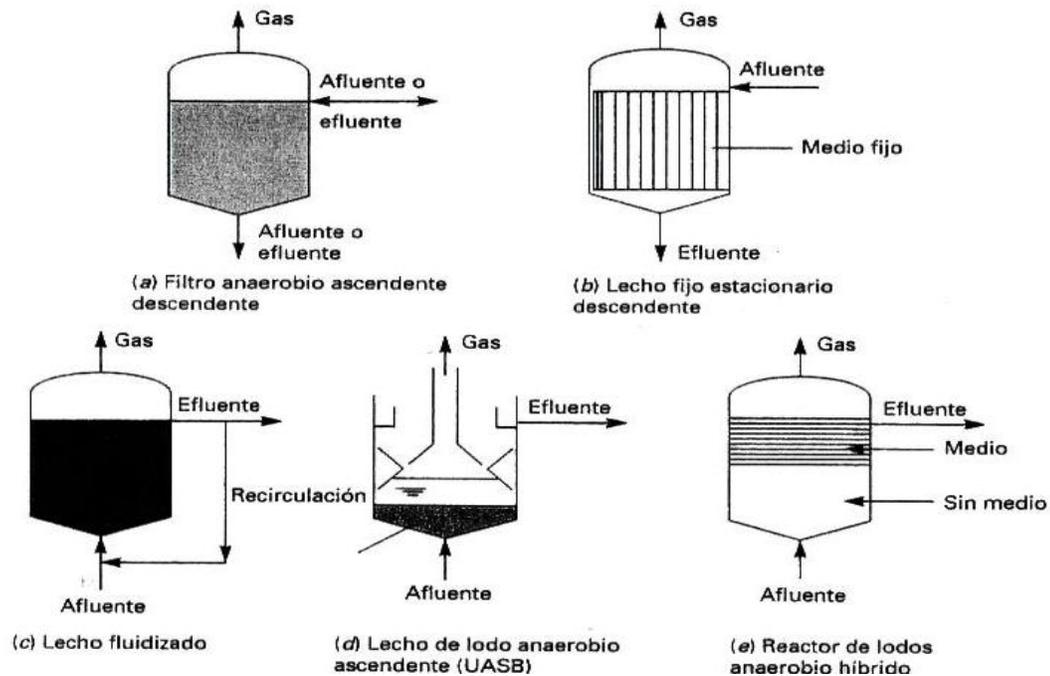


Figura 5: Algunos diseños de reactores de segunda generación.

Para las diversas configuraciones de reactores existen distintos usos tanto para residuos urbanos, industriales como agrícolas. Para los residuos agrícolas se emplea normalmente un proceso discontinuo por lotes mientras que en la industria la tendencia gira a reactores con lechos fluidizados o fijos. La mayoría de los residuos tratados por los digestores son líquidos con un contenido en sólidos entre el 2 y el 6%. Más recientemente, se están empleando digestores de alto contenido en sólidos, particularmente para Residuos Sólidos Urbanos RSU (Kayhanian et al; 1991), donde el contenido de sólidos se encuentra entre el 20 y el 30%. Los tiempos de retención de sólidos se encuentran típicamente entre 10 y 30 días siendo este un parámetro fundamental en el diseño. En los reactores sometidos a agitación, esta se realiza por algunos de los métodos siguientes:

- Mezcladores mecánicos

- Recirculación del gas
- Recirculación de los fangos

Los digestores pueden operar a las siguientes temperaturas:

- Psicrófilas (0-20°C)
- Mesófilas ( 20-36°C)
- Termófilas (50-60°C )

Los digestores más antiguos operaban a temperatura ambiente con mayores tiempos de retención. La mayoría de los digestores operan hoy día a temperaturas mesófilas con buenos resultados de estabilidad con una producción de gas (alrededor de 2 m<sup>3</sup> biogás/m<sup>3</sup> de digestores). Nótese que el biogás= CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub> con un contenido típico de CH<sub>4</sub> del 60%. La temperatura óptima del trabajo es la termófila en donde se alcanza la máxima tasa de producción de gas y se garantiza la destrucción de patógenos. Sin embargo a esta temperatura el proceso es el menos estable y necesita una supervisión de proceso más compleja. La producción de gas depende del diseño, tipo de residuos, temperatura de operación, etc. Aunque típicamente este valor oscila entre 1 y 5 m<sup>3</sup> de biogás por m<sup>3</sup> de volumen del digestor. Los márgenes de reducción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se encuentran entre el 70 y el 90%. Las cargas definidas en kg DQO/m<sup>3</sup>/ día están entre 2 y 40%. La composición típica es metano del biogás es del 50 al 70% (Geraca 2000).

## 2.2 Biogás (anaeróbico).

Biogás es una mezcla de gases resultantes de la degradación biológica de compuestos orgánicos en condiciones anaeróbicas, usualmente consiste del 60% de metano y con un poco menos del 40% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). También contienen trazas de otros gases los cuales son de gran importancia para su potencial y actual uso.

El propósito de este punto, es el de caracterizar al biogás como un sustrato, base fundamental para valorizar al biogás como un combustible alternativo, mediante los siguientes puntos:

- Origen
- Tendencias del metano en la atmósfera
- Composición del biogás
- Solubilidad en agua del biogás
- El biogás como combustible
- Temperatura mínima de auto ignición del biogás
- Velocidad de flama del biogás
- Límites y flamabilidad del biogás
- Límites de octano, etano y metano
- Propiedades corrosivas del biogás
- Toxicidad

### **2.2.1 Origen histórico del biogás**

Cuando esta mezcla de gases se produce en forma natural, se le llama "gas de los pantanos" fue descubierta y reportada por Shirley en 1667. Volta fue el primero en reconocer una relación entre el gas de los pantanos y la vegetación en descomposición en el fondo de los pantanos. En 1808 Sir Humphrey Davy colectó el metano e inició la experimentación que puede considerarse como el principio de la investigación en este campo. En 1883-1884 Pasteur y Gayón concluyeron que la fermentación de estiércol en ausencia de aire, producía un gas que podía ser usado para la calefacción e iluminación. (Mandujano 1981).

En 1896 el biogás fue utilizado en el alumbrado de una calle en Exeter, Inglaterra, siendo esta su primera aplicación importante. En 1919-1920 Lord Lveagh construyó cinco biodigestores en diferentes localidades de Inglaterra para la producción de gas metano, los cuales consistían en cilindros metálicos con calefacción en su parte baja y una cámara de recolección en la parte alta.

En 1939 en el Instituto de Investigaciones de Nueva Delhi se diseñó una planta de gas de fácil manejo, en la cual, a partir de estiércol de vaca, obtuvieron gas y bioabono.

El trabajo hecho en la India continuó y se expandió, en 1961 la Gobar Gas Research Station, inició en Ajitmal, Etawah el diseño de plantas productoras de biogás y en 1971 publicó una gran variedad de diseños de plantas de biogás, éstas se construyeron en la India. (Pichardo 1980).

En la República Popular China, las construcciones de biodigestores se han realizado en gran escala, en 1972 se asoció la Academia de Ciencia de China y el Ministerio de Agricultura y Forestal de Szechwan; sus reportes indican que hay miles de plantas generadoras de gas en la República Popular China, basadas en el uso de aguas negras, y otros desechos, se calcula que para 1985 se tendrían 700000 biodigestores, en Szechwan han sido reportados 30000 biodigestores, en Korea, Tanzania, Uganda y Bangladesh, también se reporta la existencia de este tipo de instalaciones. (Monrroy, et al.; 1981).

Por otro lado, el proceso natural de fermentación anaerobia, es aplicado a la materia orgánica por el hombre, a mayor escala, en plantas de biogás. El proceso es llamado biometanización.

a) Planta de biogás

Por esto se entiende la serie completa de elementos necesarios y diseñados para la producción de biogás a partir de materia orgánica.

El corazón de una planta de biogás es el biorreactor, generador de metano. El flujo de sustrato de biomasa tiene que ser almacenado o pre-tratado antes de la biometanización. El flujo, de biogás producido y el efluente estabilizado del digestor de metano deben ser almacenados, como se muestra en la figura 6.

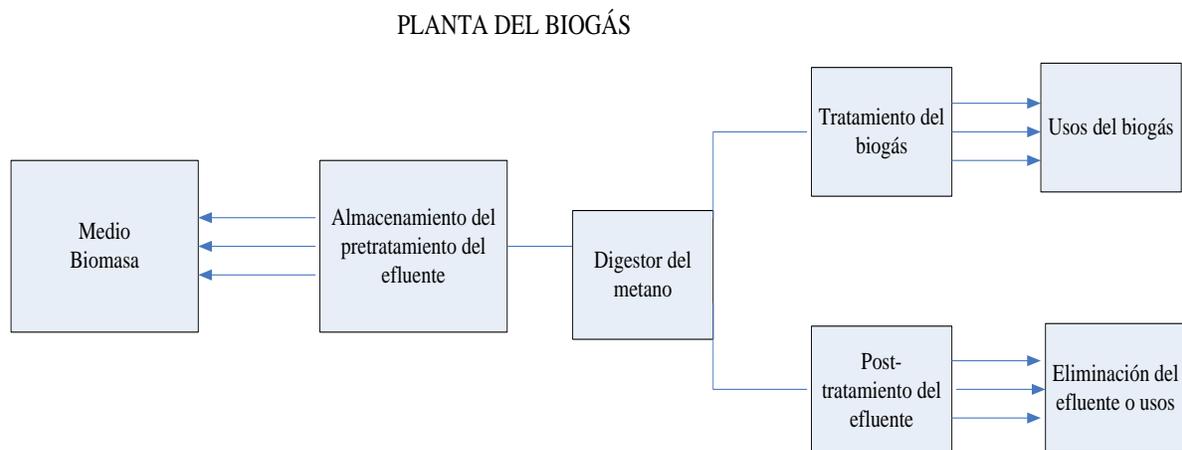


Figura 6: Proceso básico de una planta de biogás.

La alimentación o sustrato biomásico (más adelante se detallarán los conceptos relacionados con la biomasa) puede originarse a partir de distintas fuentes como:

- Desperdicios agrícolas: Abono animal y residuos.
- Desperdicios industriales: efluentes de proceso de la industria alimenticia u otras industrias.
- Sedimentos lodosos de plantas de tratamiento aeróbico de aguas residuales.
- Desperdicios domésticos después de mover minerales y componentes plásticos.

La degradación anaeróbica microbiana de esos sustratos toma lugar en el digestor o biorreactor. Varios tipos de biorreactores han sido diseñados como una adaptación para distintos tipos de sustratos. Este problema ha sido revisado extensamente por (Bergmann 1983). Un manual práctico acerca de "plantas de biogás en Europa" ha sido publicado por Demuynck 1984.

La digestión del sedimento es estabilizada y puede ser depositada en tierra para agricultura. Las propiedades fertilizantes de los residuos después de iniciar la digestión anaeróbica son discutidas por (Demuynck 1984).

#### b) Relleno Sanitario.

Es el nombre dado a los sitios donde los desperdicios domésticos son tirados, estos lugares pueden ser considerados como un digestor enorme por lotes, de metano en el cual el biogás es generado por la degradación espontánea microbiana de desechos sólidos domésticos e industriales.

El biogás producido en los rellenos sanitarios se recupera por medio de una red de hoyos que se perforan en el sitio. Estos hoyos contienen tubos que están perforados a lo largo en la parte baja porque el material de filtración es grueso.

### **2.2.2 El metano en la atmósfera.**

Es debido en parte a las actividades antropófagas que las actuales emisiones anuales de  $\text{CH}_4$  exceden los límites y así la capacidad de depuración atmosférica, lo que conduce a 1.2-1.9% de aumento al año en la concentración del metano en la atmósfera. Los efectos ambientales de tal acumulación incluyen el aumento de temperatura superficial de la tierra, ozono adicional ( $\text{O}_3$ ), y monóxido de carbono (CO), en la atmósfera que aún está limpia, reducción de radicales troposféricos de oxhidrilos (OH).

### 2.2.3 Composición del biogás

La encuesta sobre la composición del biogás se refiere principalmente a los usos finales de éste, resultado de la actividad humana. Por lo tanto, solamente se describen aquí las composiciones que han obtenido algunas plantas de biogás en Europa.

**PLANTAS DE BIOGÁS**

Especies moleculares	Wheatley 1979 (%)	Fox 1984 (%)	Hobson 1981(%)	Meynell 1983(%)
Metano CH <sub>4</sub>	52-95	60-70	60-70	45-65
Dióxido de carbono CO <sub>2</sub>	9-40	30-40	30-40	34-45
Acido sulfhídrico H <sub>2</sub> S	0.001-5.7	0.05-2	0.007-0.2	0.5-100 10-5
Hidrógeno H <sub>2</sub>	0.01-1.2	1	2	0-1
Nitrógeno N <sub>2</sub>	0.1-18		4	0-1
Oxígeno	0.02-6.5		0.001-1	0-1
Argon	0.001			
Monóxido de carbono CO	0.001-2.1			
Amonio NH <sub>3</sub>	Trazas			Trazas 5 10-5

Tabla 2: Composición del biogás.

Los gases que hay en mayor proporción son el metano CH<sub>4</sub> y dióxido de carbono CO<sub>2</sub>; son los más importantes para determinar el valor calorífico del biogás. La composición de metano en el biogás CH<sub>4</sub> y dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, se discuten más adelante. El objetivo de las plantas de biogás es homogenizar la composición del biogás en un tiempo y volumen dado.

### 2.2.4 Metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en el biogás.

La composición relativa de metano CH<sub>4</sub> y del dióxido de carbono en el biogás, se determina principalmente, primero por la naturaleza de la porción biodegradable de la biomasa y segundo por las condiciones fisicoquímicas en el biorreactor. La degradación microbiana anaerobia de la materia orgánica o metanogénesis produce metano CH<sub>4</sub> y

carbono inorgánico: en forma de una mezcla de bicarbonato  $\text{HCO}_3^-$  y ácido carbónico  $\text{H}_2\text{CO}_3$  y gases de dióxido de carbono.

- Influencia de la naturaleza de la porción biodegradable del sustrato de biomasa en la composición relativa del metano y dióxido de carbono en el biogás.

Como la metanogénesis es un proceso anaeróbico en todo el sistema, implica con el tiempo (sin la externa adición de algún oxidante como el oxígeno en el aire), el estado de oxidación de todo el sistema, debe permanecer constante para dar el valor correcto al sustrato biomásico o abastecer la alimentación de biomasa si fuese necesario.

Si estas condiciones se mantienen podemos fácilmente encontrar como resultado una composición con mayor cantidad de metano en el biogás y baja producción en carbono inorgánico en forma de bicarbonato  $\text{HCO}_3^-$  y ácido carbónico  $\text{H}_2\text{CO}_3$  en solución acuosa o dióxido de carbono gaseoso,  $\text{CO}_2$ .

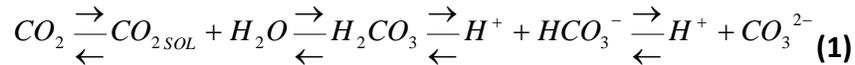
- Influencia de las condiciones fisicoquímicas; predominantes en la composición relativa del biogás con respecto a metano,  $\text{CH}_4$ , y dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$ .

La composición relativa del biogás en metano y dióxido de carbono, también depende de las condiciones fisicoquímicas predominantes, llamadas solubilidad de metano en agua y la porción de carbono inorgánico en forma de ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) o de  $\text{CO}_2$  y por otro lado el pH en cuanto a la alcalinidad, la cual puede afectar la porción de carbono inorgánico en forma de bicarbonatos  $\text{HCO}_3^-$ .

Como puede observarse en la tabla 3 (pág. 30) los valores de la constante de Henry a  $35^\circ\text{C}$  son respectivamente  $1.005 \times 10^{-3} \text{ mol}^{-1} \text{ atm}^{-1}$  para el metano, y  $2.34 \times 10^{-2} \text{ mol}^{-1} \text{ atm}^{-1}$  para el  $\text{CO}_2$ . Como consecuencia, de alguna fermentación a  $35^\circ\text{C}$ , en equilibrio con la fase biogás a 1 atm de presión consiste de 60% por volumen de metano y 40% por volumen de  $\text{CO}_2$ , puede contener por encima de 0.6mM ( $0.84 \text{ mg l}^{-1}$ )  $\text{CH}_4$  y 9.8mM ( $39.2 \text{ mg l}^{-1}$ )  $\text{CO}_2$  (valores en el equilibrio en agua pura). Las solubilidades en agua del metano y dióxido de carbono, son independientes del pH pero varían con la presión y temperatura.

Un incremento en la presión originan variación en ambos compuestos, con respecto a su solubilidad en agua, sin embargo; existe la diferencia entre sus constantes de Henry, debido al incremento de la solubilidad para el  $\text{CO}_2$  y el metano cuando están mezclados. Entonces hay un incremento en la presión que permite el enriquecimiento del metano en el biogás. Un incremento en la temperatura produce, una disminución en la solubilidad de ambos gases con respecto al agua.

El CO<sub>2</sub> en fase gaseosa, ácido carbónico y CO<sub>2</sub> en solución acuosa, CO<sub>2</sub> están en equilibrio con las formas disociadas de ácido carbónico, llamado bicarbonato HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y carbonato CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, a través de la reacción química 1. (Constant, et al.; 1981)



$$K_H = 2.34 \times 10^{-2} \text{ mol l}^{-1} \text{ H}_2\text{O atm}^{-1} \text{ (a } 35^\circ\text{C)}$$

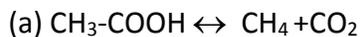
$$K = 3.4 \times 10^{-3}$$

$$K_1 = 7.6 \times 10^{-3} \text{ (a } 25^\circ\text{C)}$$

$$K_2 = 5.61 \times 10^{-11}$$

Entonces un cambio en el pH puede afectar este equilibrio. Disminuyendo el pH significa un incremento en la concentración del H<sup>+</sup> la cual desplaza el equilibrio entre las formas de carbono inorgánico hacia la izquierda con la liberación del CO<sub>2</sub> gaseoso y como resultado incrementar el pH en el otro lado significa un decremento en la concentración de H<sup>+</sup> la cual desplaza el equilibrio hacia la derecha resultando la solubilidad del CO<sub>2</sub> gaseoso, y un incremento en la concentración de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. (Constant, et al.; 1981).

Esto puede ser ilustrado por la biodegradación teórica de las especies acetato, en el metano a dos distintos pH. A un bajo pH, la especie acetato está presente en forma de ácido acético CH<sub>3</sub>-COOH, donde a alto pH (pH > 7), las especies acetato están presentes en forma aniónica CH<sub>3</sub>-COO<sup>-</sup> la reacción (2) muestra las dos formas:

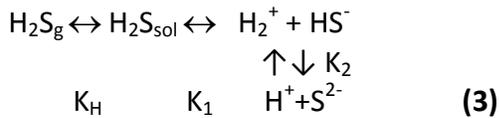


La reacción (2a) claramente muestra la degradación anaeróbica de la forma ácido acético CH<sub>3</sub>-COOH, en los productos una fase gaseosa equimolar en metano y dióxido de carbono, la reacción (2b) claramente muestra la degradación anaeróbica de la forma acetato CH<sub>3</sub>-COO en los productos una fase gas conteniendo solamente metano y no CO<sub>2</sub>.

### 2.2.5 Gases que se encuentran en menores proporciones en el biogás

Están presentes en pequeñas proporciones los sulfuros originados de la biodegradación de sulfuro orgánico en la alimentación mediante la bacteria fermentadora y por la reducción de aniones sulfato SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, por di-hidrogeno, H<sub>2</sub>, mediante la sulfato-

reducción bacteriana. Los aniones sulfato,  $SO_4^{2-}$  no son los únicos presentes en el sustrato, pero también se originan de agua diluida, las especies sulfuro se equilibran mediante varias formas, ácido sulfhídrico en la fase gas y  $H_2S_{sol}$  en fase acuosa, hidrosulfuro y sulfuro de acuerdo a la reacción (3):



$$K_H = 7.24 \times 10^{-2} \text{ mol l}^{-1} \text{ H}_2\text{O atm}^{-1} \text{ (a } 35^\circ\text{C)}$$

$$K_1 = 9.1 \times 10^{-8} \text{ (a } 18^\circ\text{C)}$$

$$K_2 = 1.1 \times 10^{-12}$$

Este equilibrio de la especie menor de sulfuro en el biogás encaja con el equilibrio de la mayor especie carbono y como resultado el biogás puede contener cantidades variables de ácido sulfhídrico.

El dihidrógeno,  $H_2$  es un producto final de la metabolismo de una bacteria fermentadora o de la producción obligada de hidrógeno de la bacteria acetogénica, la cual degrada ácidos grasos volátiles y no volátiles, alcoholes y aromáticos en acetato  $CH_3COO^-$ ,  $CO_2$  y  $H_2$ . Esto es un sustrato de la bacteria humoacetogénica, la cual genera ácido acético  $CH_3COOH$ , del  $CO_2$  y  $H_2$  para la bacteria reductora de sulfatos y para la bacteria hidrogenotrófica metanogénica. (Constant, et al.; 1981)

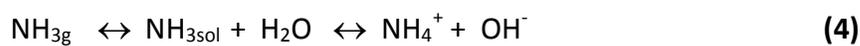
El  $O_2$  puede ser detectado en el biogás pero esto siempre en resulta pérdidas para el sistema. La bacteria facultativa anaeróbica usualmente consume algún  $O_2$  contenido en el aire, otros gases presentes en el aire no son consumidos por microorganismos. Esto explica porque el argón, puede ser detectado algunas veces. También esta es una de las razones de la presencia del  $O_2$  en el biogás.

La presencia de  $N_2$  en el biogás puede por la alimentación seguida por una oxido-reducción microbiana implicada entre  $NO_3^-$  ó  $SO_4^{2-}$ .

El  $H_2O$  contenida en el biogás depende de la temperatura a la cual es colectado el biogás; generalmente el biogás abandona el digestor de metano saturado con agua. El enfriamiento de biogás ocurre contra corriente en la tubería induciendo la condensación del vapor de  $H_2O$ .

El CO algunas veces es detectado en el biogás. El CO es un sustrato de alguna *methanobacterium* y entra el CO<sub>2</sub>, al ciclo de reducción por H<sub>2</sub>, en la forma -X-COOH. Esas reacciones se vuelven reversibles, el CO puede ser formado en el intermedio X-COOH y una vía afuera. Su presencia en el biogás entonces puede ser tomada como un indicador del proceso metanogénico.

La presencia de NH<sub>3</sub>, es el resultado final de dos procesos: Primero la mineralización microbiana del nitrógeno orgánico originada en la alimentación, y después el equilibrio fisicoquímico de la reducción inorgánica de las especies de nitrógeno presentadas en la mezcla fermentada en diferentes formas: NH<sub>3</sub> y NH<sub>4</sub><sup>+</sup> de acuerdo a la reacción 4, el equilibrio dependerá del pH:



$$K_H = 47.9 \text{ molgl}^{-1}\text{H}_2\text{O atm}^{-1} \quad K_D = 1.849 \times 10^{-5} \quad T=25^\circ\text{C}$$

Una alimentación con una alta relación biodegradable de carbono orgánico y nitrógeno biodegradable orgánico puede usualmente resultar en la movilización del nitrógeno inorgánico reducido preexistente, en los constituyentes orgánicos microbianos nitrogenados. Una alimentación con una baja relación de carbón orgánico biodegradable a nitrógeno orgánico biodegradable puede resultar lo contrario, la mineralización de nitrógeno orgánico. El almacenamiento de la alimentación bajo condiciones aeróbicas o bajo condiciones alcalinas puede resultar en pérdidas de nitrógeno inorgánico reducido. Todos estos fenómenos pueden influir en el contenido de amoníaco del biogás producido por el biorreactor.

Las aminas alifáticas simples son detectadas en biogás más frecuentemente por el previo almacenamiento aeróbico del sustrato alimentado (el almacenamiento puede ser corto) lo que también ocasiona un pH ligeramente alcalino. La putrescina NH<sub>2</sub>-(CH<sub>2</sub>)<sub>4</sub>-NH<sub>2</sub> y cadaverina NH<sub>2</sub>-(CH<sub>2</sub>)<sub>5</sub>-NH<sub>2</sub>, son algunas veces detectados en el biogás y se originan respectivamente de arginina y lisina en proteínas bajo condiciones de fermentación.

El biogás producido en reactores contiene trazas de orgánicos convirtiéndose a dos clases: aromáticos (incluyen halogenados aromático como lo es policlorobifenilos PCB) y halogenados de bajo peso molecular.

### 2.2.6 Homogeneidad en el biogás

En una mezcla de gases, las diferencias moleculares son sometidas a movimientos Brownianos, en la teoría esas mezclas son homogéneas. En periodos largos de almacenamiento, se observan sedimentos de gases pesados. Aunque esta separación es limitada ya que generalmente la mezcla de gases es almacenada por tan solo una semana. En conclusión el biogás puede ser considerado generalmente como una mezcla homogénea de varios componentes.

### 2.2.7 Biogás, solubilidad en agua

La solubilidad del gas es constante; es la relación de la concentración de gas en la solución, con respecto a la concentración del gas. De acuerdo a las constantes de Henry, la cantidad del gas A que se disuelve por un volumen dado de un solvente a temperatura constante y es directamente proporcional a la presión del gas que este en equilibrio. Constantes de Henry son escritas:

$$[A]_{liq} = K_H P_A \quad T = \text{constantes}$$
$$[A] \text{ (mol}_g\text{l}^{-1}) \quad P_A \text{ (atm)} \quad K_H \text{ (mol}_g\text{l}^{-1}\text{H}_2\text{O atm}^{-1}) \quad (5)$$

$K_H$  es la constante de Henry para un gas, de este modo es numéricamente igual a la concentración del gas disuelto en un solvente en equilibrio el gas con una presión parcial de 1atm. Las constantes de Henry, son dadas en la tabla 3, para el aire y los principales componentes del biogás en equilibrio con agua y consumado el volumen disuelto a diferentes temperaturas y a 1 atmósfera.

### 2.2.8 Densidad del biogás.

La densidad real de un gas depende de estos componentes y de su concentración relativa. La densidad del biogás, es a 1 atm y 0 °C pueden ser calculados por estas ecuaciones. (Constant, et al.; 1981)

$$dg = Pg/Pa \quad (6)$$

dg= densidad del gas

Pg= gravedad especifica del gas( $gl^{-1}$ )

Pa= gravedad especifica del aire ( $gl^{-1}$ )

$$Pg = \mu g / 22.4 \quad (7)$$

$\mu g$ = Peso molecular del gas ( $gmol^{-1}$ )

22.4= Volumen molar del gas ( $gmol^{-1}$ )

$$\mu g = \sum_i^{Nc} X_i (12iC + 1iH + 16iO + 14iN + 32is) \quad (8)$$

Nc= Número total de componentes del biogás

Xi= Concentración (% en volumen) de cada componente

i<sup>C</sup>i<sup>H</sup>i<sup>O</sup>i<sup>N</sup>i<sup>S</sup>= Composición química en cada componente.

	T	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Aire	O <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
K <sub>H</sub> (mol <sub>g</sub> l <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O atm <sup>-1</sup> )	20°C	7.93 10 <sup>-4</sup>	6.78 10 <sup>-4</sup>	7.77 10 <sup>-4</sup>	1.36 10 <sup>-3</sup>	1.45 10 <sup>-3</sup>	3.84 10 <sup>-2</sup>	0.113
	25°C	7.17 10 <sup>-4</sup>	5.85 10 <sup>-4</sup>	7.03 10 <sup>-4</sup>	1.16 10 <sup>-3</sup>	1.23 10 <sup>-3</sup>	3.11 10 <sup>-2</sup>	9.33 1 10 <sup>-2</sup>
	35°C	6.59 10 <sup>-4</sup>	4.96 10 <sup>-4</sup>	5.95 10 <sup>-4</sup>	9.70 10 <sup>-4</sup>	1.005 10 <sup>-3</sup>	2.34 10 <sup>-2</sup>	7.24 10 <sup>-2</sup>
ml <sub>g</sub> l <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O atm <sup>-1</sup>	20°C	18.20	15.42	18.70	31.03	33.80	878	2582
	25°C	17.54	14.32	17.20	28.44	30.00	760	2282
	35°C	16.66	12.54	15.04	24.52	25.40	592	1831

Tabla 3: Constantes de Henry y volúmenes disueltos de componentes de biogás en agua

Las densidades del biogás con diferentes cantidades de metano CH<sub>4</sub> están en la siguiente tabla 4.

Tabla 4: Densidad de metano y biogases de varias composiciones

CH <sub>4</sub> (%)	50	60	80	90	100
dg*	1.040	0.942	0.745	0.652	0.555

(Constant, et al.; 1981)

dg\*: densidad relativa del aire ec. (6)

Esto significa que el biogás es más ligero que el aire.

### 2.2.9 Punto crítico del biogás.

El punto crítico es el estado termodinámico en el cual las fases líquida y gaseosa de una sustancia coexisten en equilibrio. Puntos críticos son mostrados en la tabla 5 para los principales componentes del biogás.

Como se indica, el punto crítico del metano es -82.5°C y 46.7 bar. Esto significa que el metano no puede ser licuado a temperaturas superiores a -82.5°C. Esta es la mayor limitación para el almacenamiento del biogás y consecutivamente para su valorización.

### 2.2.10 Valor calorífico mínimo y máximo del biogás.

El valor calorífico mínimo representa la energía gastada durante la combustión completa de una unidad de combustible a 1 atm y 0°C y suponiendo que el agua producida permanece en estado de vapor. El valor calorífico máximo representa la energía gastada durante la completa combustión de una unidad de combustible a 1 atm y 0°C y suponiendo que el agua producida se condensa a estado líquido.

El valor calorífico mínimo del biogás es determinado por el contenido de metano. Los valores caloríficos mínimos del biogás y varios combustibles son comparados en la tabla 6.

Esto permite las comparaciones volumétricas mostradas en la tabla 7, pero debe notarse que estos valores están basados en el valor mínimo calorífico y no toman en consideración la eficiencia aplicada, la cual varía para cada combustible.

Tabla 5: Puntos críticos

	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	O <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
Temperatura (°C)	-239.9	-147.1	-132.4	-118.57	-82.5	31	100.4
Presión (bar)	13.1	34.2	113.9	50.8	46.7	73.85	90.1

Tabla 6: Valores caloríficos mínimos del biogás y algunos otros combustibles

Combustible	MJ kg <sup>-1</sup>	MJ m <sup>-3</sup>
Metano	50.0	35.9
Biogás purificado (90%)	45.0	32.3
Biogás (60%)	30.0	21.5
Butano	45.7	118.5
Propano	46.4	90.9
Metanol	19.9	15.9 10 <sup>3</sup>
Etanol	26.9	21.4 10 <sup>3</sup>
Gasolina	45.0	33.3 10 <sup>3</sup>
Diesel	42.1	34.5 10 <sup>3</sup>

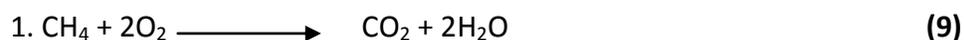
### 2.2.11 Relación aire-combustible

La relación aire-combustible representa estequiometricamente el volumen teórico del aire el cual es necesario para completar la combustión de 1 m<sup>3</sup> de combustible a condiciones estándar (0°C, 1 atm). La relación aire-biogás estequiometrico puede ser obtenido de la ecuación aire-metano.

Tabla 7: Equivalencias de volúmenes entre biogás y otros combustibles

Biogás 1 m <sup>3</sup>	Butano (m <sup>3</sup> )	Propano (m <sup>3</sup> )	Metanol (L)	Etanol (L)	Gasolina (L)	Diesel (L)
CH <sub>4</sub> al 60%	0.18	0.24	1.35	1.01	0.65	0.62
CH <sub>4</sub> purificado al 90%	0.27	0.36	2.03	1.51	0.97	0.94

Tomando en cuenta el O<sub>2</sub>, contenido del aire y CO<sub>2</sub>, concentración de biogás:



Las ecuaciones anteriores nos dan el conteo estequiométrico del aire necesario para la combustión de 1m<sup>3</sup> de metano. Para un biogás conteniendo una fracción de metano <10, la relación aire-combustible estequiométrico puede ser aproximadamente 9.52. La relación aire-combustible estequiométrica es mostradas para diversos gases en la tabla 8a.

Combustible	(m <sup>3</sup> <sub>aire</sub> m <sup>-3</sup> <sub>gas</sub> )
Metano	9.52
Biogás CH <sub>4</sub> al (60%)	5.71
Biogás CH <sub>4</sub> al (90%)	8.57
Propano	23.78
Butano	30.97

Tabla 8a: Relación estequiométrica aire-combustible para biogás y otros combustibles

Debido a la heterogeneidad de mezclas aire-combustible, usadas en la práctica, estas tienen que ser superiores que las cantidades de aire para abatir la formación de gas no combustible. La composición de una mezcla aire-combustible puede ser expresada como la relación equivalente,  $\phi$  esto representa la relación entre el combustible real con aire y la unidad estequiométrica en ambas unidades de peso. (Constant, et al.; 1981)

$$\phi = \frac{(m_c / m_a)_{real}}{(m_c / m_a)_{estequiometrico}}$$

$m_c$  = Combustible másico

$m_a$  = Aire másico

Si la mezcla tiene un  $\phi < 1$  es escaso en combustible, si  $\phi > 1$  es rico en combustible.

### 2.2.12 Temperatura mínima de auto-ignición.

La temperatura mínima a la cual una mezcla aire-combustible puede tener su ignición, llamada temperatura mínima de auto-ignición (MAIT) (por sus siglas en ingles), es un parámetro muy usado como límite de seguridad y como parámetro corriente para la ingeniería de combustión.

Sin embargo, MAIT no es una propiedad fundamental de un combustible ya que su valor depende de la relación aire-combustible, la presión y las vallas de mediciones. La mínima temperatura de auto-ignición de mezclas aire-metano varía con la estequiometría, alcanzando un mínimo cerca de 7% combustible en la mezcla aire-combustible. La tabla 8b presenta datos sobre mínimas temperaturas de auto ignición de metano,  $CH_4$ , por una superficie caliente a 1 atm. La mínima temperatura de auto-ignición de metano es la más alta de todos los combustibles comunes y aun incrementa en presencia de  $CO_2$ . La auto-ignición ocurre cuando hay un cierto retraso, el cual depende de la temperatura y la presión inicial. Este retraso de auto-ignición es de gran interés para la utilización del combustible en una maquina de diesel.

### 2.2.13 Velocidad de la flama.

La velocidad de la flama es la velocidad de la zona de reacción, con respecto al gas consumido. Las consideraciones están aquí limitadas a condiciones laminares.

La velocidad de la flama depende de algunos factores. La naturaleza del combustible es determinante. La Tabla 9 da el valor de varias velocidades medidas por estequiometría aire-combustible a 25°C.

Se ha notado que los valores de velocidad para un combustible dado pueden diferir ampliamente de acuerdo al método experimental usado. Esto está ilustrado en la tabla 10 por las diferentes velocidades de flama obtenidas para mezclas aire-metano.

Los valores antes definidos son obtenidos en condiciones estándar (25 °C, 1 atm, Vo.To). La temperatura inicial más alta (Ti), tiende a incrementar velocidades (Vi), según la expresión:

$$V_i = V_o \frac{T_i}{T_o}$$

Para bajas flamas, como es el caso del metano CH<sub>4</sub> la presión resultante del biorreactor, tiende a incrementar bajas velocidades. Las condiciones aerodinámicas tienen también un efecto sobre la velocidad de flama el cual es frágilmente incrementado por turbulencia.

Al diluir la mezcla inicial con un gas inerte, como el de nitrógeno N<sub>2</sub>, o CO<sub>2</sub>, la velocidad de flama decrece en cerca de 25cm/s para un biogás compuesto por 60% metano y 40% de CO<sub>2</sub>.

La velocidad de flama es también dependiente de la relación aire-combustible, ya que la velocidad de flama alcanza su máximo valor para una mezcla ligeramente rica en aire.

#### **2.2.14 Limites de flamabilidad.**

La velocidad de flama decrece de su máximo valor cuando la mezcla de combustible llega a estar más inclinada o igual a cero para una relación aire-combustible, la cual es llamada la baja flamabilidad limite. La misma decrece en velocidad de flama cuando la mezcla de combustible que llega a ser más rica en aire. Arriba de la alta flamabilidad limite esta corresponde a velocidad cero de flama.

Tabla 8b: Comparación determinada experimentalmente de temperaturas mínimas auto-ignición (MAIT) de metano en aire.

MAIT (°C)	Recipiente de ignición	Referencia y Fecha
606-650	0.24 dm <sup>3</sup> cilindro de vidrio	Freyer y Meyer (1893)
675	0.275dm <sup>3</sup> cilindro de vidrio	Taffenel y LeFloch (1913)
632	0.44 dm <sup>3</sup> cilindro de cuarzo	Taylor y Wheeler (1931)
656	Tubería de cerámica volumen no conocido	Dixon (1935)
748	Tubería de acero, diámetro 10mm, longitud 165 mm	Bunte y Bloch (1935)
673	0.190 dm <sup>3</sup> cilindro de silica	Townend y Chamberlain (1936)
659	0.2 dm <sup>3</sup> Esfera de acero que no se mancha	Fenstermarker (1982)
601	0.8 dm <sup>3</sup> Esfera de acero que no se mancha, acido bórico sucio	Robinson y Smith (1984)

Tabla 9. Velocidades de flama para el metano y otros combustibles

Combustible	Velocidad de flama (v,cm s <sup>-1</sup> )
Metano (CH <sub>4</sub> )	43.4
Sulfhídrico de hidrogeno (H <sub>2</sub> S)	39.1
Propano(C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	45.6
Butano(C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	44.8
Di hidrógeno(H <sub>2</sub> )	170
Etanol(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH)	48.4
Metanol(CH <sub>3</sub> OH)	48
Gasolina	40

Tabla10: Valores de velocidad de flama, como influencia para el método experimental por una estequiometria de una mezcla aire-metano.

Método de combustión	Velocidad de flama (v,cm s <sup>-1</sup> )
Burneo rectangular	35
Burneo cilíndrico	44
Bunsen	34 a 35
Bomba espiral	36

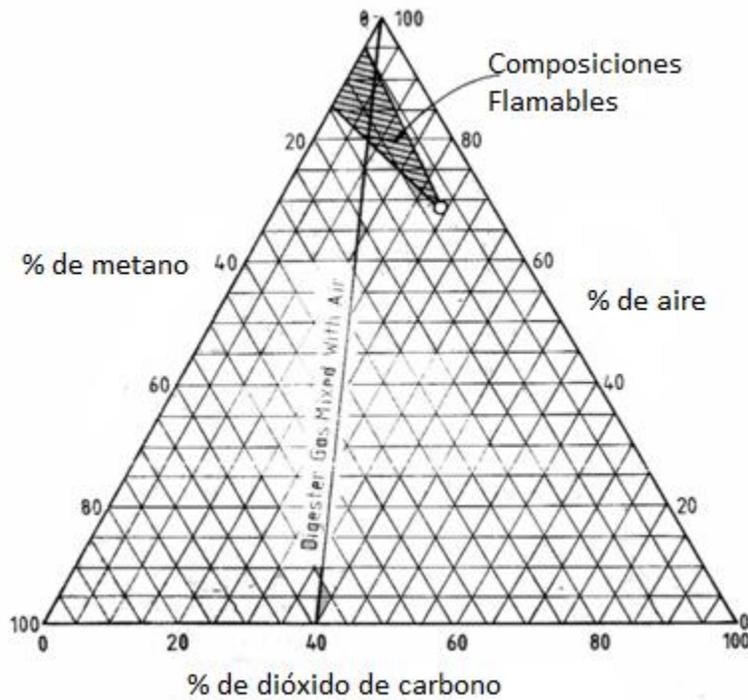


Figura 7: Límites de inflamabilidad (Constant, et al.; 1981)

La inflamabilidad del sistema de aire del metano y  $\text{CO}_2$  y desde el sistema aire-biogás está representada en la figura 7 cada punto en el diagrama triangular ha obtenido coordenadas para cada uno de sus constituyentes por el intercepto de la línea paralela de un punto a el siguiente, esto en dirección a las agujas del reloj con el eje de los componentes de la mezcla. El punto cero se refiere a una mezcla de gas del 24% de  $\text{CO}_2$ , 68% de aire y 8% de  $\text{CH}_4$ .

Mezclas de metano, en aire tienen límites de inflamabilidad de 5.3% y 14% de metano. Estos 2 valores límite sobre el eje del volumen por ciento del metano de la base del triángulo. El punto O representa el biogás inflamable, mezclada con aire y para la caracterización en  $\text{CO}_2$  es máximo. El triángulo formado por la base definida y punto O representa la zona de composiciones inflamables del metano, dióxido de carbono y aires. Es por eso que, un biogás con más de 75% de  $\text{CO}_2$  nunca arderá.

La línea exacta entre el 40% de  $\text{CO}_2$  y la línea superior más alta del diagrama es la de la mezcla "perfecta", la línea que corta la gráfica, es la de la concentración constante del biogás del 60% de metano ( $\text{CH}_4$ ) y 40% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). La mezcla de biogás con aire es inflamable entre 8.83 y 20% de biogás.

El dato anterior, es de referencia, ya que es el comportamiento perfecto en la mezcla de gases. En práctica, sin embargo, el aire no es siempre una mezcla uniforme con el gas así, que el volumen de la flama del gas puede contener una composición bien determinada y pensar en la no flamabilidad.

### **2.2.15 Toxicidad y corrosividad.**

El único componente tóxico del biogás es el  $H_2S$  y puede ser identificado por su olor característico a huevo podrido, aun a bajas concentraciones. Una larga exposición a este puede bloquear el sentido del olfato, hecho que puede hacer creer en la dispersión del gas y exponerse aun más con posibles consecuencias.

Si bien el  $H_2S$  reacciona fácilmente con algunos metales (principalmente con las aleaciones de cobre) en combinación con agua se incrementa la actividad corrosiva, que depende de la concentración del  $H_2S$  y del pH de la solución. Los daños que puede ocasionar esta solución van desde el desprendimiento local de capas de material superficial hasta es SSC (Sulfide Stress Cracking) pasando por fracturas y ampollas (blisters). De igual forma el  $CO_2$  en combinación con agua forma soluciones (ácido carbónico) altamente corrosivas, aun mas que las formadas con  $H_2S$  dependen de la presión parcial del  $CO_2$  y de la temperatura. Los daños ocasionados por el ácido carbónico pueden ser un ataque puntual, un adelgazamiento uniforme de a superficie o la formación de una capa semiprotectora de carbonato de hierro, ( $FeCO_3$ ) a altas concentraciones de  $CO_2$  y altas temperaturas. (Constant, et al.; 1981)

### **2.2.16 Purificación del biogás**

Anteriormente se describieron las principales características del biogás de entre ellas destacan los efectos adversos que puede ocasionar el  $CO_2$ ,  $H_2S$  y el  $H_2O$  en el manejo y aplicación directa del biogás. Entonces es obvio que la reducción o eliminación total de estos tres constituyentes hará que las cualidades del biogás como combustible sustituto y renovable sea más atractivo.

Ahora, se abordan los diferentes procesos empleados para remover del biogás aquellos elementos, selectiva o simultáneamente. Aunque, cada uno de ellos tienen sus respectivas ventajas y desventajas, la elección de cualquier método estará supeditada al uso final de biogás así, como en todo, a cuestiones económicas.

El biogás puede ser tratado con seis tipos de procesos físicos, químicos, biológicos y mixtos:

- Absorción física y química
- Adsorción física
- Separación por medio de membranas
- Condensación
- Remoción biológica

### Absorción

La absorción es un proceso de separación donde uno o más elementos (solutos) se transfieren desde su fase gaseosa hasta un solvente. La absorción puede ser de tres tipos:

1. Física con solvente líquido. En este caso el elemento gaseoso a remover es disuelto en el solvente, con la posibilidad de ser separados posteriormente para que el solvente sea reciclado al proceso, con su consecuente consumo de energía.
2. Química con solvente líquido. En este caso para la fijación del soluto en el solvente es necesario que el soluto reaccione químicamente con el solvente. Debido a lo anterior es difícil por los altos requerimientos técnicos y económicos, recuperar los solventes.
3. Química con solventes. En la mayoría de estos casos la desorción no puede ser posible, por lo que el solvente debe ser abundante y barato. Además la elección de este método debe estar muy bien justificada, ya que se generan productos secundarios peligrosos.

La mayor parte de las operaciones de absorción se llevan a cabo en procesos con flujo a contracorriente y verticalmente, en columnas cilíndricas, para facilitar el contacto solvente-soluto. En ocasiones, la columna es rellena con algún empaque sólido e inerte para aumentar el área de contacto, e incluso las corrientes de soluto y solvente son introducidas a la columna, a presiones mayores a la atmosférica ya que, como se vio anteriormente, eso incrementa la solubilidad del soluto en solvente.

## Adsorción

La adsorción consiste en la transferencia de un material desde una fase (gaseosa o líquida) a una superficie sólida (adsorbente), la capa de materia adherida a la superficie es conocida como adsorbato. La cantidad de adsorbato que se puede colectar en una unidad de área superficial es pequeña por lo que el adsorbente deberá tener una relación superficie de contacto-volumen muy elevada.

La adherencia del adsorbato al adsorbente se debe a fuerzas intermoleculares que dependiendo del tipo de enlace definirán si la adsorción es física o química. La adsorción física es cuando la adherencia se lleva a cabo por medio de fuerza de Van der Waals, durante la cual se libera una cantidad de calor de magnitud aproximada al la de condensación. La naturaleza de las fuerzas de adsorción física, es tal que se acumulan capas múltiples de adsorbato sobre la superficie del adsorbente.

La adsorción química se caracteriza por una compartición de electrones entre el adsorbato y el adsorbente que resulta en un desprendimiento de calor casi igual al de reacción. A causa de la compartición de electrones, el adsorbato forma una sola capa sobre el adsorbente.

## Separación por medio de membranas

En este proceso se promueve la separación de los gases que componen una mezcla por medio de membranas (generalmente son polímeros porosos o fibras) que tienen la capacidad de transportar selectivamente algunos componentes a través de la membrana, dependiendo del tipo, forma, porosidad, material y tamaño de la misma, así como de las presiones parciales y de la permeabilidad de cada componente de la mezcla. La permeabilidad a de depender del tipo de membrana y del elemento a transportar.

## Métodos biológicos

Este mecanismo es empleado, por lo general, para remover el  $H_2S$  del biogás. Existen gran número de métodos físico-químicos para remover el  $H_2S$  del gas natural. Sin embargo ellos traen consigo grandes inversiones, altas demandas energéticas y generan grandes cantidades de desechos peligrosos, que a diferencia de algunos otros residuos, no se puede obtener algún beneficio de ellos. En contraste, existe una amplia variedad de bacterias capaces de oxidar el  $H_2S$  económicamente y sin generar desechos peligrosos. Las bacterias precipitan el  $H_2S$  en azufre elemental y otros compuestos menos dañinos.

## Condensación

La condensación, como se sabe es el paso de la fase vapor a fase líquida de un determinado elemento, por la disminución de su temperatura por debajo de la saturación, ya sea enfriándola a presión constante, expandiéndola isoentálpicamente, etc. La cantidad de agua (que es el único elemento que se puede evacuar económicamente del biogás por condensación) a extraer va a depender, entonces, del proceso empleado, así como de las condiciones de presión y temperatura al inicio y al final del proceso.

## Remoción del $H_2O_{vap}$

La presencia del  $H_2O_{VAP}$  en el biogás se debe, principalmente, al medio acuoso donde se realiza la digestión anaeróbica, y a las reacciones exotérmicas que en ella ocurren. El agua puede ser eliminada por los siguientes procesos.

## Condensación del $H_2O_{VAP}$

### Trampas de condensación.

En este proceso se aprovecha el efecto Joule-Thomson, al pasar el biogás por una cámara de expansión colocada en las líneas de colección y distribución del biogás. Al disminuir la temperatura el  $H_2O_{VAP}$  se condensa y es colectada en la cámara para posteriormente ser drenada. La misma línea de colección del biogás puede inducir la condensación del  $H_2O_{VAP}$  en puntos bajos de las líneas, si éstas se encuentran a temperaturas inferiores a la de rocío o de saturación del biogás, por lo que una válvula de drenado en esos puntos será suficiente.

La capacidad del biogás para retener el  $H_2O_{VAP}$  aumenta conforme incrementa la temperatura, pero igual que el aire y el gas natural esa capacidad disminuye al aumentar la presión. Por tanto, al comprimir un volumen de biogás saturado habrá un excedente de agua en el volumen final, en ese momento sobrecalentada debido al incremento de temperatura. Si al volumen final le sigue una etapa de enfriamiento hasta la temperatura inicial de saturación, la cantidad de agua excedente para ese volumen se condensará (exactamente como ocurre en la compresión multietapas con inter y pos enfriadores). Cuando la temperatura de saturación del biogás es alta (<30 C) la compresión no es necesaria, bastando solo un proceso de enfriamiento.

#### Adsorción del $H_2O_{VAP}$

Los adsorbentes mayormente empleados para la deshidratación del biogás son alúmina, carbón activado, bauxita, sales de sílica y silicatos (tamices o cribas moleculares).

En su forma más simple, el sistema de deshidratación consiste de dos recipientes cilíndricos y paralelos conteniendo los adsorbentes (granulares o porosos) junto con el equipo necesario para su regeneración. Así, cuando el adsorbente en turno se sature de agua, la segunda columna de adsorbente ya se encuentra regenerada y lista para relevar a la primera, teniéndose así un sistema de deshidratación continua. Este proceso ofrece temperatura de rocío extremadamente bajas, son simples en operación y diseño, capaces de adaptarse a cualquier flujo de biogás, pero los costos de inversión y mantenimiento son altos.

#### Absorción del $H_2O_{VAP}$

La absorción puede ser tanto física como química. En la primera los solventes más usados son los glicoles etílicos, dietílicos, trietílicos y el tetraetílico, o soluciones concentradas de litio o sodio, mientras que la cal viva es el solvente más usado en la absorción química del agua.

Existen una amplia variedad de dispositivos para incrementar el contacto entre el agua y el solvente, como puede ser una columna con aspersores columnas empacadas, columnas con deflectores, etc.

Debido a la alta capacidad de absorción de los solventes estos sistemas pueden manejar altos volúmenes de gas a costos relativamente bajos. Sin embargo, como ya se ha mencionado, al usar solventes sólidos, se pueden generar residuos tóxicos, de los que hay que preocuparse por su disposición final.

#### Remoción del CO<sub>2</sub>

El porcentaje de CO<sub>2</sub> presente en el biogás va a depender de múltiples factores como las características del influente a digerir (relación de C:N, principalmente) el tipo de digester empleado, la estabilidad del digester condiciones de operación etc. Por ejemplo se sabe que la solubilidad del CO<sub>2</sub> en agua aumenta cuando se incrementa la presión, de modo que si se recircula el biogás producido al substrato en digestión, se podrá obtener un biogás más rico en CH<sub>4</sub> que el primero. De igual forma se han estado probando digestores que operan a presiones de entre 1 y 2 bar obteniéndose cantidades de biogás ligeramente menores pero muy enriquecidas de CH<sub>4</sub>. Para el caso en que el CO<sub>2</sub> deba reducirse o eliminarse se puede emplear en otros procesos. (Constant, et al.; 1981)

#### **2.2.17 Antecedentes de la utilización del biogás.**

La descomposición anaeróbica es uno de los pocos procesos naturales que no se ha explotado completamente. Pasteur propuso en cierta ocasión la posibilidad de producir metano a partir de estiércol de animal. Los chinos utilizaban desde hace décadas lagunas cubiertas para suministrar combustible de metano a las comunidades y fábricas. No obstante, el primer intento por construir un digester con el fin de obtener metano de desechos orgánicos, parece que se produjo en Bombay, India, en 1900.

En esa época, las plantas de aguas negras comenzaron a digerir los sedimentos de alcantarillado para mejorar su calidad. El éxito de esas plantas hizo que se iniciara una gran cantidad de experimentos en pequeña escala durante los años 1920 y 1930. Muchos de estos experimentos son resumidos en *Acharya in preparation of Fuel Gas and Manure by Anaerobic Fermentation of Organic Materials. Icar Research Series No. 15, Nueva Delhy, India, Indian Council of Agricultural Research, 1952.*

Durante la segunda guerra mundial, la escasez de combustible en Alemania obligó a que se desarrollaran plantas de metano en zonas rurales, donde fue utilizado el biogás

para el funcionamiento de tractores. Esta idea se extendió por toda Europa Occidental, pero se apagó cuando volvió a disponerse de combustibles fósiles. (Pichardo 1980)

Actualmente, las investigaciones sobre digestores y biogás se centran principalmente en la India. El hecho de que se haya dado mayor impulso en la India, corresponde a la necesidad apremiante de ese país de desarrollo, de elevar el nivel de vida de sus campesinos pobres, los campesinos hindúes utilizaron tradicionalmente "Boñigas de vaca" como combustible, aunque ese estiércol proporciona suficiente calor para la calefacción y la cocina, cuando se quema tiene dos desventajas: el estiércol produce un humo muy desagradable, que hace llorar y contamina la atmósfera. Por otra parte, al utilizar el estiércol de esta forma no queda un residuo que se pueda utilizar como fertilizante para la tierra. Privar de fertilizante al suelo repercutirá en una gran escasez de alimentos.

Esas dos desventajas se superan cuando se fermenta el estiércol en un digestor, no produce humo y los sedimentos son buenos fertilizantes.

En la India, como en cualquier país subdesarrollado, se considera que el gas metano es el segundo subproducto de importancia.

En México, el Instituto de Investigaciones Eléctricas mucho ha contribuido. Por su parte, el Ing. Alfonso Félix Almada ha desarrollado la parte relacionada con la utilización del biogás.

En el Instituto de Investigaciones Eléctricas en Morelos, se tienen operando normalmente estufas domésticas, lámparas de capuchón, un refrigerador de absorción, una planta eléctrica de un KW movida por un motor de gasolina de 4 H.P. , y una planta de 16 KW accionada por un motor industrial VW.

Los campesinos del país pueden conseguir su autosuficiencia, ecológica, produciendo combustible, y a su vez, el fertilizante que necesiten, mediante el empleo de una cámara de digestión para la transformación de los desechos orgánicos disponibles en la región. La dependencia total de combustibles convencionales sobre todo en zonas rurales, tiene probabilidad de convertirse en un obstáculo importante en el futuro, ya que el agotamiento de las reservas y las tecnologías especializadas determinarán la elevación de los costos de los combustibles fósiles y nucleares.(Manilla 2004)

### 2.2.18 Utilización del biogás

El biogás tiene dos formas de utilización, en la primera es utilizado directamente como sale de la cámara de digestión. Se inyecta a los quemadores como: estufas, calentadores de agua, lámparas de iluminación, para calderas, etc.

En la segunda forma es utilizado como combustible en máquinas térmicas. Esto implica depurar un poco la mezcla, es decir desprender las impurezas que contiene como son:

- Bióxido de carbono
- Ácido sulfhídrico
- Vapor de agua

Por lo tanto, deben analizarse técnicas de purificación, determinar su costeabilidad, ya que uno de los objetivos es generar el biogás al más bajo costo.

## 2.3 Biomasa

La biomasa es una sustancia orgánica renovable de origen animal o vegetal, era la fuente energética más importante para la humanidad y en ella se basaba la actividad manufacturera hasta el inicio de la revolución industrial. Con el uso masivo de combustibles fósiles el aprovechamiento energético de la biomasa fue disminuyendo progresivamente y en la actualidad presenta en el mundo un reparto muy desigual como fuente de energía primaria. Mientras que en los países desarrollados, es la energía renovable más extendida y que más se está potenciando, en multitud de países en vías de desarrollo es la principal fuente de energía primaria lo que provoca, en muchos casos, problemas medioambientales como la deforestación, desertización, reducción de la biodiversidad, etc.

No obstante, en los últimos años el panorama energético mundial ha variado notablemente. El elevado costo de los combustibles fósiles y los avances técnicos que han posibilitado la aparición de sistemas de aprovechamiento energético de la biomasa cada vez más eficientes, fiables y limpios, han causado que esta fuente de energía renovable se empiece a considerar por las industrias como una alternativa, total o parcial, a los combustibles fósiles.

La energía de la biomasa proviene en última instancia del sol. Mediante la fotosíntesis el reino vegetal absorbe y almacena una parte de la energía solar que llega a la tierra; las células vegetales utilizan la radiación solar para formar sustancias orgánicas a partir de sustancias simples y del CO<sub>2</sub> presente en el aire. El reino animal incorpora, transforma y modifica dicha energía. En este proceso de transformación de la materia orgánica se generan subproductos que no tienen valor para la cadena nutritiva o que no sirven para la fabricación de productos de mercado, pero que pueden utilizarse como combustible en diferentes aprovechamientos energéticos.

### **2.3.1 La biomasa en el contexto de la unión Europea**

De todas las fuentes de energía renovables, la biomasa es la más importante en el conjunto de la Unión Europea. Si se tiene en cuenta la producción energética con renovables en el año 1995 (72.876 ktep), la energía de la biomasa representó aproximadamente un 55% (40.081 ktep) frente a las demás fuentes de este tipo. Le siguen en orden de importancia la energía hidráulica (24.950 ktep) y la geotérmica (2.518 ktep)

Es en el sector doméstico donde más se utiliza la biomasa, principalmente en hogares y pequeñas calderas. Las aplicaciones industriales por lo general contribuyen en menor medida a este consumo de combustibles biomásicos.

Si se tienen en cuenta las cantidades de biomasa consumidas por los países de la Unión Europea, Francia es el país que registra el mayor consumo, superior a 9 millones de toneladas equivalentes de petróleo (tep). El segundo puesto lo ocupa Suecia (6,5 millones de tep) y le sigue Finlandia con 5 Mtep. En estos dos países el consumo de biomasa está más extendido a escala industrial dado el gran número de empresas de transformación de la madera y de fabricación de papel que allí existen.

Nuestro país sigue la tendencia general de los países europeos, es decir, mayor consumo de biomasa en el ámbito doméstico que en el sector industrial.

Existen una serie de factores que condicionan el consumo de biomasa en los países europeos y que hacen que éste varíe de unos a otros, tanto cuantitativamente como en el aprovechamiento de la energía final. Estos factores se pueden dividir en tres grupos:

- ◆ Factores geográficos: Inciden directamente sobre las características climáticas del país condicionando, por tanto, las necesidades térmicas que se pueden cubrir con combustibles biomásicos.
- ◆ Factores energéticos: Dependiendo de los precios y características del mercado de la energía en cada momento, se ha de decidir si es o no rentable el aprovechamiento de la biomasa como alternativa energética en sus diversas aplicaciones.
- ◆ Disponibilidad del recurso: Hace referencia a la posibilidad de acceso al recurso y la garantía de su existencia. Estos factores son los más importantes ya que inciden directamente tanto en el consumo energético de biomasa como en sus otras posibles aplicaciones.

En cuanto a las perspectivas del uso de los combustibles biomásicos en Europa hay que destacar que además de las ventajas energéticas que supone, el desarrollo de sector puede tener unas repercusiones muy favorables en otros campos. El aspecto medioambiental es uno de los más importantes. La reducción de emisiones contaminantes ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_2$ ) a la atmósfera es uno de los objetivos primordiales de la Unión Europea. Por otra parte, el aprovechamiento energético de los residuos forestales puede contribuir a reducir los costes de la limpieza de los bosques.

La utilización de los cultivos energéticos también cuenta con un gran potencial de desarrollo en determinadas regiones de Europa al igual que el aprovechamiento energético del biogás generado en la digestión anaerobia de los residuos ganaderos y los lodos de depuración de aguas urbanas.

### 2.3.2 Tipos de biomasa

Existen diferentes tipos o fuentes de biomasa que pueden ser utilizados para suministrar la demanda de energía de una instalación, una de las clasificaciones más generalmente aceptada es la siguiente:

- ◆ Biomasa natural: Es la que se produce espontáneamente en la naturaleza sin ningún tipo de intervención humana. Los recursos generados en las podas naturales de un bosque constituyen un ejemplo de este tipo de biomasa.
- ◆ Biomasa residual seca: se incluyen en este grupo los subproductos sólidos no utilizados en las actividades agrícolas, en las forestales y en los procesos de las industrias agroalimentarias y de transformación de la madera y que, por tanto, son considerados residuos. Este es el grupo que en la actualidad presenta un mayor interés desde el punto de vista del aprovechamiento industrial. Algunos ejemplos de este tipo de biomasa son la cáscara de almendra, el orujillo, las podas de frutales, el aserrín, etc.
- ◆ Biomasa residual húmeda: son los vertidos denominados biodegradables: las aguas residuales urbanas e industriales y los residuos ganaderos (principalmente purines).
- ◆ Cultivos energéticos: son cultivos realizados con la única finalidad de producir biomasa transformable en combustible. Algunos ejemplos son el cardo (*cynara cardunculus*), el girasol cuando se destina a la producción de biocarburantes.
- ◆ Biocarburantes: aunque su origen se encuentra en la transformación tanto de la biomasa residual húmeda (por ejemplo reciclado de aceites) como de la biomasa residual seca rica en azúcares (trigo, maíz, etc.) o en los cultivos energéticos (colza, girasol, papa, etc.), por sus especiales características y usos finales este tipo de biomasa exige una clasificación distinta de las anteriores.

### 2.3.3 Características energéticas

En muchas ocasiones, la biomasa se elimina por ser molesta para la instalación que la produce o porque entorpece las labores agrarias o ganaderas que la generan. Cuando esto ocurre, se está desperdiciando una fuente de energía importante, basta recordar que considerando que, por término medio, un kilogramo de biomasa permite obtener 3.500 kcal y que un litro de gasolina tiene aproximadamente 10.000 kcal, por cada tres kilogramos que desperdiciamos de biomasa, se desaprovecha el equivalente a un litro de gasolina. (Palz, et al.; 1991)

Habitualmente, el contenido energético de la biomasa se mide en función del poder calorífico del recurso, aunque para algunos tipos de biomasa, como es el caso de la biomasa residual húmeda o de los biocarburantes, se determina en función del poder calorífico del producto energético obtenido en su tratamiento. La tabla 11 muestra el poder calorífico superior y el poder calorífico inferior (PCI) a distintos contenidos de humedad de algunos de los recursos de biomasa más habituales.

PRODUCTO	P.C.I. a humedad x (KJ/Kg)					
	x	P.C.I.	x	P.C.I.	x	P.C.I.
Leñas y ramas	0	19.353	20	15.006	40	10.659
Serrines y virutas	0	19.069	15	15.842	35	11.537
Orujillo de oliva	0	18.839	15	15.800	35	11.746
Cáscara de almendra	0	18.559	10	16.469	15	15.424
Cortezas (Coníferas)	0	19.437	20	15.257	40	11.077
Cortezas (Fronosas)	0	18.225	20	14.087	40	9.948
Poda de frutales	0	17.890	20	13.836	40	9.781
Paja de cereales	0	17.138	10	15.173	20	13.209
Vid (Sarmientos)	0	17.765	20	13.710	40	9.656
Vid (Ramilla de uva)	0	17.263	25	12.331	50	7.399
Vid (Orujo de uva)	0	18.894	25	13.543	50	8.193

Tabla 11. Contenido energético de algunos recursos englobados bajo el término biomasa residual seca.

Por otra parte, como no se puede llevar a cabo la combustión directa de la biomasa residual húmeda, su contenido energético puede determinarse en función del que posee el biogás obtenido de su digestión anaerobia. La cantidad de biogás generado y su contenido energético dependen de las características del sustrato tratado y de la tecnología empleada, en la tabla 12 se muestra el potencial energético medio de algunos recursos. (Palz, et al.; 1991)

Sustrato	Cantidad de gas a 30 °C en l/kg de residuo seco	Contenido en metano (%)	P.C.I. (kcal/m <sup>3</sup> N de biogás)
Estiércol con paja	286	75	6.100
Excrementos de vaca	237	80	6.500
Excrementos de cerdo	257	81	6.600
Agua residual urbana	100 (por m <sup>3</sup> de agua tratado)	65	5.300

Tabla 12. Contenido energético de algunos recursos englobados bajo el término biomasa residual húmeda.

Por último, en el caso de los biocarburantes, éstos presentan un P.C.I. ligeramente inferior al de los combustibles fósiles tradicionales, aproximadamente el 10%.

Instalaciones en donde es posible utilizarla:

Como se ha visto hasta ahora, multitud de recursos quedan agrupados bajo el término genérico *biomasa*. Esta enorme variedad unida a la capacidad de adaptación de las tecnologías de aprovechamiento energético a los diferentes recursos existentes, causan que, en la actualidad, muchas de las actividades industriales podrían satisfacer toda o parte de su demanda energética con biomasa. (Palz, et al.; 1991)

No obstante, para poder utilizar esta energía renovable es necesario cumplir dos condiciones:

- ◆ **Disponer de una fuente de biomasa cercana a precios razonables.** Las empresas que disponen en sus propias instalaciones de biomasa residual son las que, con mayor facilidad, pueden plantearse la posibilidad de un aprovechamiento

energético puesto que se suele tratar de unos recursos con valor de mercado muy bajo, pudiendo suponer incluso un coste el deshacerse de ellos. Las empresas que no disponen de biomasa residual propia pueden adquirir ésta en el mercado. Aunque todavía no del todo desarrolladas, ya existen cadenas de distribución de estos recursos que permiten adquirirlos a un coste enormemente competitivo frente a los tradicionales.

- ◆ **Tener unos consumos energéticos suficientes para que la instalación sea rentable.** Mientras que para el aprovechamiento de algunos tipos de biomasa en la generación de energía térmica cualquier tamaño de instalación suele ser rentable, en el caso de producción de energía eléctrica o mecánica son necesarios unos consumos mucho más elevados.

#### 2.3.4 Aplicaciones energéticas:

Con biomasa se puede generar energía térmica (agua o aire caliente, vapor, etc.), energía eléctrica e incluso mecánica mediante el uso de biocarburantes en motores de combustión interna:

- ✓ **Generación de energía térmica:** El sistema más extendido para este tipo de aprovechamiento está basado en la combustión de biomasa sólida, aunque también es posible quemar el biogás procedente de la digestión anaerobia de un residuo líquido o el gas de síntesis generado en la gasificación de uno sólido.
- ✓ **Generación de energía eléctrica:** En función del tipo y cantidad de biomasa disponible varía la tecnología más adecuada a emplear para este fin:
  - ◆ **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 de vapor.
  - ◆ **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.

TECNOLOGÍA	BIOMASA	TAMAÑO	COMENTARIOS
Ciclo de vapor	Sólida	> 4 MWeléctricos	
Turbina de gas	Gas de síntesis	> 1 MWeléctricos	Sobre todo para cogeneración.
Ciclo combinado	Gas de síntesis	>10 MWeléctricos	
Motor alternativo	Gas de síntesis o biogás	>50 kWeléctricos	Sobre todo para cogeneración.

Tabla 13. Sistemas de generación de energía eléctrica con biomasa en general.

**Cogeneración:** Cuando una entidad presenta consumos térmicos y eléctricos importantes se puede plantear la instalación de un sistema de cogeneración, consistente en la producción conjunta de energía térmica y eléctrica. Esta tecnología presenta como gran ventaja la consecución de rendimientos superiores a los sistemas de producción de energía térmica o eléctrica por separado.

El principio de funcionamiento de la cogeneración se basa en el aprovechamiento de los calores residuales de los sistemas de producción de electricidad comentados anteriormente. La cogeneración es adecuada para empresas con consumos de energía eléctrica importantes, con un factor de utilización elevado (más de 5.000 h/año) y donde sea posible aprovechar energía térmica a temperatura media (alrededor de 400-500° C).

Tanto los sistemas de generación de energía eléctrica como los de cogeneración requieren inversiones importantes, por lo que es preciso realizar un estudio muy cuidadoso y detallado.

✓ **Generación de energía mecánica:**

Los biocarburantes pueden ser empleados en los motores alternativos de automóviles, camiones, autobuses, etc., sustituyendo total o parcialmente a los combustibles fósiles. La utilización de biocarburantes es especialmente interesante en industrias agrarias que dispongan de una adecuada materia prima para su producción (aceites reciclados, colza, girasol, maíz, trigo, patata, etc.) y que puedan auto consumirlos (por ejemplo en tractores), llegando a suponer importantes ahorros en la factura de los combustibles.

### 2.3.5 Ventajas y desventajas.

El empleo energético de la biomasa presenta numerosas ventajas, no sólo para el propietario de la instalación de aprovechamiento, también para el conjunto de la sociedad.

Ventajas ambientales del uso energético de la biomasa

- ◆ Se considera que todo el CO<sub>2</sub> emitido en la utilización energética de la biomasa había sido previamente fijado en el crecimiento de la materia vegetal que la había generado, por lo que no contribuye al incremento de su proporción en la atmósfera y, por tanto, no es responsable del aumento del efecto invernadero.
- ◆ La biomasa tiene contenidos de azufres prácticamente nulos, generalmente inferiores al 0,1%. Por este motivo, las emisiones de dióxido de azufre, que junto con las de óxidos de nitrógeno son las causantes de la lluvia ácida, son mínimas.
- ◆ Por otra parte, el uso de biocarburantes en motores de combustión interna supone una reducción de las emisiones generadas (hidrocarburos volátiles, partículas, SO<sub>2</sub> y CO).
- ◆ Por último, el empleo de la tecnología de digestión anaerobia para tratar la biomasa residual húmeda además de anular su carga contaminante, reduce fuentes de olores molestos y elimina, casi en su totalidad, los gérmenes y los microorganismos patógenos del vertido. Los fangos resultantes del proceso de digestión anaerobia pueden ser utilizados como fertilizantes en la agricultura.

Ventajas socioeconómicas del uso energético de la biomasa

- ◆ El aprovechamiento energético de la biomasa contribuye a la diversificación energética, uno de los objetivos marcados por los planes energéticos, tanto a escala internacional como europea.
- ◆ La implantación de cultivos energéticos en tierras abandonadas evita la erosión degradación del suelo. La Política Agraria Comunitaria que existe en Europa permite la utilización de tierras en retirada para la producción de cultivos no alimentarios, como son los cultivos energéticos.

- ◆ El aprovechamiento de algunos tipos de biomasa (principalmente la forestal y los cultivos energéticos) contribuyen a la creación de puestos de trabajo en el medio rural.

Desventajas:

La utilización energética de la biomasa presenta, debido a sus características, pequeños inconvenientes con relación a los combustibles fósiles:

- ◆ Los rendimientos de las calderas de biomasa son algo inferiores a los de las que usan un combustible fósil líquido o gaseoso.
- ◆ La biomasa posee menor densidad energética, o lo que es lo mismo, para conseguir la misma cantidad de energía es necesario utilizar más cantidad de recurso. Esto hace que los sistemas de almacenamiento sean, en general, mayores.
- ◆ Los sistemas de alimentación de combustible y eliminación de cenizas son más complejos y requieren unos mayores costes de operación y mantenimiento (respecto a las que usan un combustible fósil líquido o gaseoso). No obstante, cada vez existen en el mercado sistemas más automatizados que van minimizando este inconveniente.
- ◆ Los canales de distribución de la biomasa no está tan desarrollados como los de los combustibles fósiles (sólo aplicable en el caso de que los recursos no sean propios).
- ◆ Muchos de estos recursos tienen elevados contenidos de humedad, lo que hace que en determinadas aplicaciones puede ser necesario un proceso previo de secado.

El biogás debido a su alto contenido de metano (54-70%), tiene un poder calorífico que lo convierte en un combustible apreciable, tanto en el ámbito doméstico, en el alumbrado, cocción de alimentos, generación de calor, así como para operar maquinaria agrícola, bombear agua o generar energía eléctrica.

En la tabla 14 se ilustra el valor del poder calorífico de diferentes combustibles y su equivalente referido al biogás.

COMBUSTIBLE	PODER CALORIFICO		EQUIVALENTE 1000m de biogás
	Kcal/m	Kcal/Kg	
BIOGÁS	5335		1000 m <sup>3</sup>
GAS NATURAL	9185		581m <sup>3</sup>
METANO	8847		603 m <sup>3</sup>
PROPANO	22052		187 m <sup>3</sup>
BUTANO	28588		187 m <sup>3</sup>
PETRÓLEO	11357		53 lts

Tabla 14. Poder calorífico de diferentes combustibles y su equivalencia referida al biogás

## **3. DIGESTIÓN ANAEROBIA.**

### **3.1 Procesos bioquímicos que originan el biogás**

El biogás se produce mediante el proceso de fermentación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, quedando como residuo del proceso un lodo estabilizado que es un excelente mejorador de suelos, con un alto valor fertilizante.

Por lo tanto, es factible procesar los desechos animales y residuos agrícolas que se encuentran presentes en el medio rural, para producir biogás, sin afectar el uso actual que se le da a estos materiales, los que generalmente se reincorporan a los terrenos de cultivo.

Un resumen general y sencillo sería el siguiente: los desechos mezclados con agua se introducen en un recipiente cerrado llamado digestor, cuando el digestor es de carga diaria todos los días se carga con cierta cantidad de desechos mezclados con agua y del digestor sale un volumen de sólidos igual al de la mezcla alimentada. Cuando se trata de un digestor que trabaja por lotes se carga totalmente, y se vacía hasta después de dos o tres meses.

#### **3.1.1 Proceso digestión anaerobia.**

La fermentación es llevada a cabo por los microorganismos, puede ser de dos formas diferentes, que corresponden al proceso aeróbico y al proceso anaeróbico, los que se darán dependiendo de las condiciones del sistema.

#### **3.1.2. Proceso aeróbico.**

La descomposición de la materia orgánica por intervención de microorganismos aeróbicos, es conocida con el nombre de composteo y durante este tipo de proceso se convierten las sustancias orgánicas en inorgánicas.

Cuando se realiza este tipo de proceso se obtiene calor y los microorganismos elaboran sus propias sustancias y segregan productos de desecho, lo cual se representa en el siguiente cuadro.

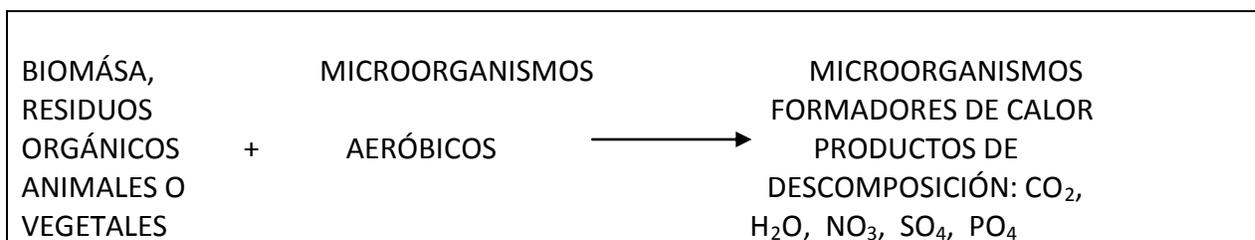


Figura 8. Proceso aerobio de composteo.

Este es un proceso muy generalizado en la elaboración de fertilizantes orgánicos. Tiene un inconveniente ya que es un gran foco de infección, y además requiere de amplias extensiones de terreno y produce como consecuencia contaminación ambiental.

### 3.1.3 Proceso anaeróbico

El proceso está constituido de tres etapas y son:

#### Etapas 1: Hidrólisis de polímeros

Durante esta primera etapa los polímeros son hidrolizados a monómeros los que sirven como materia prima para la segunda etapa.

Los materiales de los cuales provienen los polímeros, pueden ser de diferentes fuentes como lo muestra la figura 9.

FUENTE	MATERIAL
RESIDUOS VEGETALES	BAGAZO DE CAÑA, PAJA, FORRAJA, RASTROJO, ETC
RESIDUOS ANIMALES	ESTIROL Y ORINA DE GANADO VACUNO, PORCINO, BORREGOS, CABRAS, AVES, DESECHOS DE RASTRO, (SANGRE, CARNE), DESECHOS DE PESCA
RESIDUOS HUMANOS	EXCREMENTO Y ORINA
RESIDUOS FORESTALES	CORTEZA DE ÁRBOLES, RAMAS Y HOJAS
RESIDUOS MARINOS	ALGAS MARINAS

Figura9. Fuentes de desechos orgánicos

Estos compuestos están formados principalmente por carbohidratos con algunos lípidos, proteínas y otro material orgánico.

Dentro de los principales carbohidratos están: la celulosa y compuestos como la hemicelulosa y la lignina. Para poder romper los polímeros mencionados, se necesita un amplio espectro de microorganismos que posean capacidad enzimática para poder degradar a la celulosa, grasas y proteínas presentes. (Guyot, 1989)

Los microorganismos celulolíticos se agrupan en mesofílicos con rango óptimo de 30-40°C, y termofílicos que trabajan a una temperatura óptima de 50-60°C.

Ambos grupos de microorganismos crecen en un rango de pH entre 6-7. Al producirse los ácidos orgánicos debido al rompimiento de la celulosa, el pH baja, por lo que el inicio

de la fermentación y durante el proceso será necesario agregar una sustancia neutralizante, para estabilizar el pH.

Cuando los microorganismos formadores de ácidos y los formadores de metano están presentes en una reacción balanceada el pH del sistema está en equilibrio, ya que los ácidos orgánicos serán consumidos conforme se vayan formando.

Las dificultades que se pueden presentar casi siempre son durante esta primera etapa ya que la degradación de los polímeros es bastante lenta, además esta primera etapa está limitada por varios factores como son la temperatura, sustrato y especie de microorganismo presente.

#### Etapa 2: Formación de ácidos orgánicos

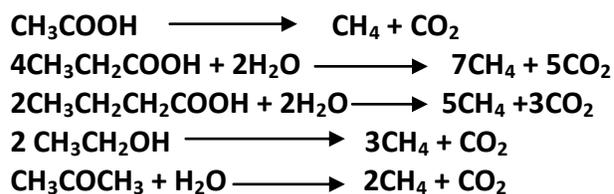
Dado que durante la primera etapa se obtienen monómeros, éstos son el sustrato para que se lleve a cabo el proceso de la segunda etapa. Los ácidos son el producto final del metabolismo de los carbohidratos, siendo los principales el ácido acético, propiónico y el láctico.

El ácido acético es probablemente el sustrato más simple e importante para la formación de metano, algunos estudios han llegado a la conclusión de que aproximadamente el 70% del metano es formado a partir del ácido acético. (Munguia 1982) (Pichardo 1980)

Durante esta segunda etapa, están involucradas muchas especies bacterianas y la proporción de ácidos, hidrógeno, bióxido de carbono y alcoholes simples producidos, depende de la materia prima empleada, así como de las condiciones del medio ambiente.

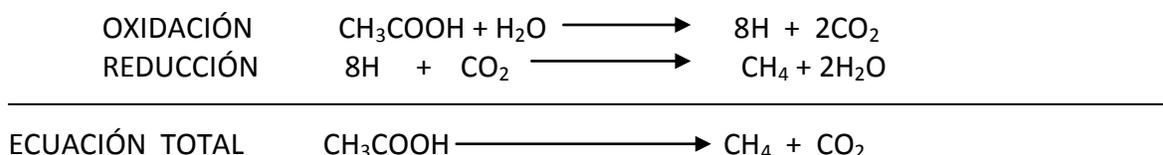
#### Etapa 3: Formación de metano

Esta etapa es conocida como metanogénica, las ecuaciones siguientes muestran la obtención del metano como producto de la fermentación del ácido acético, propiónico, butírico, etanol y acetona (Monroy 1981).



Si observamos los productos finales en cada caso son independientes de la estructura del sustrato original.

La teoría de reducción del carbono publicada en 1938 por Van Nier, es todavía aceptada, se basa en la fermentación de los compuestos orgánicos por las bacterias metanogénicas que son completamente oxidados a bióxido de carbono y este proceso va acoplado a un proceso de reducción. Durante el cual una parte o el total del bióxido de carbono es reducido a metano como lo muestra la siguiente reacción:



Las bacterias que intervienen en esta etapa son grupos de microorganismos fisiológicamente especiales, ya que las bacterias metanogénicas son altamente susceptibles a cambios bruscos de temperatura, a la presencia de oxígeno; pero tienen como ventaja que poseen un alto sistema metabólico con formación de metano como el mayor producto. (Wayne, et al.; 1990)

Como ya se mencionó anteriormente, las bacterias metanogénicas son fisiológicamente especiales, y esto lo comprueba lo siguiente: como grupo de bacterias metanogénicas son altamente específicas en el tipo de sustrato que pueden utilizar, por ejemplo para completar la fermentación de un compuesto simple, como el ácido valérico, se requieren tres especies de bacterias.

El valerato es inicialmente oxidado por Metanobacterias suboxidans en acetato y propiónico, los cuales no pueden ser procesados por este Microorganismo, entonces interviene una segunda especie que es Metanobacterias piopionicum, la cual metaboliza el propiónico en acetato, bióxido de carbono y metano, esta segunda especie no es capaz de reducir el acetato, por lo que interviene una tercera especie, la Methanosarcina methanica, la que reduce el acetato para formar metano y bióxido de carbono. (Wayne, et al.; 1990)

ORDEN	FAMILIA	GENERO	ESPECIE	CEPA
<u>Methanobacteria</u> <u>s</u>	<u>Methanobacterias</u>	<u>Metanobacterias</u>  <u>Metanobrevibacteria</u> <u>s</u>	<u>M.formicium,</u> <u>M.bryanti</u>  <u>M.thermoaut</u> <u>o</u> <u>Trophicum</u>	<u>M.F.</u> <u>MoH.</u> <u>MoGH</u>  <u>AH.</u>
<u>Methanococcales</u>	<u>Metanococcaceae</u>	<u>Metanobrevibacter</u>  <u>Metanococcus</u>	<u>M.riminatium</u> <u>M.arboriphius</u>  <u>M.emithii</u>	<u>Mi..</u> <u>DHI.</u> <u>AZ.</u> <u>DC.</u> <u>PS.</u>
<u>Metanonicrobiale</u> <u>s</u>	<u>Methanomicrobiale</u> <u>s</u>  <u>Meetanosarcinacea</u> <u>e</u>	<u>Metanomicrobium</u> <u>Metanogenium</u>  <u>Metannospirilum</u> <u>Metanosarcina</u>	<u>M.mobile</u> <u>M.cariaci</u> <u>M.marisnigri</u> <u>M.hungatei</u> <u>M.barkeri</u>	<u>BP.</u> <u>JRI.</u> <u>JRI.</u> <u>JFI.</u> <u>MS.</u> <u>227W</u>

Tabla 15. Clasificación taxonómica de las bacterias metanogénicas basadas en el catálogo comparativo del RNA<sub>r</sub> 16 S (Instituto de Investigaciones Eléctricas 1980)

En resumen, en la figura 10 se muestran 9 etapas diferentes consideradas las más importantes y características del proceso de Digestión Anaerobia DA, y cada una de ellas se explica a continuación. (Manilla 2004)

1. Hidrólisis de polímeros a monómeros orgánicos (azúcares, ácidos orgánicos, aminoácidos, etc.) mediante una serie de microorganismos, genéricamente denominados hidrolíticos.
2. Conversión de monómeros a hidrógeno, dióxido de carbono, ácidos grasos volátiles (como acetato, butirato y propionato) y otros productos orgánicos, como etanol o ácido láctico, mediante un grupo de bacterias fermentativas
3. Oxidación de los compuestos orgánicos reducidos a hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético por medio de bacterias acetogénicas productoras obligadas de hidrógeno (APOH)
4. Respiración acetogénica de bicarbonato por bacterias homoacetogénicas (HA).
5. Oxidación de compuestos orgánicos reducidos a dióxido de carbono y acetato por bacterias sulfato-reductoras (SR) o nitrato-reductoras (NR), en presencia de sulfatos y nitratos
6. Oxidación de acetato a dióxido de carbono por bacterias SR o NR.
7. Oxidación de hidrógeno por bacterias SR o NR.
8. Fermentación del ácido acético mediante bacterias metanogénicas (MA)
9. Respiración metanogénica de dióxido de carbono por bacterias metanogénicas hidrogenófilas (MH).

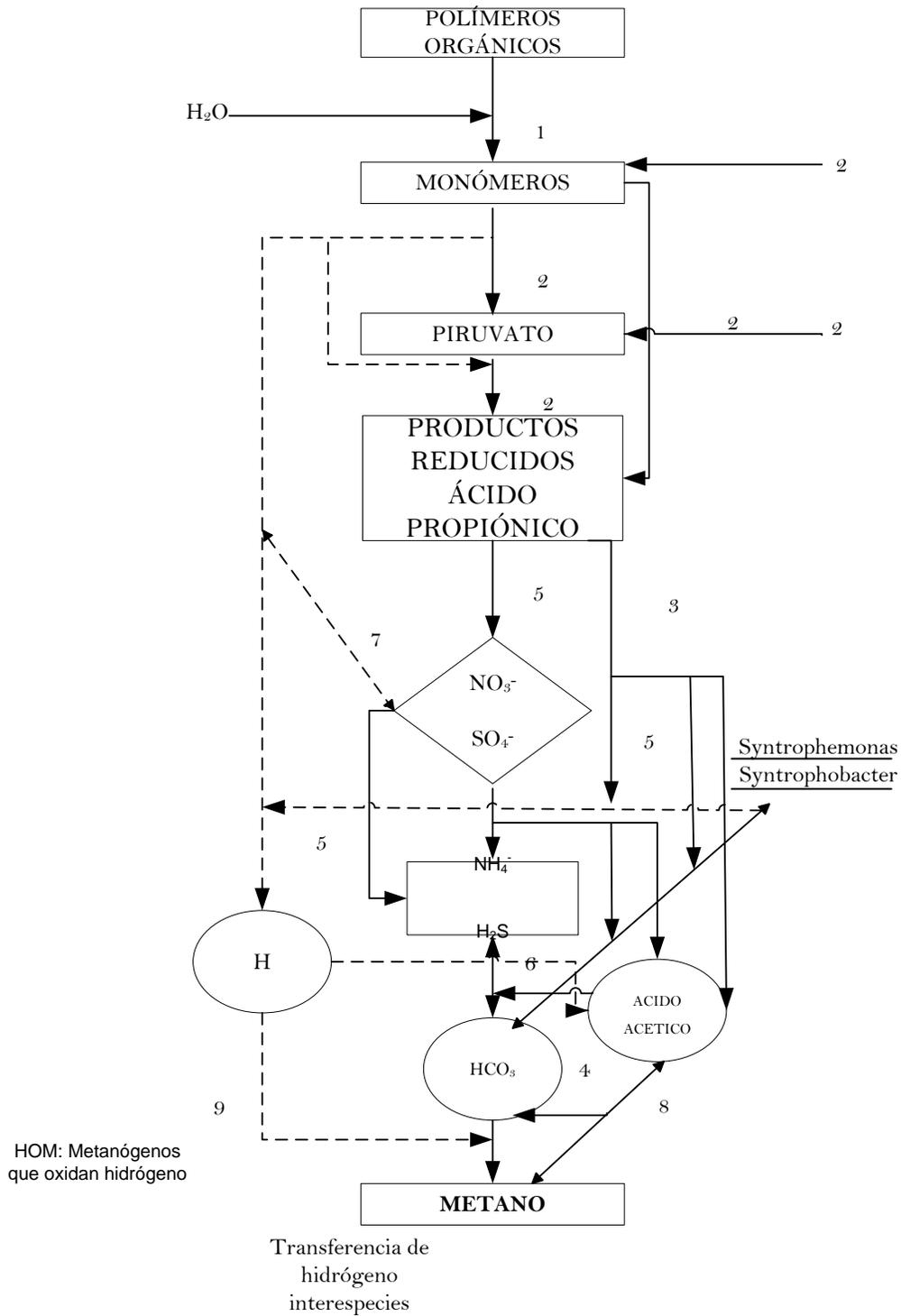


Figura 10: Resumen de la digestión anaerobia.

Este tipo de interrelaciones pueden servir como una base conveniente para enfatizar algunos requerimientos bioquímicos y ambientales del tratamiento anaerobio de sustratos orgánicos y para seleccionar las configuraciones de los procesos en función del sustrato (Malina y Pohland, 1991)

Las bacterias metanogénicas son cruciales para la estabilización anaerobia de una gran variedad de sustratos ya que constituyen un paso clave al final de la transferencia de electrones a partir de varias especies donadoras. Desgraciadamente, las metanógenos conocidos utilizan solo un estrecho rango de sustratos relativamente simples para su crecimiento y metabolismo, los más familiares y reconocidos frecuentemente llevan a cabo la reducción de dióxido de carbono y la división para la formación de ácido acético. No obstante, se reconoce que existen muchos metanógenos que pueden utilizar formato y, en menor grado, alcoholes o monóxido de carbono como donadores de electrones. Por tanto, en presencia de una fuente abundante de sustratos orgánicos, aproximadamente dos terceras partes del metano producido durante la fermentación anaerobia se deriva del grupo metil del acetato y cerca de una tercera parte se deriva de la reducción de  $\text{CO}_2$ .

#### **3.1.4 Biosíntesis del metano.**

Las bacterias metanogénicas son las que activan la tercera etapa, y utilizan como sustrato los productos formados en la segunda etapa, formaldehído, acetato, propionato, butirato. El mecanismo mediante el cual estas sustancias son convertidas a metano no ha sido totalmente detallado. Los estudios más recientes nos dan una idea del probable mecanismo para la metanogénesis.



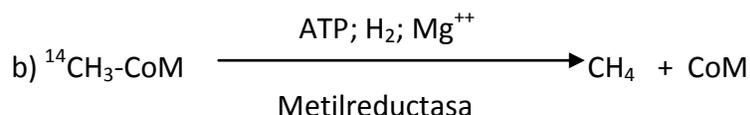
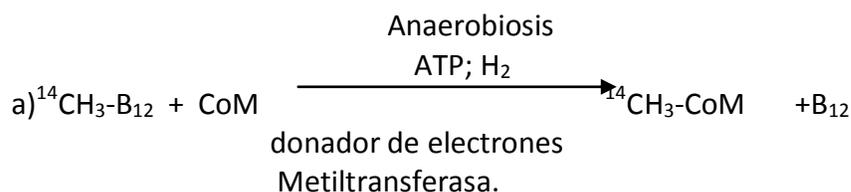
Como ya se mencionó, las bacterias metanogénicas son anaerobias estrictas, se supone que las enzimas metanogénicas están acopladas a la  $F_{420}$  cuando estas enzimas se oxidan se disocian de la  $F_{420}$  y son lábiles.

El mecanismo de la  $F_{420}$  fue explicado por Tzeng y colaboradores en 1975, los que reportaron la existencia de un sistema hidrogenasa unido a NADP dependiente de  $F_{420}$  estos estudios los realizó en extractos celulares de *Methanobacterium ruminantium* cepa MoH. Además describió un sistema formato hidrogenliasa, dependiente de  $F_{420}$  que sirve como sustrato de la hidrogenasa.

Los electrones del  $F_{420}$  SON transferidos generalmente a NADP, por un  $F_{420}$  NADP-óxido-reductazo.

Coenzima – M (Ácido 2- Mercaptoetano sulfónico).

La coenzima - M, CoM es un metil transferasa que tiene una absorción máxima a 260 nm. Su forma activa es el ácido 2-mercaptoetano-sulfónico. Su estructura es: H-S-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-SO<sub>3</sub>. Tiene como función transferir grupos metilo. Esto fue comprobado mediante el empleo de <sup>14</sup>C-metilcobalamina como donadora de grupos metilo para la formación del metano. Estos trabajos fueron hechos con extractos de *Methanobacterium* cepa MoH. La reacción fue descrita de la siguiente manera: (Jones y Guyot, 1984), (Instituto de Investigaciones Eléctricas 1980) (Lenninger 1979)

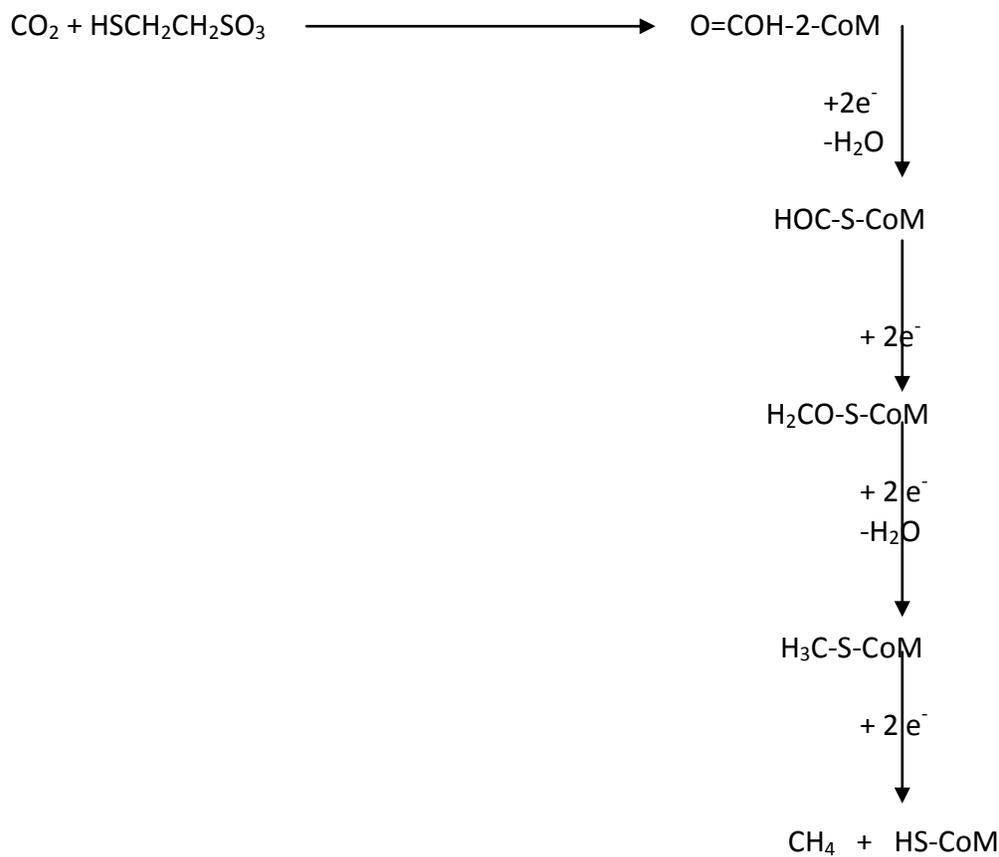


ATP = Activador

CoM = Acarreador CH<sub>3</sub>

En la reacción se adicionó tripolifosfato, el cual inhibe la desmetilización de la CoM, y se acumuló  $^{14}\text{CH}_3\text{-CoM}$ . En seguida el  $^{14}\text{CH}_3\text{-CoM}$  se utilizó como sustrato (reacción b) y se observó la formación de  $^{14}\text{CH}_4$  con esto se comprobó que la CoM es una Metil-transferasa.

Después de describir a las coenzimas que actúan durante el proceso metanogénico, se describe el mecanismo propuesto por Baker y complementado por Gunsalus en el siguiente esquema. (Jones y Guyot, 1984)



### 3.2 Parámetros que determinan la digestión anaerobia

La digestión, por ser un proceso biológico llevado a cabo por microorganismos vivos, está sujeta a la influencia de varios factores como son:

1. Temperatura
2. Tiempo de residencia
3. Porcentaje de sólidos
4. Relación C/N
5. pH
6. Agitación
7. Fuerza iónica y salinidad
8. Toxicidad e inhibición
9. Tasa de dilución

Por lo tanto, es necesario conocer estos parámetros y analizarlos para controlarlos y regularlos en un determinado momento según las condiciones del medio ambiente, ya que gracias a esto será la eficiencia del proceso de la digestión de la materia orgánica.

En consecuencia, analizando la forma independiente cada uno de los parámetros se observa la influencia que tienen en el proceso digestivo.

#### 3.2.1 Temperatura y formas de control

Este parámetro es el de mayor influencia en el proceso anaeróbico. La digestión anaeróbica se lleva a cabo en intervalos de temperatura que fluctúan de 5 a 55 °C, encontrándose en este intervalo dos zonas de operación del sistema, en las cuales hay una producción óptima de gas. Estas zonas dependen del tipo de bacterias productoras de gas. Los intervalos de temperatura son:

##### *Intervalo termofílico:*

Tiene grandes ventajas comparado con el mesofílico, en cuanto al tiempo de residencia; ya que el mismo volumen de materia orgánica es digerido en menor tiempo, pero presenta las siguientes desventajas.

Las bacterias termofílicas son muy sensibles a cambios de temperatura, lo que hace necesario un control muy eficiente del sistema para evitar variaciones de temperatura.

Otra desventaja es que para mantener el sistema a una temperatura más elevada a la temperatura del medio ambiente, se requieren sistemas de calefacción y aislamiento muy eficiente, lo que resultaría antieconómico especialmente en zonas frías.

Además, se ha encontrado que los sedimentos que se obtienen poseen baja calidad como fertilizantes.

#### *Intervalo mesofílico*

Al trabajar las bacterias en este intervalo, se tiene la ventaja de reducir costos en cuanto al consumo de energía, ya que con sólo precalentar la mezcla, de alimentación se mantienen temperaturas aceptables; esto se logra fácilmente, precalentando el agua con que se efectúa la mezcla en calentadores solares y construyendo los digestores enterrados para evitar pérdidas de calor. Esto indica que resulta más económico trabajar en el intervalo mesofílico (Instituto de investigaciones Eléctricas 1979) (Mandujano 1981)

#### *Formas de control.*

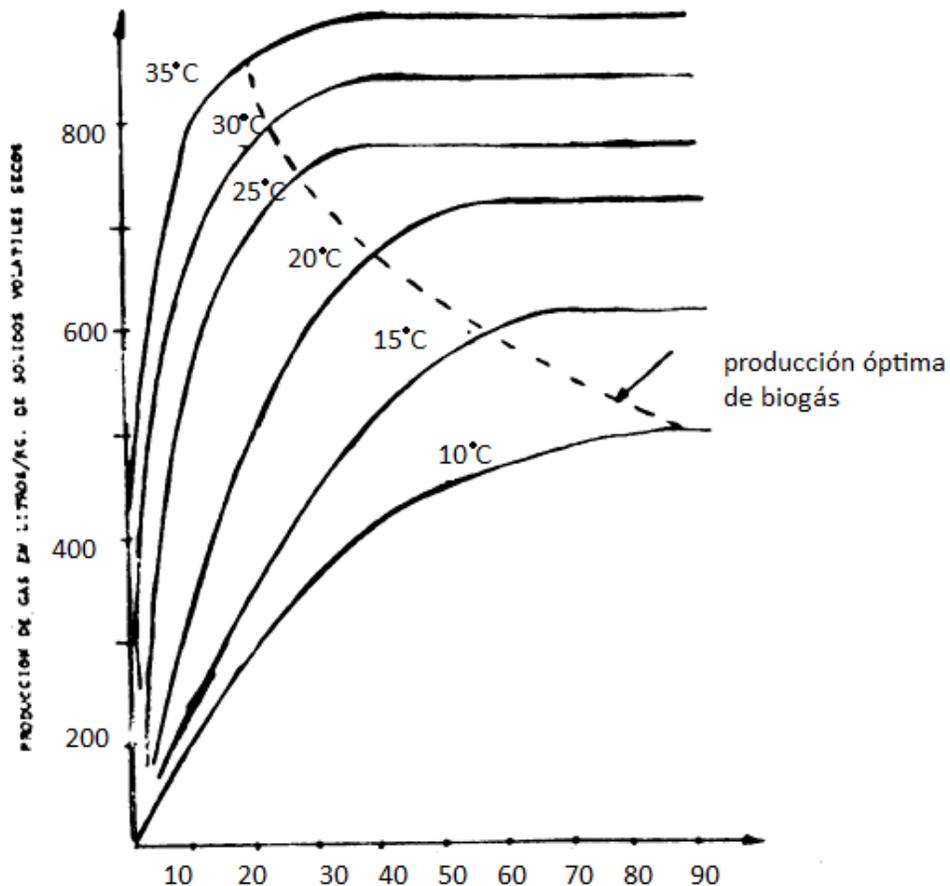
La forma de controlar la temperatura es sencilla

- Aislamiento del digestor.
- Precalentamiento del agua para la mezcla con energía solar.
- Construcción subterránea del digestor.

#### **3.2.2 Tiempo de residencia.**

Las bacterias requieren de un cierto tiempo para degradar la materia orgánica, por lo tanto, el tiempo de residencia es el tiempo que se requiere para degradar completamente la materia orgánica.

El tiempo que permanecen los sólidos volátiles (que serán convertidos en gas), en un digester es un aspecto fundamental del proceso y como ya se mencionó, representa el tiempo promedio en que la materia orgánica es atacada por los microorganismos. Se considera que el tiempo de residencia óptimo es aquel que produce el 80% de la producción total en el menor número de días. Existe una relación muy estrecha entre el tiempo de residencia y la temperatura, ya que a mayores temperaturas los tiempos de residencia son menores; como se muestra en la figura 11.



Figuras 11: Producción de gas a diferentes temperaturas

Para calcular el tiempo de residencia de un digester, es necesario establecer el porcentaje de degradación que se requiere obtener.

En un digester, el proceso de digestión trabaja a su máxima capacidad en temperaturas del intervalo termofílico, y en estas condiciones el menor tiempo de residencia es aproximadamente de doce días obteniéndose una conversión equivalente al 50%.

En el Instituto de Investigaciones Eléctricas, se realizaron estudios experimentales para obtener tiempos de residencias aproximados para la producción de gas. Los resultados de tres diferentes experimentos, permitieron concluir que para mantener temperaturas de 28 a 30°C, es suficiente mantener el digestor enterrado y precalentar la mezcla de dosificación.

Esta temperatura aunque no es la óptima, puede mantenerse sin que el proceso sufra grandes modificaciones. Para estas temperaturas el tiempo de residencia óptimo corresponde a 28-30 días aproximadamente. En un digestor de carga continua el tiempo de retención determina el volumen diario de carga que se requiere para alimentar al digestor, debido a la siguiente relación. (Mandujano 1981)

$$\frac{\text{VOLUMEN DEL DIGESTOR (m}^3\text{)}}{\text{TIEMPO DE RESIDENCIA (DÍAS)}} = \text{VOLUMEN DE CARGA DIARIA (m}^3\text{/DÍAS)}$$

Por ejemplo, para un tiempo de residencia de 30 días, cada día se cargará 1/30 del volumen total del digestor, y en promedio la materia orgánica y la masa microbiana permanecerán 30 días dentro del digestor. En un digestor que trabaja a régimen estacionario, o sea, por lote, el tiempo de residencia es el que transcurre entre la carga del sistema y la descarga.

### 3.2.3 Porcentaje de sólidos.

**Porcentaje de sólidos** Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida; esta última llamada sólidos totales. Los sólidos totales contenidos en un digestor son también un factor importante para considerar asegurar que el proceso de digestión se lleve a cabo en forma satisfactoria.

Los sólidos totales representan la suma de los sólidos volátiles contenidos en el material y de sus cenizas representadas por material inorgánico.

El porcentaje de sólidos totales dependerá del tipo de desecho que se maneje, y por lo tanto, se debe establecer el grado óptimo de dilución para cada tipo de desecho, Experimentalmente, se ha demostrado que una carga que contenga entre 7- 9% de sólidos totales, es óptima para la digestión. Para calcular el volumen de agua que se debe mezclar con la materia prima y de esta manera obtener el porcentaje de sólidos totales deseado, es indispensable establecer: (Galicia 1982)

- % de sólidos totales de materia orgánica utilizada.
- % de sólidos deseados en la mezcla.

Un ejemplo se tiene con el planteo y solución del siguiente cálculo. (Pichardo 1980)

Se tiene estiércol de bovino fresco, el cual tiene 20% de sólidos totales y un 80% de humedad. Si establecemos que se requiere un 8% de sólidos totales en la mezcla, se hacen los siguientes cálculos, referidos a un Kg de estiércol fresco.

- % de sólidos totales 20%
- % de sólidos deseados 8%

$$\begin{array}{r} \text{Si } 1000\text{g} \text{ ————— } 200\text{g} \\ \text{Estiércol fresco} \qquad \qquad \text{sólidos totales} \\ \text{X g} \text{ ————— } 80\text{g} \end{array}$$

Significa que en 400g de estiércol fresco se tienen 80 g de sólidos totales.

$$\begin{array}{r} \text{Si se diluye } 400\text{g} \text{ ————— } 1000\text{g mezcla} \\ \text{estiércol fresco} \end{array}$$

Se tienen que agregar 600g de agua.

Por lo tanto:

$$\begin{array}{r} 1000\text{g} \text{ ————— } 600\text{g de agua} \\ \text{estiércol fresco} \\ 1000\text{g} \text{ ————— } \text{X g agua} \\ \text{X} = 1500\text{g de agua} \end{array}$$

Considerando que la densidad del agua es de 1.0 g/ml, 1500 g de agua 1.5 lts.

Por lo tanto, para obtener una mezcla con 8% de sólidos totales empleando como materia orgánica estiércol de bovino fresco se tendrá que agregar 1.5 litros de agua por cada kg de estiércol fresco.

En la siguiente tabla, se presentan datos promedio sobre el contenido de sólidos totales de diversos desechos, y 1ª cantidad de agua que hay que agregar por cada kg de materia para obtener mezclas con 8% de sólidos totales.

Obviamente, estos datos sólo se dan como referencia, ya que la humedad contenida en un material, depende mucho de factores externos, entre ellos, la temperatura ambiente, las lluvias, el tiempo que lleva expuesto al aire el material, la forma de recolección de la materia orgánica, etcétera. Figura 12.

<b>Material</b>	<b>Sólidos totales %</b>	<b>Litros de agua por Kg. de desechos para 8% de sol.</b>
<b>Heces humanas</b>	<b>17</b>	<b>1.1</b>
<b>Estiércol de vaca</b>	<b>20</b>	<b>1.5</b>
<b>Caballos, bueyes, mulas</b>	<b>25</b>	<b>2.1</b>
<b>Cerdos</b>	<b>18</b>	<b>1.3</b>
<b>Ovejas</b>	<b>32</b>	<b>3.0</b>
<b>Gallinas</b>	<b>44</b>	<b>4.5</b>
<b>Hojas secas de árbol</b>	<b>50</b>	<b>5.3</b>
<b>Papel periódico</b>	<b>93</b>	<b>10.6</b>

Figura 12: Datos promedio sobre el contenido de sólidos totales

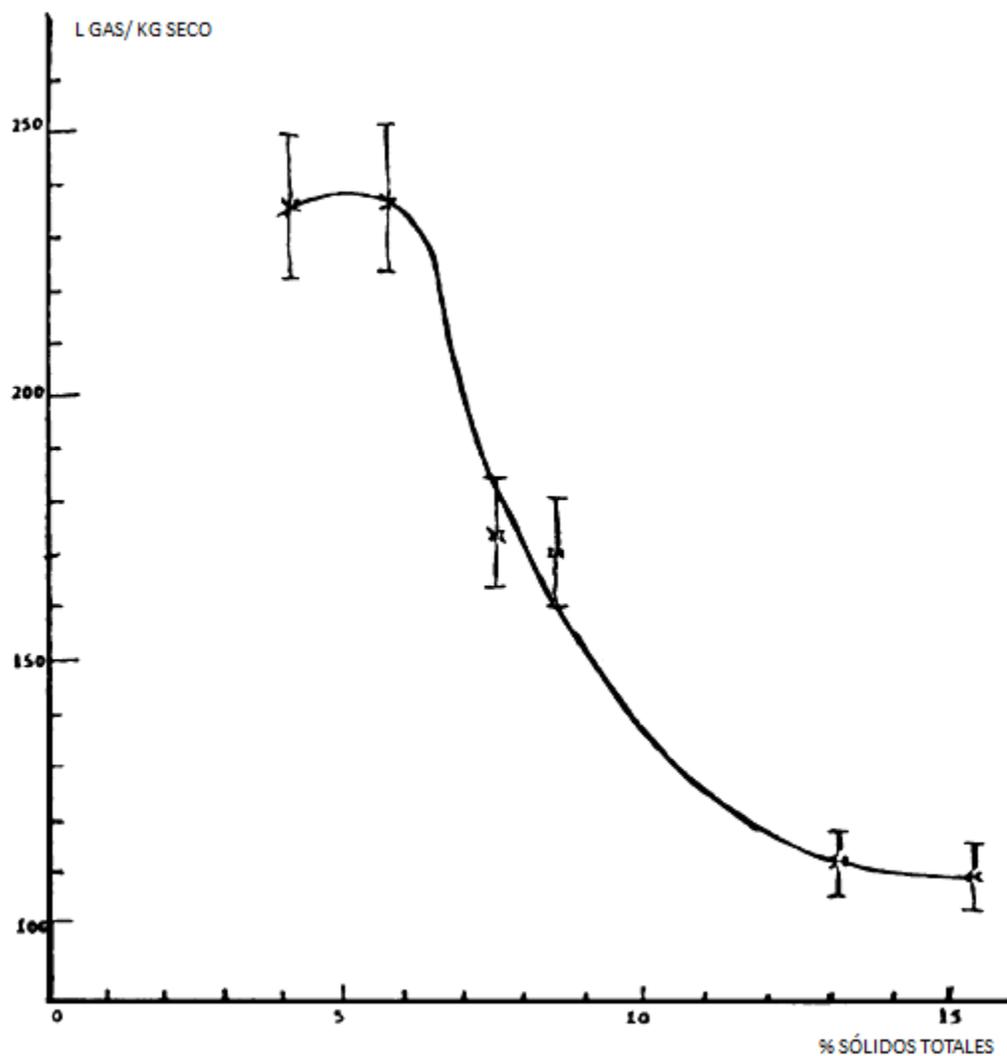


Figura 13: Producción del gas vs % de sólidos totales

Prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometida a fermentación. La calidad y cantidad de biogás producido dependerá de la composición del desecho utilizado.

Los desechos orgánicos varían en cuanto su composición y propiedades. Esto se debe al efecto de varios factores como son clima, tipo de suelo o alimentación, condiciones de cultivo o crianza, estado de desarrollo o raza que los genera, forma de recolección o estado físico de los mismos, por lo que no ha sido posible establecer un método único que los caracterice cuantitativa y cualitativamente.

Las bacterias anaeróbicas son las responsables de convertir la materia orgánica a gas metano, dióxido de carbono y agua.

El análisis químico de las bacterias anaeróbicas muestra la presencia de carbono, hidrógeno, nitrógeno, fósforo, sodio, magnesio, calcio, azufre; todos estos elementos con trazas de materiales inorgánicos son utilizados en la fermentación, siendo esenciales para el crecimiento de las bacterias, mismas que deben tener una dieta balanceada para poder realizar su metabolismo. El carbono y el nitrógeno son las fuentes principales de alimentación de las bacterias formadoras de metano: el carbono es la fuente de energía y el nitrógeno contribuye a la formación de nuevas células.

Las bacterias anaeróbicas consumen carbono con una rapidez treinta veces mayor que el consumo de nitrógeno, por lo que la relación óptima C/N es de 30/1. (Mandujano 1981)

#### **3.2.4 Relación CARBONO/NITROGENO (C/N)**

CARBONO A diferencia del nitrógeno, el carbono existe en muchas formas no utilizables por las bacterias. La forma de carbono no digerible por las bacterias corresponde a la lignina, un compuesto vegetal complejo, bastante resistente a la descomposición, La lignina entra al digestor, ya sea directamente con los desechos o bien indirectamente como material de cama o residuos vegetales no digeridos en el estiércol, Por lo tanto, es posible obtener medidas más exactas en la relación carbono digerible y nitrógeno, ya que se toma en cuenta el contenido de carbono total digerible más no el digerible.

NITRÓGENO Debido a que el nitrógeno existe en muchas formas químicas como amoníaco, proteínas, nitratos, etcétera, no hay pruebas que midan inmediatamente la cantidad total de nitrógeno, ya que se tienen que realizar diferentes pruebas para medir el nitrógeno en sus diferentes formas: nitrógeno orgánico, amoníaco, nitritos, nitratos, etcétera.

El contenido de nitrógeno de un determinado material de desecho varía por ejemplo, el contenido de nitrógeno de un tipo específico de estiércol varía dependiendo

de las condiciones de crecimiento, edad del animal, la dieta, material de cama (paja, caña de maíz, heno, aserrín, paja de trigo, etcétera), cantidad de orina que se recoge junto al estiércol, pues la orina es una forma de liberarse del exceso de nitrógeno.

Una de las ventajas que se tienen es que las bacterias anaeróbicas utilizan la mayoría de las formas de nitrógeno, por lo que, el contenido de nitrógeno presente en los desechos orgánicos empleados en la obtención de biogás, puede generalizarse y presentarse como nitrógeno total porcentaje de peso en seco.

Como ya se mencionó la relación óptima C/N es de 30/1, si hay muy poco nitrógeno las bacterias presentes no serán capaces de utilizar todo el carbono presente y el proceso resulta ineficiente. Cuando hay demasiado nitrógeno, el carbono se agota con rapidez y la fermentación cesa. El nitrógeno restante se pierde como amoníaco. Esta pérdida de nitrógeno reduce la calidad de los lodos residuales. (Pichardo 1980)

La producción de gas varía dependiendo de la relación C/N.

En la práctica es muy común que un digester se alimente con mezclas de los residuos disponibles en la región.

En las tablas 16 y 17 se muestran las relaciones C/N de diversos desechos.

MATERIA	%N (BASE SECA)	%C (BASE SECA)	C/N
<b><u>DESECHOS ANIMALES</u></b>			
BOVINOS	1.7	30.6	18:1
EQUINOS	2.3	37.6	25:1
OVINOS	3.8	83.6	22:1
PORCINOS	3.8	76	20:1
AVES	6.3	50	7.9:1
EXCRETAS HUMANAS	0.85	2.5	3:1
<b><u>DESECHOS VEGETALES</u></b>			
PAJA DE TRIGO	0.53	46	87:1
PAJA DE ARRÓZ	0.63	42	67:1
RASTROJO DE MAÍZ	0.75	40	53:1
HOJAS SECAS	1	41	41:1
RATOJO DE SOYA	1.3	41	32:1

Tabla 16: Relación C/N de diversos desechos disponibles en medio rural

	<b>% N (BASE SECA)</b>	<b>C/N</b>
<b><u>DESECHOS ANIMALES</u></b>		
ORINA	16	0.8
SANGRE	12	3.5
ESTIÉRCOL DE GALLINA	6.3	15
ESTIÉRCOL DE BORREGO	3.8	22
ESTIÉRCOL DE CERDO	3.8	20
ESTIÉRCOL DE CABALLO	2.3	25
ESTIÉRCOL DE VACA	1.7	25
HECES HUMANAS	6	6-10
<b><u>DESECHOS VEGETALES</u></b>		
CASCARA DE CACAHUATE	0.8	36
HENO DE ALFALFA	2.8	17
PAJA DE AVENA	1.1	48
PAJA DE TRIGO	0.5	150
RASTROJO DE MAÍZ	0.49	53
RASTROJO DE SORGO	0.5	53
PAJA DE ARRÓZ	0.3	53
ASERRIN	0.1	200-500

Tabla 17. Relación Carbono/Nitrógeno de desechos orgánicos.

TIPO DE MATERIA ANÁLISIS	ESTIERCOL BOVINO	CASCARA DE CACAHUATE	PAJA DE ARROZ	RASTROJO MAIZ
HUMEDAD 23.0000	81.9400	3.3500	7.4300	63.2000
MATERIA SECA 77.0000	18.0600	96.6500	92.5700	36.8000
	+/- 2.0190			
PROTEINA 2.3800	2.0575	4.8800	1.8500	1.1800
	+/- 0.3003			
ESTIERCOL - - - -	0.2000	4.3000*	- - - -	- - - -
	+/- 0.0535	+/- 3.1800		
CENIZAS 6.1600	3.1475	- - -	16.8400	2.9800
	+/- 0.8860			
FIBRA 23.2100	7.0525	52.7000*	24.6300	13.1000
	+/- 3.5456	+/- 10.3900*	- - - -	- - - -
- - - -				
E.L.N 43.7800	6.1025	21.2000*	50.10000	18.8700
CARBOHIDRATOS - - - -	+/- 3.2139	+/- 1.2000	- - - -	- - - -
N total (kjeldhal) - - - -	2.1350	- - - -	- - - -	- - - -
	+/- 0.0854	- - - -	- - - -	- - - -
- - - -				
P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0.8550	- - - -	- - - -	- - - -

Tabla 18: Datos promedio en distintos tipos de residuos orgánicos.

Los análisis fueron realizados en el laboratorio de Diagnostico de Patología Animal de la SARH de Yautepec, Morelos a excepción de los datos marcados con un asterisco. Estos Datos fueron proporcionados por el Departamento de Nutrición Animal y Bioquímico del Instituto de Investigación Pecuarias de la SARH

Los datos que muestran las tablas 16, 17 y 18 permiten tener una idea de las posibilidades de combinar los residuos para obtener proporciones aceptables de carbono y nitrógeno. Con el planteamiento y resolución del siguiente cálculo se muestra el manejo de las tablas.

Cuando se desea saber la relación C/N utilizando una mezcla de estiércol de vaca y paja de trigo seca, teniendo como datos:

- 500 kg de estiércol de vaca
- 400 kg de paja de trigo seca

Lo primero que se debe hacer es recurrir a la tabla 17, que aproxima los valores de nitrógeno y carbono en los desechos orgánicos. Con estos valores se procede al cálculo:

- Estiércol de vaca C/N - 25 % N estiércol de vaca 1.7
- Paja de trigo seca C/N - 150 % N paja trigo 0.5

### 3.2.5 pH

El pH tiene efectos determinantes sobre la actividad biológica del proceso, el mantener el pH estable es esencial para los seres vivos. La mayor parte de los procesos vivos tienen lugar entre un pH 5 y 9. En cuanto a los digestores, el pH es más estricto ya que trabajan a un pH de 7.5-8.5 como se aprecia en la figura 14.

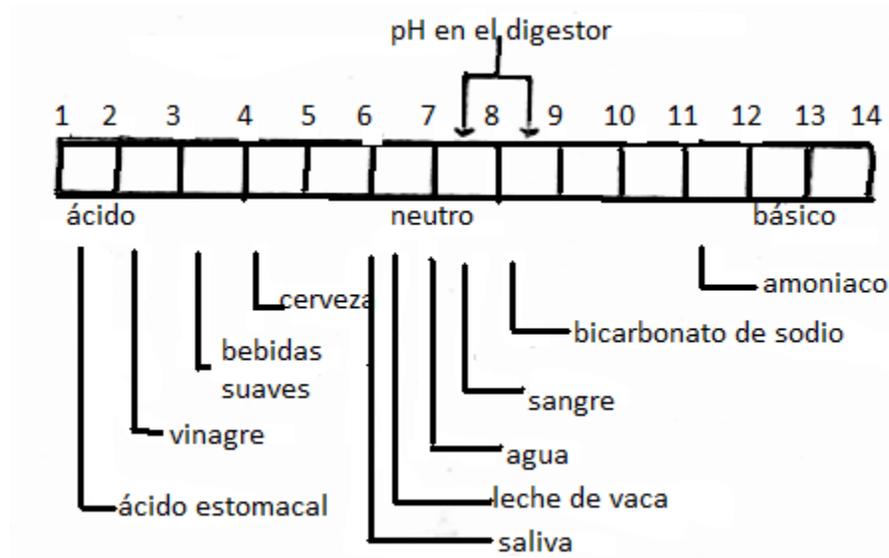


Figura 14: pH en el digestor.

Inicialmente los microorganismos formadores de ácidos se encargan de destruir la materia orgánica y producir ácidos grasos volátiles que pueden durar aproximadamente unas dos semanas. Como resultado de la presencia de éstos, el pH baja a 6 ó menos. Después de estas dos semanas, las bacterias metanogénicas comenzaran a ejercer su acción sobre los ácidos grasos volátiles, para generar metano y CO<sub>2</sub>, además, se forma amoníaco debido a que se degradan proteínas, todo esto hace que el pH aumente arriba de 7 generalmente entre 7.5-8.5. (Galicia 1982)

En digestores que se ha operado estiércol bovino, se han obtenido intervalos de pH entre 6.7 y 7.5; esto si el digestor opera correctamente. Si se pierde el equilibrio, el pH baja y el proceso se detiene por inhibición del metabolismo de las bacterias metanogénicas y hay aumento de CO<sub>2</sub> en el gas. (Instituto de Investigaciones Eléctricas 1979)

Existen dos problemas fundamentales en la estabilización del pH y son:

a) Que la solución sea demasiado ácida pH= 6 ó menos, lo que ocasiona por la adición rápida de las materias primas o por grandes fluctuaciones de la temperatura, la presencia de sustancias tóxicas o por la acumulación de espumas. Para solucionar estos problemas se recomienda:

- Reducir la rapidez de alimentación
- Agregar amoníaco
- Estabilizar la temperatura
- Retirar la espuma

b) Que la solución sea demasiado alcalina pH=9 ó mayor, Esto se debe a que las materias primas iniciales fueron demasiado alcalinas. Esto se corrige, ya que se producirá una gran cantidad de CO<sub>2</sub> que hará que la mezcla se haga más ácida.

Con lo expuesto anteriormente se abarcan los factores que están íntimamente ligados y que van a tender a mantener el pH dentro del intervalo correcto, para que la digestión esté equilibrada. (López 2002)

Naturalmente, cuando empieza la operación en el digestor, la población de microorganismos formadores de ácido será mayor, esto trae como consecuencia que el pH sea bajo, pero cuando las cantidades de microorganismos formadores de ácido y

bacterias metanogénicas sean balanceadas, entonces existirá un equilibrio de pH. Con esto, el proceso no sufrirá fluctuaciones y se estabilizará.

### 3.2.6 Agitación

La generación de biogás depende totalmente de que los microorganismos cumplan en forma óptima su ciclo biológico, y de ahí la importancia de darles las mejores condiciones para que esto ocurra. Los microorganismos y la materia deben estar en íntimo contacto, por lo que es necesario agitar la mezcla.

Un problema grave que se presenta durante la digestión es la formación de natas en la superficie de la mezcla. Todos los desechos principalmente de origen vegetal, contienen materia orgánica que durante el proceso no alcanza a digerirse. Parte de ésta se acumula en la superficie formando una capa sólida, conocida como nata. Esta nata, conforme pasa el tiempo de digestión, se solidifica y forma una costra impermeable que dificulta la salida del biogás formado. (Colección FAO 1986).

La solución a este problema no sería una agitación continua, sino una agitación suficiente que no permita que la nata solidifique.

Con plantas de gas operando a nivel mesofílico, la agitación requerida es muy leve, siendo suficiente la que provoca la descarga y carga diaria del digestor. En caso de digestores que trabajan a nivel termofílico, la agitación requerida es continua para establecer un mejor contacto entre bacterias y sustrato, proporcionando además una temperatura más uniforme.

Las alternativas para la solución de este problema varían dependiendo del tamaño y sofisticación de la instalación.

La más sencilla y adaptable a una planta pequeña en la que no es costoso suministrar energía externa, es la agitación manual, bien sea mediante un volante que mande el movimiento de una propela al interior del tanque, o bien, por medio de un anillo o tanque lo suficientemente pesado para que descienda al fondo de la mezcla colocada dentro del digestor y sostenido por un cable que sale a través del domo colector, desde donde puede ser subido y bajado, provocando así turbulencia dentro de la mezcla. Ambos métodos se deben practicar de cinco a diez minutos, dos veces al día, siendo esto suficiente para romper las natas formadas y lograr así una mayor eficiencia en el proceso. (Monroy y Viniestra 1981).

### **3.2.7 Fuerza iónica y salinidad.**

El sulfato ejerce un control significativo sobre la viabilidad de la metanogénesis en presencia de ciertos sustratos, debido principalmente a la competencia entre bacterias sulfato reductoras (SBR) y metanógenos. Se ha reportado que salinidades por arriba de 0.2 N de NaCl tienen efectos mínimos sobre las poblaciones mezcladas de metanógenos, pero altas salinidades son inhibitorias. La fuerza iónica también afecta la actividad química y por tanto, puede tener efecto sobre otras especies químicas en términos de inhibición. (Manilla 2004)

### **3.2.8 Toxicidad e inhibición**

La toxicidad e inhibición de los procesos metanogénicos pueden ser consecuencia de varias circunstancias, incluyendo la generación de productos intermedios tales como ácidos grasos volátiles (AGV) (por ejemplo los ácidos propiónico, butírico, valérico, acético), que pueden tener un efecto adverso en el pH.

Desgraciadamente, mucha de la información concerniente con la inhibición es inconclusa en términos de causa y efecto y las diferencias en las circunstancias de cultivo o configuraciones y operaciones del sistema han conducido a contradicciones y posibles malas interpretaciones de los resultados de diferentes investigadores. Aún así, se ha propuesto que el efecto inhibitorio total de los AGV está relacionado con el pH establecido por el sistema de amortiguamiento, y puede elevar la concentración de las especies no ionizadas o no disociadas con un efecto celular interno mayor, ya que estas migran más fácil a través de la membrana celular. De acuerdo con esto, los AGV pueden acumularse debido a otros factores mencionados anteriormente y pueden funcionar no solo como ácidos débiles amortiguadores, para mantener el pH más bajo, sino también pueden ejercer un efecto inhibitorio con el pH sobre el consorcio microbiano presente.

También se ha propuesto que el ácido sulfhídrico y el amoníaco ejercen efectos tóxicos sobre la metanogénesis. La concentración tóxica del primero se establece entre 200 y 1500 mg/l, a menos que exista aclimatación o que las concentraciones de este puedan reducirse por precipitación o liberación en la fase gas. Por tanto, los efectos tóxicos potenciales de este ácido, normalmente en solución como un ácido débil, será

función del pH así como de la presencia de precipitantes tal como la mayoría de metales pesados. En el caso de amoníaco la aclimatación microbiana es particularmente importante y está ligada frecuentemente a la presencia de AGV y a la capacidad neutralizadora de ácidos del amoníaco sobre el pH. Por tanto, la "concentración inhibidora" de amoníaco puede variar dependiendo de otros factores ambientales y del tipo de exposición sobre las poblaciones metanogénicas más sensibles. El amoníaco libre se considera más tóxico que las especies ionizadas del amoníaco.

### **3.2.9 Tasa de dilución**

Para el caso de digestores anaerobios continuos, un incremento en la tasa de dilución puede ocasionar que el sustrato se convierta rápidamente a intermediarios tal como AGV,  $H_2$  y  $CO_2$ . Un incremento en la concentración de estos producirá una velocidad de crecimiento de los metanógenos mayor acompañada por una velocidad de producción de metano mayor, siempre que estos compuestos no estén en niveles inhibidores. Por otro lado, si un inhibidor entra en la alimentación, al aumentar la tasa de dilución aumentará la concentración de este, lo que provocará una disminución en la velocidad de crecimiento de los metanógenos. Por tanto, bajo condiciones normales es decir en ausencia de compuestos inhibidores y a bajas concentraciones de compuestos intermediarios, un incremento en la tasa de dilución ocasionará un incremento en la velocidad de producción de metano (Pullammamappallil, et al.; 1999)

### **3.3 BIOREACTORES MÁS UTILIZADOS PARA DIGESTIÓN ANAEROBIA.**

Como se mencionó al comienzo de este trabajo los biorreactores para digestión anaerobia se clasifican en primera y segunda generación; en esta sección del trabajo mostraremos los biorreactores más usados para este tipo de procesos.

Como recordatorio un digestor es un recipiente cerrado o tanque de diferentes formas denominado biodigestor o biorreactor el cual puede ser construido con diversos materiales como ladrillo y cemento, metal o plástico. El proceso de digestión que ocurre en el interior del biodigestor libera la energía química contenida en la materia orgánica, la cual se convierte en biogás.

Una planta de biogás consiste básicamente de un tanque o pozo llamado digestor donde ocurre la fermentación y un contenedor hermético que tiene como función almacenar el biogás producido. Las dos partes pueden estar juntas o separadas y el tanque de almacenamiento puede ser rígido o flotante. La carga y descarga del sistema puede ser por gravedad o por bombeo.

### *Tipo de digestores*

Resulta conveniente clasificar a los digestores, según su forma de operación, en los siguientes tipos:

Digestores de lote: (Régimen estacionario o "batch")

Son cargados sólo una vez en forma total; se sella herméticamente al aire y se deja que fermente hasta que produzca gas. Cuando la producción de gas cesa, se vacía el digestor y se vuelve a llenar con una nueva carga o lote de materias primas. Este tipo de digestores es aplicable en las siguientes situaciones:

- Disponibilidad de materia orgánica esporádica.
- Requerimiento del fertilizante orgánico en épocas específicas del año; en este caso, la carga se hace al tener disponibles los desechos y la descarga una o dos veces por año en la época de la siembra.
- Este proceso ofrece la ventaja de requerir poca atención diaria.

Desventajas: Dentro de las desventajas se tienen las siguientes:

- Se requiere de gran energía para vaciarlos y cargarlos.
- Como la producción de gas y sedimentos tienden a ser esporádicos, se hace necesario tener una batería de digestores con fecha distinta de carga, para poder tener una producción constante de gas. En la figura 15 se muestra un digestor de este tipo.

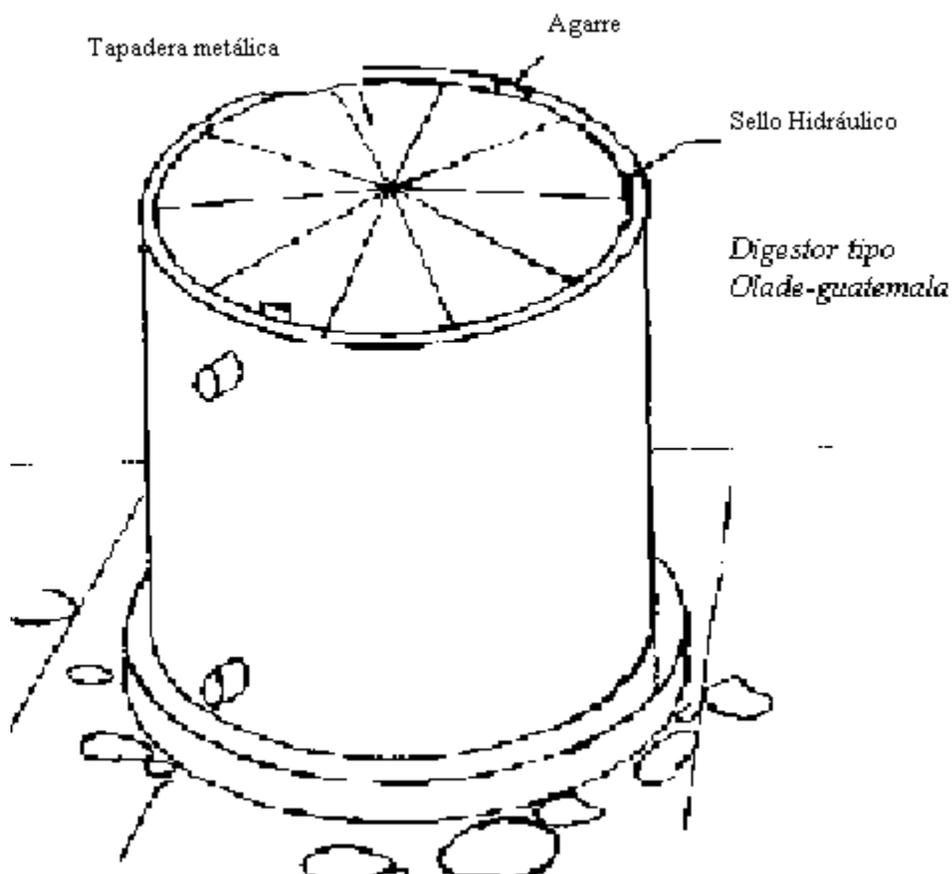


Figura 15: Digestor por lotes (FAO 1986)

#### Digestores de régimen semicontinuo

En este tipo de digestores su carga es constante, pero de manera intermitente. Esta puede efectuarse una vez al día, por lo tanto, el índice de producción, tanto de gas como de fertilizante es relativamente continuo. Los más populares son el hindú y el chino.

#### Digestores de tipo hindú.

Existen varios diseños de estos digestores, pero el más generalizado es el vertical y enterrado como se muestra en la figura 16. Se cargan por gravedad una vez al día, con un volumen de mezcla, que depende del tipo de retención y produce una cantidad diaria más o menos constante de biogás, si se mantienen las condiciones de operación. El gasómetro

está integrado al sistema, o sea, que en la parte superior del pozo flota una campana donde se almacena el gas, balanceada por contrapesos, y de ésta sale el gas para su uso. En esta forma, la presión del gas sobre la superficie de la mezcla es muy baja, menos de 20 cm de columna de agua, lo que facilita su salida desde el seno de la misma. Además, la presión de utilización del biogás es constante, lo que permite una operación eficiente de los equipos o en caso de requerirse una presión mayor simplemente se quitan los contrapesos y se colocan sobre la campana, por lo que el volumen del gasómetro es del orden de 1/3 del biogás generado al día.

La entrada de la carga diaria por gravedad hasta el fondo del pozo, además de producir agitación, provoca la salida de un volumen equivalente de lodos digeridos, desde la superficie o desde el fondo, según el diseño del sistema, los que se hacen fluir hasta una pileta para su aplicación a los cultivos.

El digestor se construye normalmente de ladrillos, con un aplanado interior de cemento pulido para evitar filtraciones, pero, también pueden utilizarse otro tipo de materiales de construcción comunes en la región. La campana puede construirse con lámina de fierro, fibra de vidrio o de otro material, con la condición de que no permita la fuga de gas. El material de la campana debe ser seleccionado con cuidado, ya que esta parte del sistema resulta ser costosa. En la figura 17 se observa la estructura de la campana que utiliza el digestor tipo hindú. Este tipo de digestor presenta una buena eficiencia en la producción de biogás, generándose entre 0.5 y un volumen de gas por volumen de digestor, y aún más, como la campana está al nivel del suelo, es fácil sacarla una vez al año para pintarla y al mismo tiempo, extraer las natas que se han formado en la superficie de la mezcla. Se tiene control sobre el material que se alimenta, lo que permite una operación uniforme.

Para la correcta operación de un digestor que genera suficiente biogás para una familia, se requiere contar con los desechos de tres vacas o su equivalente en otros residuos, lo que en un momento dado, podría ser un problema si no se cuenta con ganado estabulado. Su costo en general es mayor que los digestores de tipo chino, sin embargo, al calcular el costo, se deberá tener en cuenta que para producir la misma cantidad de biogás, el volumen de digestor tipo hindú requerido es aproximadamente un tercio del volumen si se emplea un digestor tipo chino. (Mandujano 1981)

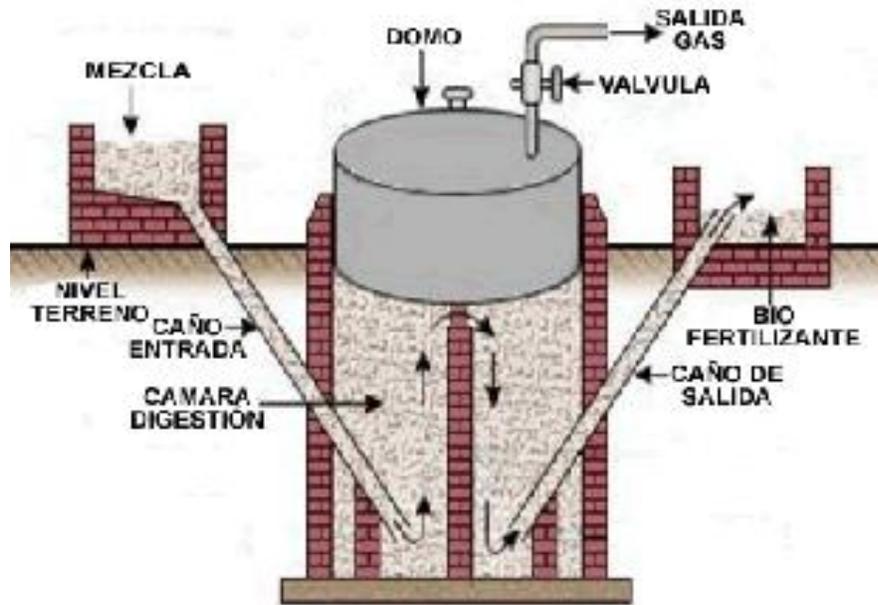


Figura 16: Digestor tipo hindú.

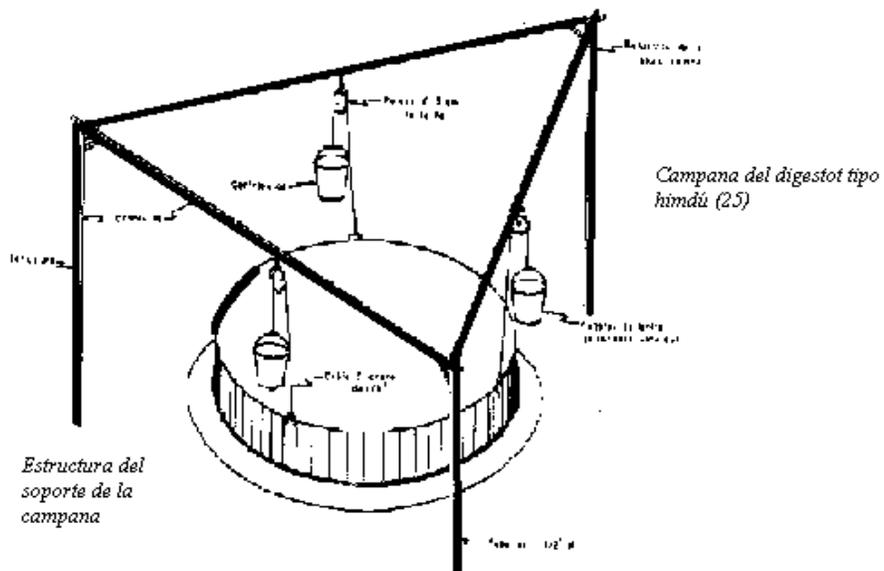


Figura 17: Campana del digestor tipo Hindú.

### Digestores de tipo chino.

Los digestores de este tipo son tanques cilíndricos con el techo y el piso en forma de domo y se construyen totalmente enterrados como se muestra en la figura 18. Al iniciar el proceso, el digestor se llena de residuos agrícolas composteados, mezclados con residuos activados en otro digestor a través de la cubierta superior, que es removible.

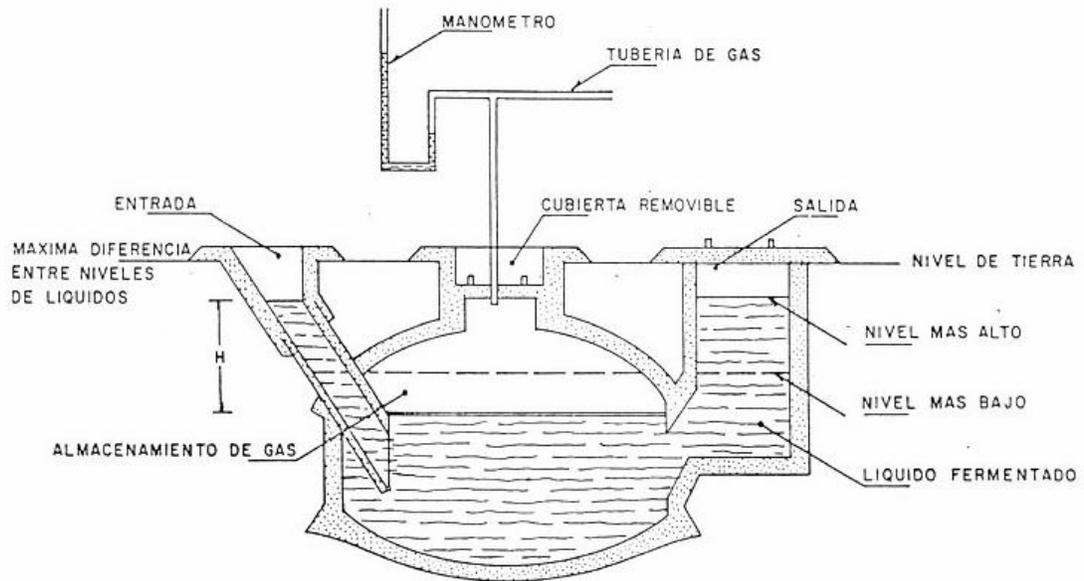


Figura 18: Digestor tipo Chino

Una vez, cargado, se va alimentando diariamente con los desechos que se tengan disponibles a través del tubo de carga, el cual llega a la parte media del digestor.

En este tipo de digestores no existe gasómetro, almacenándose el gas dentro del mismo sistema. A medida que aumenta el volumen del gas almacenado en el domo de la planta, sube la presión forzando al líquido de los tubos de entrada y salida al subir, alcanzándose presiones internas de hasta más 100 cm de columna de agua. Como consecuencia de la variación de la presión que sube al generarse el gas, y baja al empezar a utilizarse, se reduce la eficiencia de los equipos en que se usa. Si la presión sube a valores muy altos, aumenta el riesgo de fuga de gas a través de microporos en el domo y también la probabilidad de que se formen fisuras por movimientos ligeros de las paredes. La fluctuación del nivel de la mezcla en fermentación aumenta al contacto con la fase líquida con el oxígeno del aire, reduciéndose la actividad de las bacterias metanogénicas, y la alta

presión impide que el gas salga libremente del seno de la mezcla. Todo esto conduce a una menor eficiencia en la generación de biogás en los digestores de tipo chino, generándose entre 0.15-0.20 volúmenes de biogás por volumen de digestor.

Periódicamente se extrae una parte del líquido en fermentación a través del tubo de salida, mediante una cubeta y, una o dos veces al año, el digestor se vacía completamente aplicando el residuo a los campos de cultivo.

Los digestores de tipo chino son poco eficientes para generar biogás, pero son excelentes en la producción de bioabono, ya que los tiempos de retención son generalmente largos y permiten tener disponible una cantidad grande de este material en el momento que se requiere para aplicarlo al suelo y que corresponde a un periodo previo a la siembra.

#### Digestores horizontales

Generalmente se construyen enterrados. Son poco profundos y alargados, semejando un canal, con proporciones de largo y ancho de 5 a 1 o de 8 a 1, con sección transversal circular, cuadrada o en "V", como se puede apreciar en la figura 19. Se operan a régimen semi-continuo, entrando la carga por un extremo del digestor, y saliendo los lodos por el extremo opuesto.

*Digestor tipo horizontal*

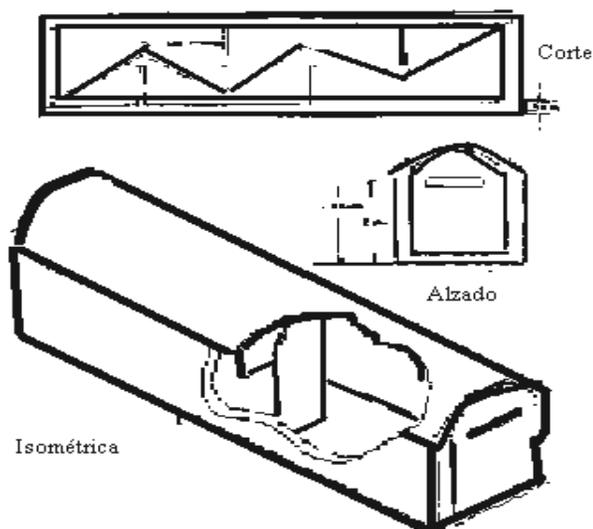


Figura 19. Digestor horizontal.

La cúpula puede ser rígida o de algún material flexible que no presente fugas de gas y que resista las condiciones de la intemperie. El gas generado se colecta en esta cúpula de la que pasa a un gasómetro flotante.

Este tipo de digestores se recomienda cuando se requiere trabajar con volúmenes mayores de  $15\text{m}^3$ , para los cuales la excavación de un pozo vertical resulta problemática; y su aplicación está enfocada a la generación de biogás para uso comunal, empleándose para accionar pequeños motores para bombeo, molienda o generación de electricidad.

#### Digestores de tipo continuo

Este tipo de digestores se desarrollan principalmente para tratamiento de aguas negras, y en la actualidad su uso se ha extendido al manejo de otros sustratos.

En general son plantas muy grandes en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos y proporcionarles calefacción y agitación, así como para su control, Por lo tanto, el tipo de plantas corresponde a instalaciones de tipo comercial, donde se genera gran cantidad de biogás, el que a su vez se aprovecha en aplicaciones industriales. (Pichardo 1981)

### **3.4 Utilización del bioabono.**

La fermentación de la materia orgánica además de generar gas combustible, produce un residuo orgánico de excelentes propiedades fertilizantes, de tal modo que el uso de esta tecnología no compite con la utilización tradicional de los residuos agrícolas y animales, sino que los canaliza a un tratamiento que acelera la fermentación de los mismos, y acorta el periodo de liberación de nutrimentos en el producto que será empleado para los mismos fines tradicionales referentes a la adición de fertilizantes orgánicos.

Otro aspecto de interés es el hecho de que en el residuo obtenido, el nitrógeno se encuentra en mayor proporción en su forma amoniacal, y en este estado, numerosos investigadores sugieren que para vegetales terrestres y acuáticos, es más valioso como fuente de nitrógeno que el nitrógeno oxidado.

Por otra parte, se tiene que el amonio es fijado por los coloides arcillosos lo que impide que el suelo pierda este elemento por lixiviación, lo cual ocurre cuando el nitrógeno se encuentra en forma de nitratos. (Santander 1979)

**Aplicación de sedimentos a suelos** La aplicación de sedimentos digeridos a los cultivos sirve básicamente para dos fines: actúa como fertilizante y como acondicionador del suelo.

El humus de sedimentos, además de proporcionar nutrimentos a las plantas, beneficia al suelo al aumentar su capacidad de retención de agua y mejorar su estructura.

En la aplicación de los sedimentos al suelo, se deben considerar los siguientes aspectos:

Los sedimentos digeridos frescos, sobretodo de estiércol contienen grandes cantidades de amoníaco y, en ese estado, puede actuar como fertilizante químico, obligando a las plantas a tomar grandes cantidades de nitrógeno favoreciendo la acumulación de compuestos de nitrógeno tóxico. No hay pruebas directas de esto, pero existe la probabilidad.

Por esta razón, se recomienda dejar que los sedimentos "envejecan" unas cuantas semanas al aire libre (en barriles de petróleo, albercas de plástico), o bien, en recipientes cerrados durante unos cuantos meses, antes de utilizarlos en los cultivos.

El uso continuo de sedimentos en una zona determina la acidificación de los suelos, por lo que es conveniente agregar, en forma alterna piedra caliza o dolomita y sedimentos digeridos, permitiendo al menos un intervalo de dos semanas entre aplicaciones a fin de evitar la pérdida excesiva de nitrógeno; ya que la piedra caliza tiende a hacer que se evapore el amoníaco.

Cuando se fertilice un suelo con sedimento digerido, es preciso tomar en cuenta la estructura del suelo, y en general, al principio, se debe tener cuidado con las parcelas abonadas con sedimentos hasta que se familiarice con el comportamiento de los sedimentos.

Existen otras formas de utilización de los sedimentos del biodigestor tales como:

**Cultivos hidropónicos:** La hidroponía es el proceso de cultivar plantas directamente en una solución nutritiva, en lugar de hacerlos en la tierra. Los nutrimentos se proporcionan como sales solubles, o bien, como desechos orgánicos líquidos, procedentes de los afluentes o de los sedimentos digeridos. Las plantas cultivadas hidropónicamente sirven para muchos fines, y en general este sistema de cultivo es más productivo que el tradicional.

En el cultivo hidropónico, las plantas crecen en estanques poco profundos, llenos de una solución de sedimentos digeridos, diluidos y mezclados con grava y arena.

Los sedimentos proporcionan los nutrimentos, en tanto que la grava y arena constituyen el soporte que asegura el enrasamiento de las plantas. La construcción de estanques hidropónicos próximos a digestores orgánicos ofrece dos posibilidades complementarias referentes a la utilización de los productos generados por cada uno de ellos. En los estanques se obtienen residuos agrícolas que son empleados para alimentar al digestor, y de éste se obtienen los sedimentos para fertilizar el cultivo hidropónico. Esto traería como consecuencia la reducción en el consumo de energía para transportar los sedimentos a las diferentes zonas de cultivo. (Pichardo 1981)

Las principales ventajas del efecto fertilizante de estos lodos radican en lo siguiente:

- Poseen mayor cantidad de nitrógeno que la materia prima original en base seca, y este hidrógeno es más asimilable por las plantas.
- Es un buen material en el mejoramiento de los suelos.
- A diferencia del estiércol fresco, no posee olores desagradables.
- No contiene bacterias patógenas o semillas de malas hierbas, puesto que el proceso de digestión las elimina.

Un metro cúbico de bioabono producido diariamente puede fertilizar más de dos hectáreas de tierra por un año.

El incremento de la producción agrícola por uso de bioabono alcanza un promedio del 10-20%.

## 4. PARÁMETROS A CONSIDERAR PARA EL DISEÑO DEL BIORREACTOR.

### 4.1 DISEÑO DEL PROCESO

El diseño del proceso implica a varios parámetros entre los que se incluyen:

- Tiempo de retención de sólidos (TRS), días
- Tiempo de retención de hidráulico (TRH), días
- Carga de sólidos volátiles, kg SV/m<sup>3</sup>/día
- Tasa de producción de sólidos, kg SS/m<sup>3</sup>/día
- Tasa de producción de gas, m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/m<sup>3</sup> reactor/ día
- Configuración del tanque
- Sistemas de agitación
- Sistemas de calefacción

Es notable que la temperatura de operación predominante sea la mesofílica (38 °C). Esto también es así en Europa desde 1983, la tecnología de digestión anaerobia ha mejorado significativamente. Numerosas plantas de nueva construcción operan hoy día en condiciones Mesófilas con el objetivo de obtener mayores tasas de producción de gas aun con alto contenido en sólidos. Con sistemas de digestión sin recirculación, el tiempo de retención de sólidos es igual el tiempo de retención hidráulico. Se mantienen tiempos de residencia de fangos adecuados con el objetivo de reducir completamente los sólidos volátiles. El tiempo de retención de sólidos y el tiempo de retención hidráulico se define como:

$$TRS = \frac{\text{Masa de sólidos en el tanque, kg}}{\text{Tasa de eliminación de sólidos, kg/día}}$$

$$TRH = \frac{\text{Volumen de trabajo, l}}{\text{Tasa de eliminación de fango, l/día}}$$

Típicamente los fangos de aguas residuales urbanas necesitan un TRS no inferior a 10 días. Esto es debido a que la etapa microbiológica que limita el proceso es la etapa de crecimiento metanogénica de las bacterias que necesita alrededor de 10 días. Para lodos

mixtos se suelen emplear tiempos mayores ya sean urbanos industriales o agrícolas. Los márgenes de trabajo suelen ser entre 15 y 30 días La carga de sólidos volátiles se define como:

$$\text{Carga de SV} = \frac{\text{Sólidos volátiles añadidos diariamente, kgSV/día}}{\text{Volumen de trabajo del digestor, m}^3}$$

Los valores típicos están entre 2 y 3 kg SV/m<sup>3</sup>/d. Los valores de diseño pueden llegar a un máximo de 3.2, debido a que la toxicidad tanto del amoníaco como de los metales pueden limitar la operación (WEF, 1991). Las tasas de producción de gas se encuentran entre 0,5 t 1,5 m<sup>3</sup> de gas por kg de SV eliminado. Estas tasas dependerán en la temperatura del digestor siendo esta mayor cuando se alcancen condiciones termófilas. Hoy en día se eligen geometrías de tanque principalmente cilíndricas con diámetros entre 5 y 50 m y alturas entre 3 y 25 m. Algunos digestores poseen un diámetro mayor que su altura (como por ejemplo las unidades de lecho fluidizado), mientras que los que emplean la recirculación de gas como mecanismo de agitación pueden ser más altos que su diámetro. Lo construcción del tanque hoy en día se realiza casi siempre en acero. Los sistemas de agitación y calefacción pueden ser interdependientes. Todas las configuraciones de reactor tienen un aislamiento térmico. Entre los mecanismos de calefacción se incluyen bolsas exteriores de agua, tuberías exteriores aisladas, cambiadores de calor interiores, inyecciones de vapor o calefacción directa por llamada. Por ejemplo el calor necesario para elevar la temperatura del fango desde la temperatura ambiental de aporte hasta condiciones mesofílicas (38 °C) y mantenerlo a esta temperatura se calcula sencillamente con la expresión (WEF 1991):

$$H = WC\Delta T + UA\Delta T\Delta$$

Donde: H= calor necesario en el fango afluente compensando por las perdidas, kg cal/h.

W=caudal de fango afluente, kg/h

$\Delta T$ =diferencia entre la temperatura del digestor y la temperatura de lado afluente.

U =coeficiente de transferencia de calor a través de las paredes del tanque, cal/m<sup>2</sup>h°C

A =área superficial del digestor por lo que se producen perdidas de calor

C = capacidad térmica específica media del fango de aporte, aproximadamente 1 kg cal/kg C.

La agitación en el digestor se considera esencial para mantener una calidad de fango uniforme a efectos de prevenir bloqueo de las canalizaciones de entrada y las de salida de fango y gas. El mecanismo más simple de agitación fue la reintroducción de gas al propio tanque. Sin embargo, este sistema es antieconómico y en la actualidad se emplean directamente sistemas mecánicos. El método más común es el de recirculación por bombeo cuya línea de impulsión consiste en un tubo montado en el interior del tanque. Para mayor detalle referirse a WEF (1991).

El volumen de digestor discontinuo viene dado por Reynolds (1982) y por Fair et al. (1968) como:

$$V_s = \left[ V_i - \frac{2}{3}(V_j - V_f) \right] t$$

Donde:

$V_s$ = volumen del digestor.

$V_i$ = volumen inicial de fango.

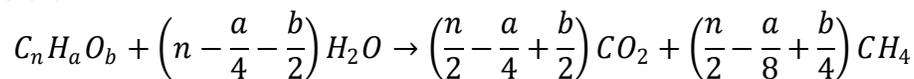
$V_f$ = volumen final del fango.

$V_j$ = volumen del fango en el digestor

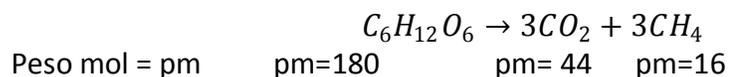
$t$ = tiempo de retención.

#### 4.2 Producción de metano

La cantidad de metano producida dependerá de varios parámetros, pero más concretamente del tipo de residuo, tipo de reactor, temperatura y contenido de sólidos. Bushwell y Mueller (1952) indicaron que la ecuación estequiométrica para la producción de metano era



Por ejemplo si se usa glucosa pura, entonces:



Es decir que 1 kg de glucosa produce  $3 \times 16/180=0,27 \text{ m}^3$  de  $\text{CH}_4$  igualmente 1kg de hidratos de carbono produce alrededor de  $-0,35 \text{ m}^3$  de  $\text{CH}_4$ .

Para reactores continuos de mezcla completa la tasa de producción de metano es (Tchobanoglous y Schroeder, 1987)

$$M_{\text{CH}_4}=0,35(nQC_i - 1,42r_gV)$$

Donde:

n=fracción de DQO biodegradable convertida (-0,85)

Q=caudal  $\text{m}^3/\text{s}$

$C_i$ =carga de DQO,  $\text{kg}/1$

r = tasas de crecimiento,  $\text{g}/\text{m}^3\text{s}$

V=volumen,  $\text{m}^3$

$M_{\text{CH}_4}$ = producción de metano  $\text{m}^3/\text{s}$

Como estimación preliminar de la producción de gas, si se ignora la tasa de crecimiento, entonces

$$M_{\text{CH}_4}=0,3QC_i$$

### 4.3 Cinética del proceso anaeróbico.

Anteriormente se abordó de manera general lo que ocurre en la digestión sin mencionar como influyen el tiempo y la temperatura en la reacción. Obviamente es indispensable tener un modelo que describa los procesos de digestión anaerobia para los propósitos de predicción, diseño y optimización.

La situación de la digestión anaeróbica es bastante compleja en comparación con la mayoría de las fermentaciones aeróbicas estériles. Esto se debe a la participación de varias poblaciones diferentes de organismos, a la naturaleza heterogénea de los sustratos típicos y la falta de linealidad resultante de diversos tipos de inhibición. La complejidad de la situación se puede deducir, en parte, analizando el siguiente cálculo de los valores de

crecimiento específico a 37°C en la figura 20 de las tres poblaciones que participan en la digestión según Bryant 1971. Los valores de  $\mu$  son aproximaciones.

Figura 20. Velocidades de crecimiento calculadas a 37°C para microorganismos involucrados en la digestión anaerobia.

Clase de organismo*	Tasa de crecimiento por $\mu^{**}$ , h <sup>-1</sup>
Formadores de ácido	0.1-0.3
Formadores de hidrógeno	?
Formadores de metano	0.1-0.03

\*La clasificación de organismos es de M. P. Bryant.

\*\* En donde  $\mu = \frac{1}{t} \ln \frac{N}{N_0}$  No= número inicial de bacterias.

Desde luego existe la posibilidad de que las poblaciones se desincronicen. Lo que con frecuencia ocurre es la formación excesiva de ácido, debida a una adición demasiado rápida de sustrato. En estas condiciones las productoras de metano no pueden utilizar el ácido con la misma rapidez con que se genera. El ácido producido puede entonces inhibir a las productoras de metano y disminuir o frenar por completo la producción del gas. En este punto el valor de  $\mu$  es de cero y la situación conocida como acidificación es grave y bastante difícil de corregir. Andrews 1971 ha desarrollado algunos modelos para esta situación. En general, se puede mejorar parcialmente mediante el uso de amortiguadores como los que se encuentran normalmente en el estiércol de bovinos y otros animales. En muchas ocasiones los productores de metano se "acostumbran" a los altos niveles de ácidos y generan metano después de haber sobrepasado lo que se puede considerar como una fase de retardo en el crecimiento. Para evitar el problema de acidificación con frecuencia se utiliza una práctica de digestión que consiste en añadir el sustrato tan lentamente como sea necesario para que la tasa de producción de ácido y otros productos intermediarios se mantenga baja al limitar el sustrato. De esta manera los productores de metano, último eslabón de la cadena, son capaces de utilizar hidrógeno y los ácidos precursores en la misma cantidad que se producen. En este caso donde la tasa de dilución D es menor que  $\mu$ , la hidrólisis superficial del sustrato constituye una limitante y es de esperarse que la dinámica se simplifique y también que también se puedan utilizar las correlaciones como las del modelo de Monod para predecir el comportamiento microbiano. Sin embargo; la situación sigue siendo complicada. En primer lugar, algunas partes del sustrato celulósico son más refractarias que otras. En segundo lugar en la mayoría de los sistemas reales, de digestión la distribución del tamaño de las partículas es altamente heterogénea, y por lo tanto es muy difícil predecir el comportamiento de la fermentación cuando la tasa  $\mu$  es proporcional al área superficial.

Entonces, dada esta compleja situación ¿Cómo puede predecirse el comportamiento de un biorreactor? Se trata de saber si un modelo sencillo puede ser útil en la práctica. Datos de diversas fuentes mostraron que la relación y las predicciones del modelo son insostenibles.

El modelo de la figura 21 da por hecho de que la manera en que se completa el proceso de rendimiento de gas o e conversión es exponencial. Las figuras 21, 22 y 23 muestran los datos típicos. La figura 23 muestra en particular lo que sucede en realidad: se usaron ajuste por mínimos cuadrados y estos no fueron perfectos (Monroy y Viniestra 1981). Los resultados se resumen en la figura 24. Aunque el ajuste no es perfecto, es lo bastante bueno como para ser utilizado. El ajuste es lo particularmente significativo si se considera que contiene los resultados de sistemas mezclados y estáticos y que abarca los resultados obtenidos con diferentes sustratos, tales como los desechos sólidos municipales y el estiércol. (Boshoff 1977).

#### MODELO

$$\frac{Y}{Y_{max}} = 1 - e^{-kt}$$

Donde:

Y es rendimiento al tiempo t

$Y_{max}$  es rendimiento máximo

K: constante específica de reacción.

#### PREDICCIONES

Intermitente  $Y = Y_{max} (1 - e^{-kt})$

Continuo  $Y = Y_{max} \frac{kt}{1+kt}$

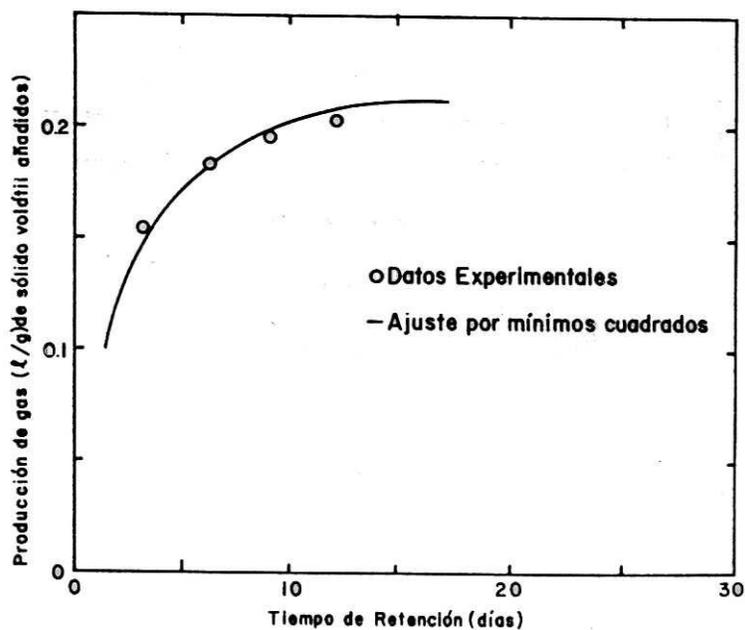


Figura 21: Datos de producción de gas.

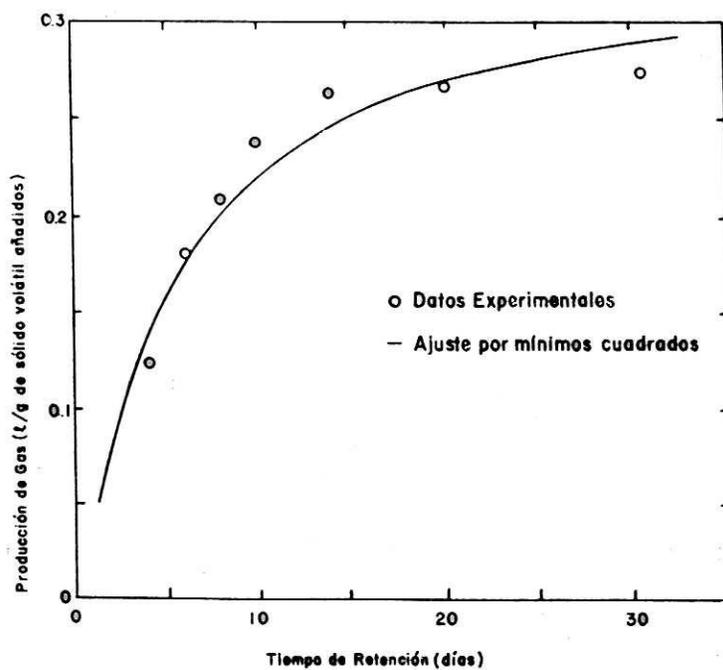


Figura 22: Producción de gas.

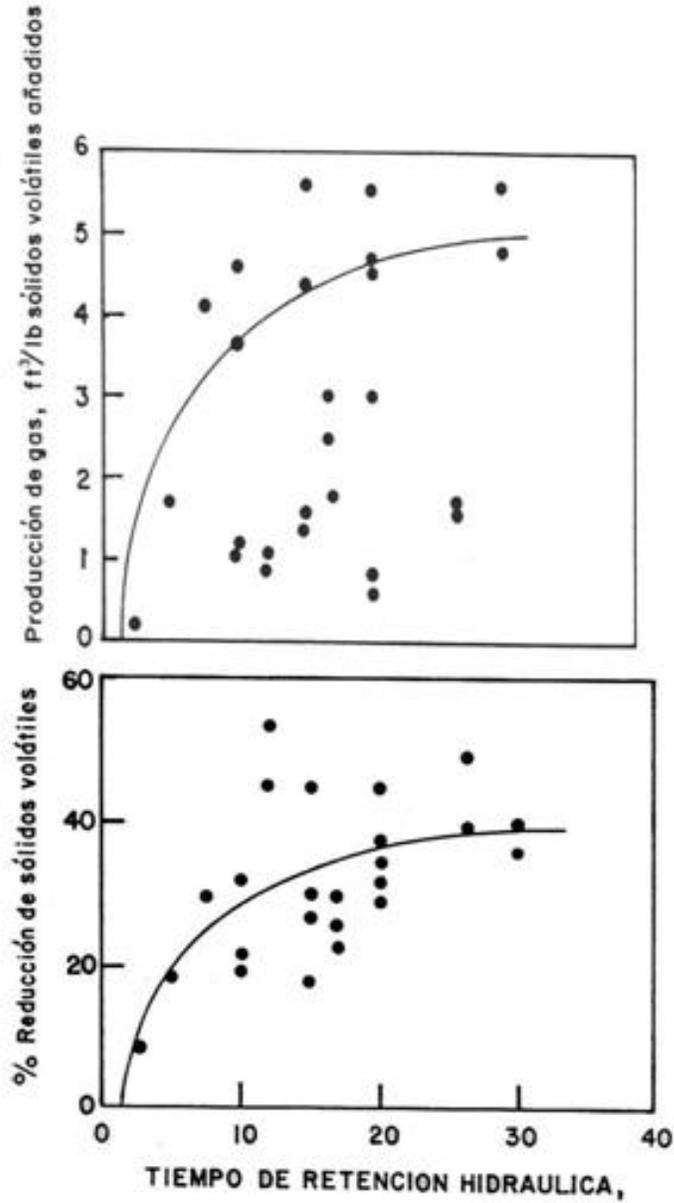


Figura 23: Representación gráfica de una compilación de datos de la digestión anaerobia de desperdicios de ganado lechero.

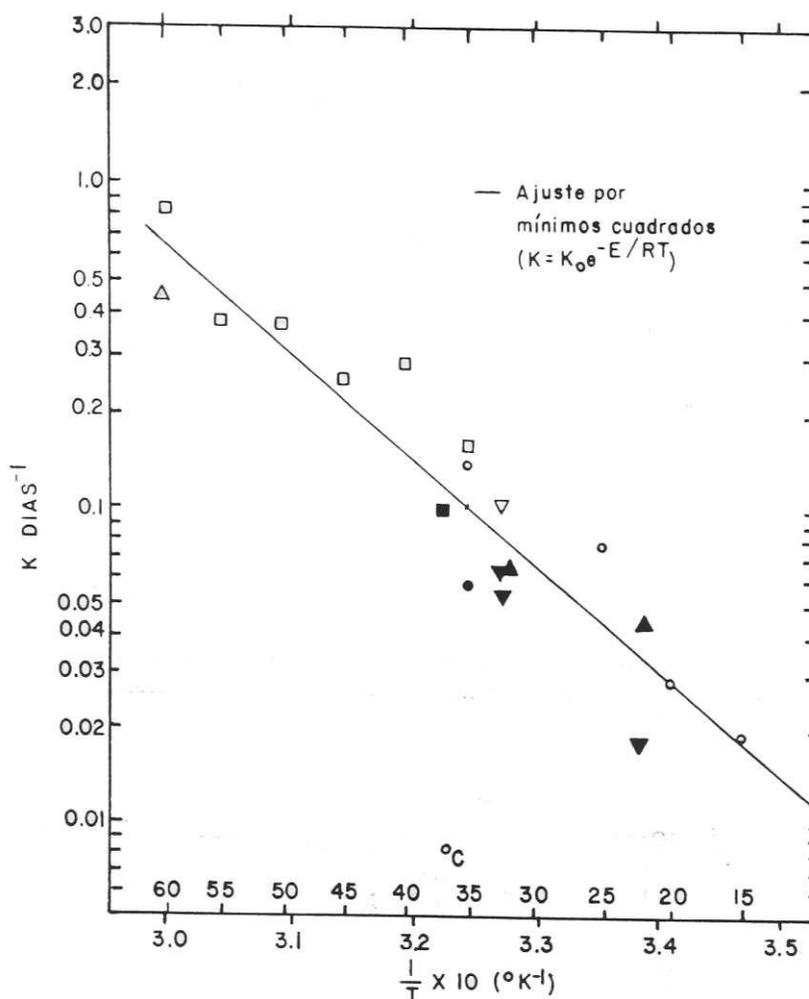


Figura 24: Constante específica de reacción como una función de la temperatura.

#### 4.4 Aspectos microbiológicos

El método principal por el cual se genera energía por procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento tal como biosíntesis y transporte de solutos en la respiración de procariontes es el acopiamiento del flujo de electrones en las membranas con lo cual genera un gradiente electroquímico de protones. En este proceso los electrones fluyen desde un compuesto (el donador) hasta otro u otros (el o los aceptores finales de electrones), a través de una serie de proteínas acarreadoras de electrones y una clase de lípidos llamados quinonas. Este mecanismo en el que los electrones fluyen a través de acarreadores en las membranas se conoce como respiración. Si el aceptor final de electrones es el oxígeno, el flujo de electrones se conoce como respiración aeróbica. Si no es el oxígeno el aceptor final, entonces al flujo de electrones se llama respiración

anaerobia. La translocación de protones tiene lugar en "sitios de acoplamiento". La energía para generar el potencial de protones se deriva de la diferencia de los potenciales de electrones ( $\Delta E_h$ ) de los acarreadores de electrones. En otras palabras, las membranas de las células procariontes convierten una diferencia de potencial de electrones,  $\Delta E_h$ , en una diferencia de potenciales electroquímicos ( $\Delta p$ ). El potencial de protones se utiliza para conducir el transporte de solutos, síntesis de ATP, movimiento de flagelos, y otras actividades de la membrana. En la mitocondria (el organelo celular donde se lleva a cabo el proceso de respiración), la ruta de transporte de electrones es más o menos similar. Sin embargo, los procariontes son tan diversos que sus mecanismos para el transporte de electrones son diferentes dependiendo del donador primario y del aceptor final de electrones.

#### Respiración aerobia y anaerobia

Como se apuntó arriba, el proceso de respiración puede ser aerobio o anaerobio. Existe un flujo de electrones a través de los acarreadores de electrones en las membranas de las células procarióticas desde los donadores de electrones de bajo potencial (los donadores primarios o compuestos *reductores*) hasta los aceptores de electrones de alto potencial (los aceptores finales o compuestos *oxidantes*). Los aceptores de electrones como ya se mencionó pueden ser el oxígeno o algún otro aceptor inorgánico como el nitrato o sulfato. Un ejemplo de un aceptor orgánico de electrones es el fumarato. Por lo tanto, hay "respiración de oxígeno, respiración de nitrato", etc.

#### Acarreadores de electrones

En el proceso de respiración se mencionó que los electrones fluyen a través de una serie de acarreadores de electrones.

1. Flavoproteínas
2. Quinonas
3. Proteínas hierro-azufre
4. Citocromos

Los electrones no son acarreados propiamente en la proteína, sino por moléculas enlazadas a la proteína. La porción no proteica que acarrea los electrones se llama *grupo prostético*.

#### 4.5 Consideraciones acerca de la transferencia de masa en la digestión.

Las consideraciones existentes de la transferencia de masa pueden servir para ver qué pasos de dicha transferencia serían limitantes para el proceso.

En primer lugar, es importante ver si la difusión del ácido orgánico del sustrato hacia los microorganismos podría ser una limitante para la metanogénesis. Para lograr esto es necesario definir una situación "normal" de las condiciones de operación. Ciertos valores se pueden estimar con precisión y para otros tendrán que hacerse predicciones aproximadas. En la figura 25 se muestran los parámetros escogidos para este análisis. Los datos del 1) al 4) representan condiciones estándar y los del 5) al 9) predicciones aproximadas. Los niveles de estado no estacionario de los microorganismos, el área de microorganismos por unidad de volumen y la tasa de transferencia volumétrica de ácido, siguen la secuencia del 5 al 9. Con esta información y el coeficiente requerido para transferir el ácido necesario a los microorganismos y comparándolo con los niveles de ácido que se sabe existen en los digestores, se escoge un número Sherwood de 2, que será bajo tomando en cuenta que se podrá aumentar a causa de condiciones de régimen permanente de flujo de fluido que no entra en contacto con los microorganismos o de la presencia de fuentes cercanas. En la figura 25 se muestra, un ejemplo, en el que utilizando relaciones clásicas de transferencia de energía, encontramos que el gradiente de concentración entre la fase líquida y microorganismos es de aproximadamente  $10^{-5}$  mol/l.

Aunque es obvio que existe una inseguridad en los cálculos realizados, el gradiente será aproximadamente pequeño, aún tomando en cuenta dicha inseguridad, en comparación con los niveles de ácido que se observan normalmente en los digestores;  $>1\text{mmol/l}$ . Los cálculos indican que el organismo metanogénico básicamente "se da cuenta" del nivel global de ácido del líquido y que la resistencia difusional, aun sin agitar, es infinitesimal. Sin entrar en detalles debe señalarse que las resistencias calculadas para la difusión de ácido a partir de productores de ácido es también infinitesimal. Se puede hacer el mismo cálculo para la difusión de azúcares a partir de partículas sólidas de sustrato. Este cálculo muestra que la resistencia difusional puede volverse significativa con partículas mayores de 1mm. Sin embargo; se aumentará, la transferencia de azúcares hidrolizados a partir de las superficies de las partículas, debido a la acción de los organismos que las rodean y que funcionan como sumideros.

Figura 25: Cálculos de transferencia de masa para microorganismos en digestores típicos.

PARÁMETRO	VALOR
1) Productividad volumétrica del digestor VVD, CH <sub>4</sub>	1.0 día <sup>-1</sup>
2) Sólidos de entrada en peso	10%
3) Conversión fraccional de sólidos (p/p)	35%
4) Tiempo de retención	15 días
5) Fracción de DBO consumido por los organismos	15%
6) Nivel de oxidación (g DBO/g sólidos)	1.2
7) Contenido de sólidos de los microorganismos	25%
8) Diámetro de microorganismos (Dm)	2x10 <sup>-4</sup>
9) Tasa de difusión de acetatos en líquidos	10 <sup>-5</sup> cm <sup>2</sup> /seg
10) Densidad de microorganismos	1.05 kg/l

### CÁLCULOS

A: De (1)- (5) R= Tasa de consumo de acetato=  $5.8 \times 10^{-4}$  m mol/l seg.

B: De (5)-(10): concentración de peso húmedo de microorganismos= 20 g/l

C: De (8), (A) y (B) área de microorganismos=  $6 \times 10^5$  cm<sup>2</sup>/l

Usando:

$$\frac{K_L D_m}{D_L} = 2 \text{ de } 8), K_L = 0.1 \frac{\text{cm}}{\text{seg}} = 3.6 \frac{\text{m}}{\text{hr}}$$

D: Si  $K_L a (C^o - C)^*$

\*C<sup>o</sup>-C= gradiente de concentración de lactato entre el seno del líquido y organismos=  $9.7 \times 10^{-6}$  m mol/l (Monroy y Viniegra 1981).

Para el caso del ejemplo se deberá considerar dos aspectos: el primero es el cálculo aplicado a una dispersión bien mezclada y obviamente la difusión puede ser una limitante, tal vez incluso absoluta, si el sustrato se encuentra en un nivel del reactor y los organismos en otro. Se necesita agitar lo suficiente para obtener una dispersión uniforme. En segundo lugar, se podría argumentar que el acorazamiento o la aglutinación de los microorganismos podrían llegar a incrementar significativamente la resistencia difusional. Sin embargo, con base en este cálculo, parece que el grado de acorazamiento o de

aglutinación tendría que ser extremo para llegar a impedir de manera significativa la transferencia de masa.

Este análisis de la transferencia de masa se presenta por dos razones fundamentales: primero, la agitación cuesta dinero y energía y se debería de disponer de ciertos criterios para acerca de cuál será el mínimo de agitación necesario según el tipo de sistema y en qué momento aplicarla; segundo: los resultados de los cálculos difusionales señalan la posibilidad de diseñar algunos sistemas estáticos que de otra manera no se tomarían en cuenta sobre la base de la teoría anaeróbica clásica y las aplicaciones que de ella se hacen en el tratamiento de aguas negras.

#### **4.6 Efectos térmicos: generación y pérdida por conducción.**

Se sabe que la entalpía de producción de metano llega a las 13kcal por gramo-mol de metano formado a partir de la celulosa. Aunque cierta cantidad de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) en el sustrato se convierte en biomasa, existen razones para pensar que el cambio de entalpía asociado a esta conversión es pequeña y que por lo tanto se transferirán 13 kcal de calor al sistema de digestión por cada g-mol de metano producido. Este calor puede llegar a ser significativo. Se puede analizar desde dos perspectivas: como el 8% del calor de combustión del metano producido o como  $0.6 \text{ cal/cm}^3$  de metano producido. En el ejemplo que se presenta en los cálculos de transferencia de masa el calor liberado es suficiente para aumentar a cerca de  $8^{\circ}\text{C}$  la temperatura del digestor si el sistema fuera adiabático. Para el caso de un biorreactor que trabaja, por ejemplo, al 48% de sólidos con desechos municipales, el aumento de temperatura será mucho mayor, entre  $30\text{-}35^{\circ}\text{C}$ . En apoyo a estos cálculos está el hecho de que el gas proveniente de los rellenos sanitarios se genera a  $15^{\circ}\text{C}$  por encima de la temperatura ambiental, lo que sería característico de las etapas intermedias de la digestión. Este efecto de calentamiento puede acelerar la reacción. Por ejemplo se ha calculado que el efecto del calentamiento acelera notablemente el término de la digestión en un reactor grande adiabático de rellenos sanitarios. En el caso de que la temperatura inicial fuera de  $13^{\circ}\text{C}$ , el proceso tomaría más de 10 años en completarse si la temperatura permaneciera constante. Pero el efecto de calefacción reduce el requerimiento de tiempo a menos de dos años (Aungenstein 1976) esta es la ventaja de sistemas de alto contenido de sólidos.

La pérdida de calor por conducción se ha examinado en diversas situaciones, pero definitivamente no en todas. Se ha mostrado que en los digestores grandes convencionales ( $> 0 =$  que  $5000 \text{ m}^3$ ), las pérdidas de calor por conducción son pequeñas en relación con otros requerimientos (Kispert, 1997). Lo mismo sucede con los rellenos

sanitarios profundos y de superficie grande en donde las pérdidas térmicas son pequeñas que se puede considerar sistema adiabático y se retiene el calor de la metanogénesis. En los sistemas de hoyo o de trinchera de escala intermedia (50-1000 m<sup>3</sup>), la pérdida de calor a través de la tierra que los rodea es inestable y depende del tiempo, pero según los cálculos, a groso modo, aproximadamente igual al 10% de valor calórico del gas producido.

La pérdida dependerá del tamaño del reactor, la geometría y la conductividad térmica del suelo que los rodea. Se ha determinado con facilidad que los coeficientes de transferencia de calor en la superficie de un digestor de pozo no aislado, es superior en varios órdenes de magnitud al de la pérdida a través del suelo circundante. Por lo tanto se deberá aislar la superficie si se quiere operar el sistema a temperaturas elevadas. Un aislante con una fracción elevada de espacio hueco y con un espesor de 15 cm reducirá el coeficiente de transferencia de calor a un nivel comparable al del suelo circundante. Una manera de hacer esto es añadir al biorreactor una cantidad adecuada espuma de poliestireno que se usa para empacar.

El análisis de los efectos térmicos en los digestores de menor escala (menor a 50m<sup>3</sup>), está lejos de completarse. Por razones de escala las pérdidas térmicas serán altas en pequeñas unidades con calefacción respecto al contenido calórico del nivel producido. La situación debe analizarse detalladamente para determinar el tamaño por encima del cual resulta práctico calentar y aislar y debajo de lo cual más práctico dejar que la temperatura tienda a ser la del ambiente y se estabilice en la situación cinética que se obtiene en estas condiciones.

## 5. SISTEMA EXPERIMENTAL DE DIGESTIÓN ANAEROBIA.

Para la construcción de un biorreactor anaerobio, es importante realizar un biorreactor piloto, para poder determinar y modificar variables, que nos lleve a un mejor diseño a escala y posterior operación. Es por eso que se construyó un biorreactor piloto en el Laboratorio de Desarrollo de Procesos para el Tratamiento de Residuos, de la FES "Zaragoza" Campus II en conjunto con el Laboratorio de Investigación T-1422 de Ingeniería Química, ubicado en la planta piloto de la misma facultad.

Si bien es cierto que la composición y la naturaleza de los desechos tienen gran influencia en la producción de biogás, no hay que dejar de lado las condiciones en las que se piensa operar, ya que estas juegan un papel determinante en la eficiencia del reactor.

Por otro lado, teniendo en cuenta que la inversión para la construcción de este biorreactor en campo, la hará un granjero, hay que considerar de manera muy especial los costos, es decir no podemos hablar de un sistema automatizado completamente, sino más bien será controlado manualmente.

El diseño piloto se realizó con base a datos de la literatura y se partió de la siguiente tabla:

ANIMAL	ESTIERCOL ( kg )	lt bioqas/ kg	TOTAL (lt bioqas)
BOVINO	10.5	60	600
PORCINO	2.5	78	195
AVES	0.2	62	12.4

Tabla 19: CIPAV, Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de producción Agropecuaria. Colombia, 2004

Estos balances de masa se realizaron a ciertas condiciones de temperatura y de dilución de biomasa; de 1:4 es decir 1 parte de estiércol por 4 partes de agua, lo que nos da un total de 5 partes, el 5 más adelante será un factor importante para calcular el volumen total del biorreactor.

Teniendo en cuenta este balance y manteniendo las condiciones de dilución de biomasa se hizo un cálculo para 1 kg de estiércol y 4 litros de agua; sin olvidar que la digestión anaerobia de la materia orgánica genera espumas, se sobrediseñó a un volumen de 9l, lo que nos hace tener un biorreactor al 55.6% de su capacidad. El restante 44.4%

del volumen, puede ser utilizado por las espumas o por un posible exceso de biogás, en caso de no ser monitoreado diariamente para su cuantificación.

Para el almacenamiento de biogás se diseñó una campana de almacenamiento de gas, denominada de almacenamiento húmedo (Constant, et al.; 1981), esta campana va midiendo el volumen del gas por desplazamiento de volumen de agua. Teniendo en la tabla 19 se liberan 78 l de biogás por kg de desecho porcino y que se liberan 62 l de biogás por kg de desecho avícola (estos datos se tomaron a 45 días de retención hidráulica y temperatura de 40 a 50°C). La campana de almacenamiento quedó diseñada con un volumen de 7 l para medir el volumen de gas generado cada día.

### 5.1 Material y equipo.

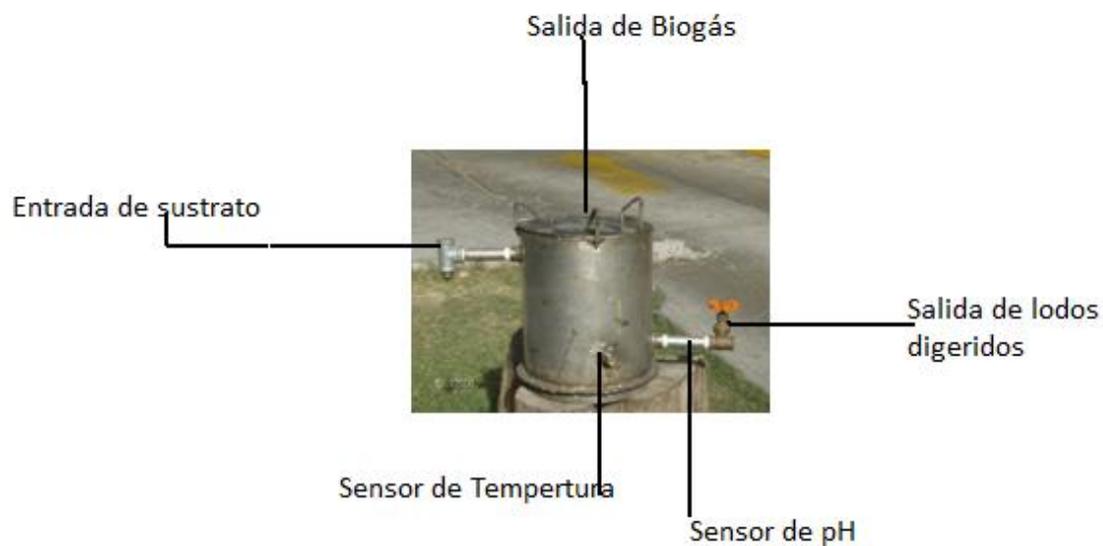
- Acero inoxidable
- Fibra de vidrio
- Herramienta del taller (pinzas, llaves, etc.)
- Válvulas
- Codos
- Tubos "T"
- Tubos de plástico de diferentes diámetros

### Equipo

- Compresora
- Sensor pH *Logger Pro*, Vernier Lab Pro
- Sensor de temperatura acero inoxidable *Logger Pro*, Vernier Lab Pro
- Interfaz para sensores *Logger Pro*, Vernier Lab Pro
- Computadora
- Equipo de venoclicis
- Equipo para soldar

## 5.2 CONSTRUCCIÓN Y MÉTODO

Se construyó un biorreactor de 9l de capacidad de acero inoxidable de flujo semicontinuo, con dos orificios, para sensores de temperatura y pH. Como lo muestra la siguiente imagen.



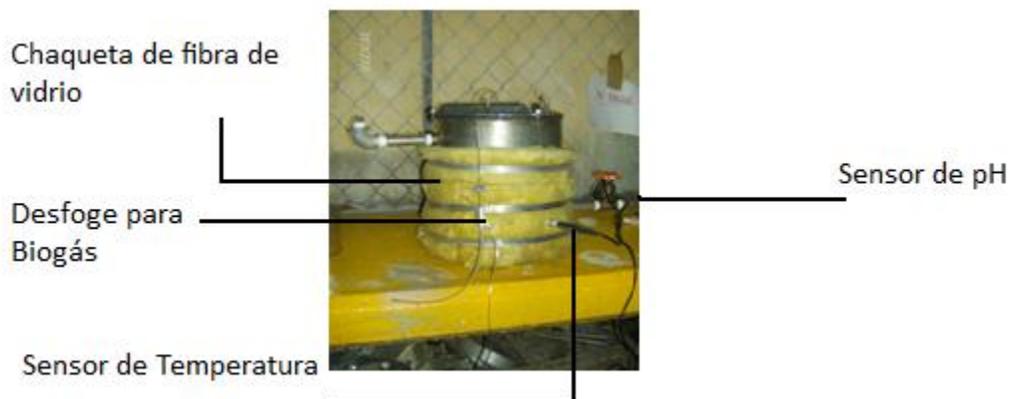
Se realizaron pruebas con aire y agua para el control de fugas, para posteriormente eliminarlas volviendo a soldar, como lo muestra la imagen.

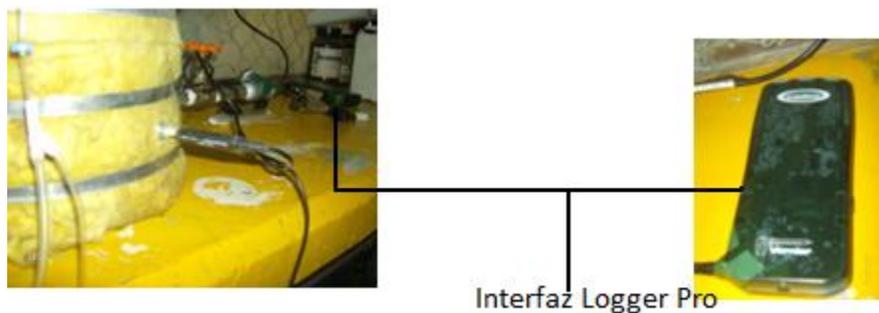


Las pruebas de agua y aire se dejaron de realizar hasta que ya no se encontraron fugas en ninguna parte del sistema, como lo muestra la siguiente imagen.



Posteriormente se configuraron los sensores de pH y temperatura de la marca Vernier, para el registro de estas variables durante 457 h, para colocarlos en el reactor. El reactor se enchaquetó con fibra de vidrio para conservar mejor la temperatura y se colocaron los sensores, como se muestra en la siguiente imagen.





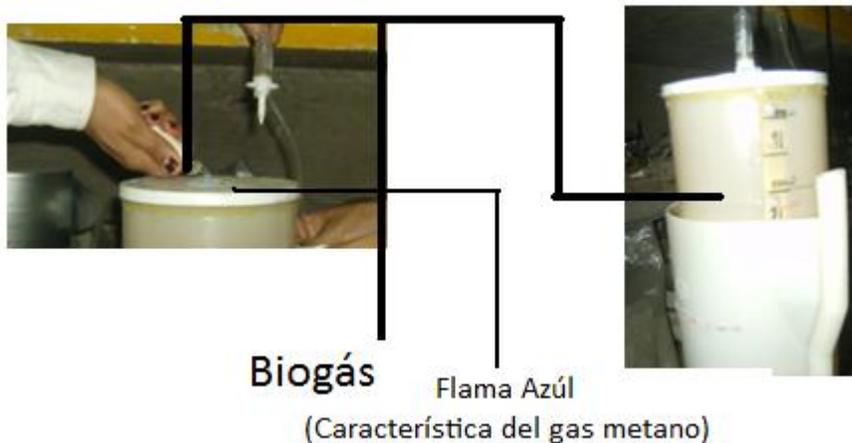
Al término, también se realizaron pruebas de Demanda Química de Oxígeno DQO, Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO y Sólidos Suspendedos Totales SST al sustrato a la carga y a la descarga de proceso de digestión.

### 5.3 Resultados

La interfaz se configuró para que registrara durante 20 días, lecturas de temperatura y pH cada hora. A continuación se muestran las mediciones y gráficas promedio obtenidas y además las gráficas de las 457 tomas realizadas por la interfaz.

Además diariamente se purgaba el sistema para cuantificación de biogás producido por día y se hicieron pruebas de flamabilidad, para asegurarse si el gas almacenado contenía metano.

El biorreactor estuvo operando por 20 días.



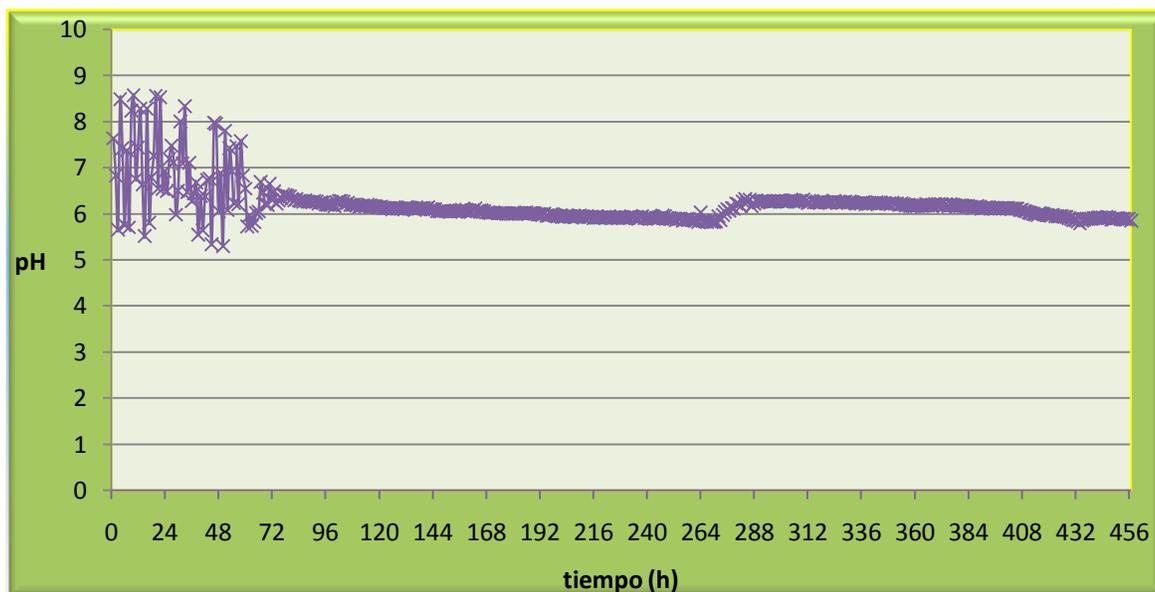


Figura 26: Resultados pH por hora en el biorreactor.

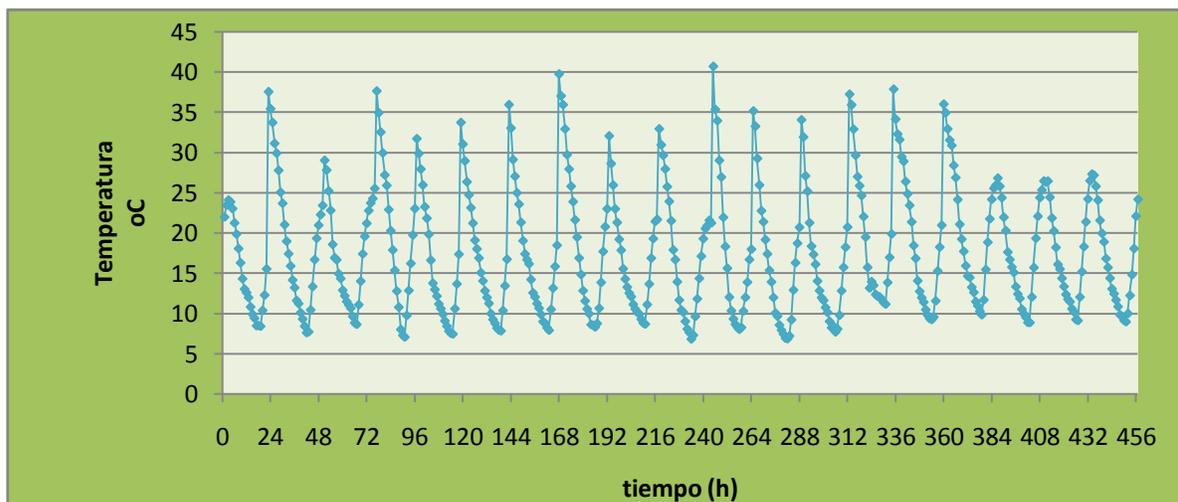


Figura 27: Resultados de Temperatura en °C por hora en el biorreactor.

<b>Día</b>	<b>Temperatura prom (°C)</b>	<b>pH prom</b>	<b>Biogás (ml)</b>
1	19.9636364	7.13332818	0
2	18.7829167	7.12319375	0
3	16.36625	6.62294	190
4	19.8691667	6.26151792	0
5	17.4066667	6.24570208	300
6	16.6441667	6.15100083	320
7	16.98375	6.09281458	500
8	19.2625	6.04478167	1200
9	16.2320833	5.99010833	600
10	17.9456818	5.93289792	300
11	18.1079167	5.9205975	1000
12	16.5754167	5.8840825	500
13	15.5599317	6.23359542	100
14	18.15375	6.26776708	0
15	20.3925	6.24335958	0
16	19.6258333	6.19786375	0
17	17.7566667	6.16291167	0
18	17.2925	6.06801667	0
19	17.4266667	5.90849125	0
20	13.39	5.89939786	0

Tabla 20: Datos promedio de temperatura, pH y producción de biogás.

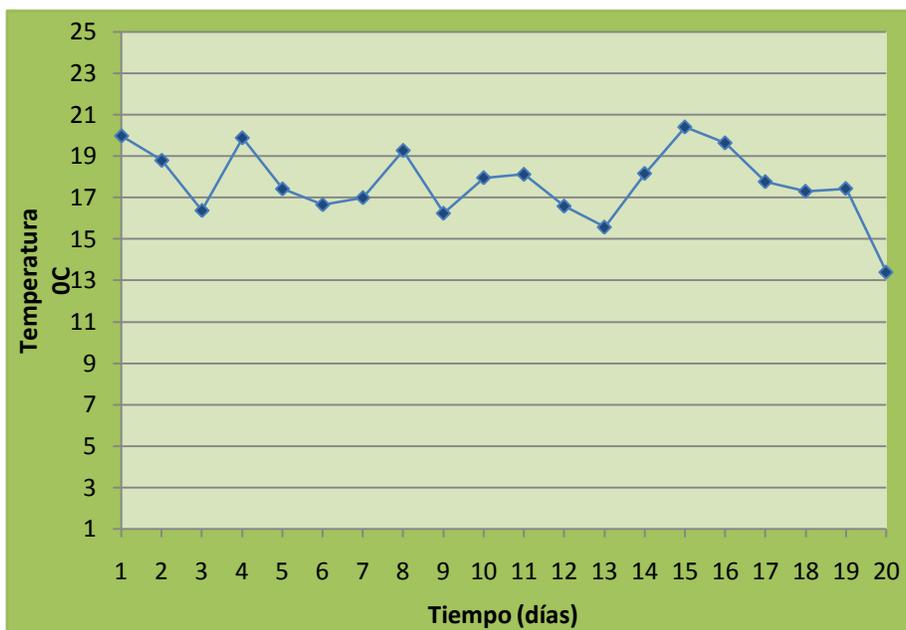


Figura 28: Temperatura promedio por día en el biorreactor.

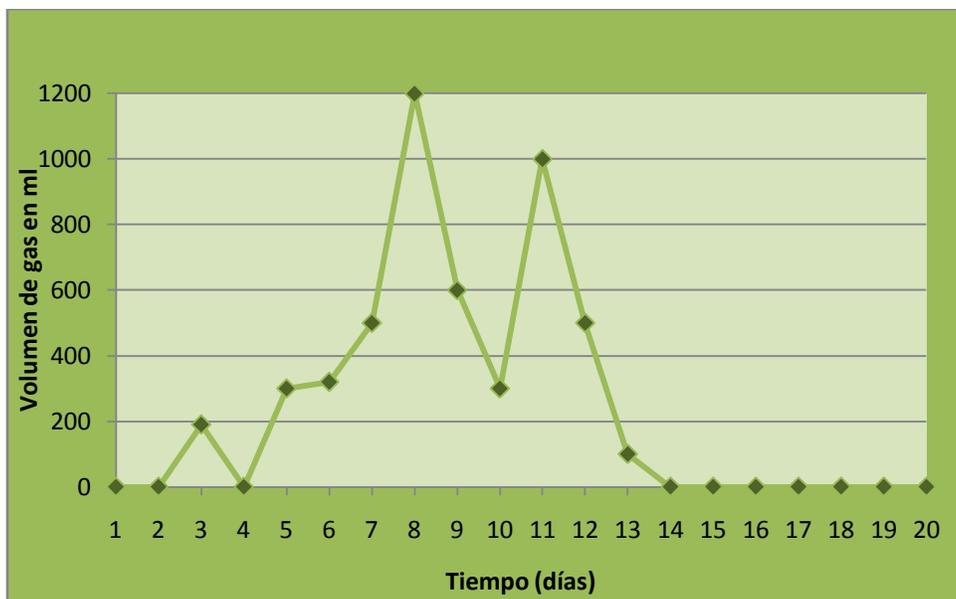


Figura 29: Producción de biogás por día en el biorreactor.

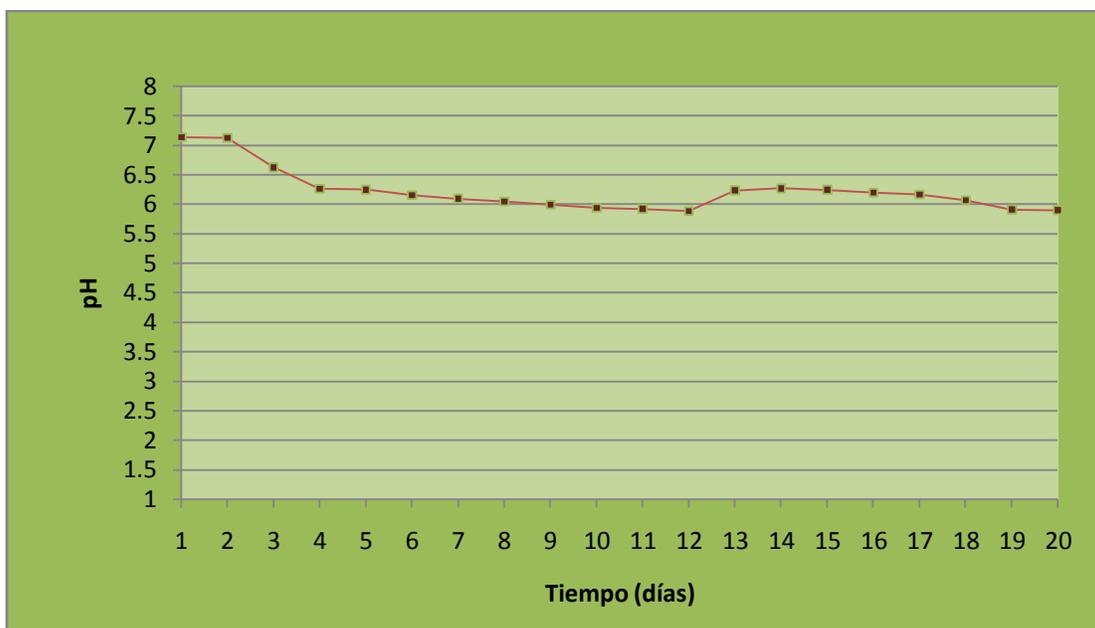


Figura 30: pH promedio por día registrado en el biorreactor.

**Pruebas químicas:**

Prueba	Carga	Descarga	Incertidumbre	Método
DBO(mg/l)	8476.59	7669.30	8.26	NMX-AA-28
DQO(mg/l)	14342.4	13346.4	6.74	NMX-AA-34
SST(mg/l)	5900	4700	1.66	NMX-AA-34

Tabla 21: Resultados de pruebas químicas.

**5.4 Discusión de resultados**

Podemos darnos cuenta lo importante que es el pH para la producción de biogás, como podemos ver en la gráfica promedio de pH nos damos cuenta que entre los días 13 al 20 el pH disminuyó considerablemente (figura 30) y eso influyó en que no hubiera producción de biogás (figura 29) esos últimos días, ya que los valores de biogás fueron cercanos a cero.

El laboratorio donde se desarrolló este experimento, es un lugar bastante frío, por lo que hubo que calentar la mezcla intermitentemente lo que nos hizo tener variaciones de temperatura muy marcadas, esto pudo afectar a las bacterias metanogénicas, ya que su actividad celular es muy sensible a cambios de temperatura y pH, esto evidentemente no sucederá en la granja ya que las variaciones de la temperatura como podemos ver en el anexo no son bruscas, pero si es importante considerar en el diseño el descenso de temperatura por la noche; muchas veces, la fermentación biológica es una fuente importante de calor, por lo que en la mayor parte de los casos, sólo hay que tratar mantener la temperatura constante.

Analizando las gráficas podemos concluir que a mayor temperatura menor es el tiempo de retención, que mientras más baja el pH la producción de biogás va disminuyendo.

Una consideración muy importante que se puede hacer para la propuesta del diseño a escala será aumentar el tiempo de retención ya que el DQO y DBO no disminuyeron considerablemente como se esperaba, lo que nos hace pensar que no hubo suficiente actividad celular, por parte de las bacterias metanogénicas.

**INTEVALOS PARA DETERMINAR CALIDAD DE SOBRENADANTES EN BIORREACTORES DE DIFERENTES PLANTAS DE BIOGÁS.**

	Primary Plants (mg/l)	Trickling Filters* (mg/l)	Activated Sludge Plants* (mg/l)
Suspended solids	200-1,000	500- 5,000	5,000-15,000
BOD <sub>5</sub>	500-3,000	500- 5,000	1,000-10,000
COD	1,000-5,000	2,000-10,000	3,000-30,000
Ammonia as NH <sub>3</sub>	300- 400	400- 600	500- 1,000
Total phosphorus as P	50- 200	100- 300	300- 1,000

\* Includes primary sludge.

Tabla 22: Intervalos de DQO, DBO y SST para sobrenadantes en biorreactores de diferentes tipos de plantas de biogás.

## 6. PROPUESTA DEL DISEÑO DEL BIORREACTOR PARA LA GRANJA VILLAVICENCIO.

### 6.1 Aspectos básicos del diseño

Hay básicamente dos enfoques para el diseño de reactores anaerobios

1. El método tradicional o empírico que, basado en años de experiencia, propone valores de carga orgánica y predice un cierto grado de eliminación de materia orgánica y a pesar de la complejidad de la digestión anaerobia, el método tradicional ofrece buenos resultados, siempre y cuando se diseñe dentro de los límites que marque la experiencia. En caso contrario, la extrapolación a otras situaciones puede ser peligrosa debido a que pueden existir variaciones significativas en cuanto a operación dependiendo del sistema de digestión en cuestión.

2. El método conceptual, en el cual se simulan matemáticamente los procesos biológicos, químicos y/o físicos involucrados en el reactor, para predecir la eficiencia de remoción. Por su parte, el método conceptual relaciona las principales características de los fenómenos involucrados, de manera que se pueda generalizar la aplicación del modelo de diseño. Esto necesariamente lleva a procedimientos relativamente complejos, y con frecuencia los modelos derivados de este enfoque no se aplican en el diseño sino más bien, haciendo algunas simplificaciones, se aplican en simulación y control de procesos. En general, un proceso anaerobio puede diseñarse para dos fines, obtener una alta productividad de metano ( $\text{m}^3 \text{CH}_4 / \text{m}^3_{\text{reactor}} \text{ día}$ ) aprovechando energéticamente el desecho, o una alta eficiencia de remoción de materia orgánica para el control de la contaminación. A continuación se describen en forma breve los parámetros más relevantes para el diseño de reactores anaerobios.

## 6.2 Volumen del biorreactor.

Es el volumen de biomasa que se va a tratar y viene dada por la siguiente ecuación:

$$V_R = (\text{Producción, estiércol } \times \text{ animal/día})(\# \text{ animales})(5)(\text{tiempo de retención})$$

## 6.3 Carga orgánica másica ( $B_x$ )

La carga orgánica másica ( $B_x$ ) se interpreta como la masa de sustrato (kg DQO) que se alimenta por unidad de biomasa (kg SSV) y por unidad de tiempo (se debe tener cuidado con material particulado en el lecho puro que no es biológicamente activo). La  $B_x$  máxima de diseño y operación para reactores anaerobios es de 1 kg DQO/kg SSV día a 35°C y trabajar a cargas mayores provocaría la acidificación del reactor. Por lo general, los reactores anaerobios se operan a cargas orgánicas másicas, del orden de 0.5 kg DQO/kg SSV día. Lo que da un factor de seguridad. Para el cálculo de carga orgánica másica se utiliza la siguiente ecuación:

$$B_x = \frac{QS_o}{X_r V}$$

Donde:

V= Volumen del reactor ( $m^3$ )

Q= Gasto ( $m^3/d$ )

$S_o$ = Concentración de sustrato (kg SSV/ $m^3$ )

$B_x$ = Carga orgánica másica (kg DQO/kgSSV d)

$X_r$ = Concentración de biomasa dentro del reactor (kg SSV/ $m^3$ ).

En la práctica es muy difícil determinar realmente el contenido o concentración de biomasa dentro de los reactores anaerobios avanzados (concretamente en los reactores empacados). Debido a esto, la carga orgánica másica no se emplea para diseño, a pesar de involucrar a la biomasa, responsable de la degradación de la materia orgánica.

#### 6.4 Carga orgánica volumétrica ( $b_v$ )

La carga orgánica volumétrica ( $B_v$ ) es la cantidad de sustrato (kg DQO) que se introduce por unidad de volumen de reactor ( $m^3$ ) por unidad de tiempo. Este es el parámetro más utilizado en el diseño de reactores anaerobios, aún cuando no toma en cuenta la verdadera variable de diseño, que es el contenido de sólidos suspendidos volátiles activos (biomasa) del reactor. Sin embargo, no todos los reactores, ni del mismo tipo, tienen igual cantidad de biomasa por unidad de volumen. Por esto, aunque a  $B_v$  realmente no es la variable de diseño más adecuada, se sigue empleando por tradición y es útil con fines comparativos. El cálculo de la carga orgánica volumétrica es como sigue:

$$B_x = \frac{QS_o}{V} \dots\dots\dots 2$$

en kg DQC/ $m^3$  día, o bien de la siguiente forma:

$$B_v = \frac{S_o}{TRH} \dots\dots\dots 3 \text{ y además}$$

$$(B_v) = (B_x)(X_r) \dots\dots\dots 4$$

Donde:

$B_x$  = Carga orgánica volumétrica (KgDQO/  $m^3$  día)

$V$  = Volumen del reactor ( $m^3$ )

$Q$  = Gasto ( $m^3$ /día)

$S_o$  = Concentración de sustrato (kg DQO/ $m^3$ )

$TRH$  = Tiempo de retención hidráulica (día)

### 6.5 Tiempo de retención celular (TRC)

El tiempo de retención celular se define como el tiempo (días) que permanece la biomasa dentro del reactor. En reactores completamente mezclados, el tiempo de retención celular tiene mucha aplicación como variable de diseño no así en reactores de película fija donde la biomasa no tiene distribución homogénea, además de la dificultad para medir la concentración de SSV dentro del reactor. La relación de cálculo es la siguiente:

$$TRC = \frac{X_r V}{Q_p X_p + Q X_e} \dots\dots\dots 5$$

Donde:

TRC= tiempo de retención celular (días)

V= volumen del reactor (m<sup>3</sup>) I = gasto de agua tratada (m<sup>3</sup>/día)

X<sub>r</sub>= concentración de biomasa (kg SSV/m<sup>3</sup>)

Q<sub>p</sub>= gasto de purga (m<sup>3</sup>/día)

X<sub>p</sub>= concentración de biomasa purgada (kg SSV/m<sup>3</sup>)

X<sub>e</sub> = concentración de biomasa en el efluente (Kg SSV/m<sup>3</sup>)

Si se desprecia X<sub>e</sub>, que son los SSV en el efluente, entonces

$$TRC = \frac{X_r V}{Q_p X_p} \dots\dots\dots$$

Cuando el influente tiene una concentración importante de sólidos suspendidos volátiles (SSV) se debe tener precaución al utilizar el tiempo de retención celular como variable de diseño y control de la operación del proceso.

Tiempo de retención hidráulico TRH

El tiempo de retención hidráulico es el tiempo que permanece el agua residual dentro del reactor y se utiliza para comparar reactores, más que para diseño. Sin embargo, es la variable de diseño para el tratamiento de aguas residuales domésticas (aguas con baja carga orgánica) que se ha propuesto para diseñar filtros anaerobios.

Debido a que los reactores avanzados tienen diferentes tipos de tiempos de retención celular e hidráulica, realmente el tiempo de retención hidráulico no debería ser una variable de diseño sino una variable dependiente (salvo en cargas muy bajas, donde el factor hidráulico gobierna). Su cálculo es mediante la siguiente expresión:

$$TRH = \frac{Q}{V}$$

Donde:

$TRH$ = tiempo de retención hidráulica (días)

$V$ = volumen del reactor ( $m^3$ )

$Q$ = gasto ( $m^3$ /día)

(Noyola, 1994)

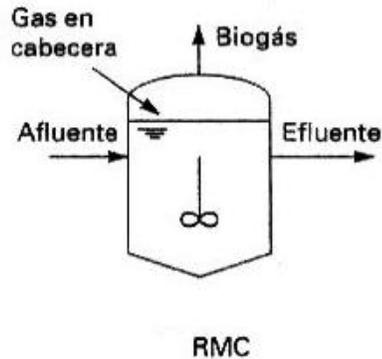
## 6.6 Diseño del biorreactor.

Con base a los datos obtenidos del biorreactor piloto, colocado en el centro de acopio de la FES "Zaragoza", se propondrá el diseño del biorreactor para el aprovechamiento de los desechos avícolas y porcinos generados en la granja Villavicencio.

CONSIDERACIONES:

- El número de animales que se encuentran en la granja es variable, ya que hay compra y venta continuamente, y este puede variar hasta un 30% en tan solo mes y medio.

- El reactor del cual se propondrá el diseño pertenece a los biorreactores de primera generación (para minimizar costos) y es llamado Reactor continuo de mezcla



completa RMC.

- Debido al primer punto, se propone realizar dos biorreactores con la posibilidad de echarlos andar en serie o en paralelo y con una campana para almacenamiento de biogás.
- El mezclado será manualmente por medio de un tornillo sin fin. Para minimizar costos. Con opción a colocar un agitador movido por un molino de viento.
- La alimentación está compuesta por estiércol de puerco y gallina, que en promedio tiene una composición de 3:1 (tres porciones de desechos porcinos por una porción de desechos avícolas).
- Se alimentarán 150 kg de estiércol porcino y 50 kg de estiércol de gallina, lo que da un total de 200 kg a la semana.

$$V_R = (Producción\ de\ animal/día)(\#animales)(5)(tiempo\ de\ retención).$$

Considerando 200 kg a la semana entre las gallinas y los puercos tenemos 28.57 kg por día por 5x20 días de retención; nos da un volumen de 2856 L.

**Nota:** el factor 5 se debe a la concentración de biomasa, el reactor piloto se hizo a cinco también.

Los cálculos del volumen se calcularon con un 10% extra de carga por lo que se menciona en el primer punto.

Se recomienda colocar dos biorreactores, con la posibilidad de trabajar en serie, exactamente de las mismas dimensiones, para que el tiempo de retención aumente a 4<sup>º</sup> días; también se recomienda aislarlos con espuma de poliestireno, de 15 cm de espesor. Existen dos propuestas de material de construcción de acero o de ladrillo con una capa de

asbesto, debido este último material presenta buena durabilidad según los criadores de cerdos.

Las propuestas para el almacenamiento de gas son dos: que serán elegidas por el dueño de la granja al igual que el material de construcción del biorreactor; con base en sus posibilidades económicas.

1. Dispositivo de almacenaje húmedo para biogás, a baja presión. (campana flotante como la del biorreactor piloto construido en la fase experimental de estetrabajo).Figura 31.

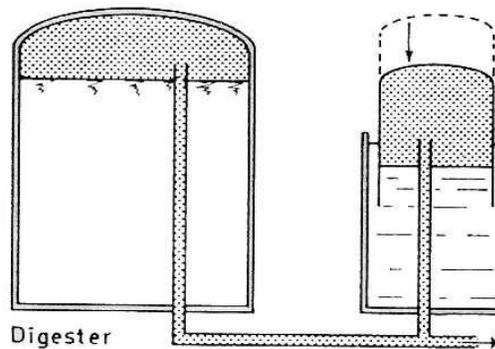


Figura 31: Campana Flotante

2. Una "bolsa" de geomembrana lo cual se considera un dispositivo de almacenaje seco con una pieza de algún material pesado para ejercer presión a la descarga del gas, como se muestra en la figura. La única desventaja de este dispositivo es que las bolsas más pequeñas son de  $5\text{m}^3$ .Figura 32.

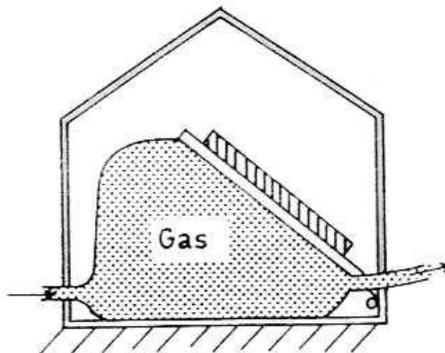


Figura 32: Bolsa de geomembrana.

En realidad no se necesita un dispositivo tan grande de almacenamiento, pues el gas puede irse ocupando como se va generando, incluso cuando haya deficiencia de biogás se debe tener un cilindro de repuesto (generalmente se da más en el invierno). En promedio una vez estabilizado el sistema (5 meses en promedio) la producción de biogás se calcula, con base a las temperaturas máximas promedios históricas registradas en Amecameca (anexo), sólidos volátiles suspendidos, figura 10 y figura 12 que son de:  $3\text{m}^3$  al día.

En el biorreactor piloto teniendo 1 Kg con 4 L de agua, es decir 25% sólidos y 75% agua obtuvimos un total de 5 L de biogás, esto a temperaturas de 19 a  $21^{\circ}\text{C}$  que se operó el reactor a 20 días de retención; mejorando las condiciones de temperatura y pH como se supone habrá en la granja podríamos considerar una mayor producción, hasta de 4 veces más (tabla 20). Considerando que el volumen del digestor será de 2856 L y que se mejoran las condiciones, tendremos una producción de gas hasta 11424 L de biogás en 20 días, ya que estamos hablando de un biorreactor 571 veces más grande que el biorreactor piloto.

#### DIMENSIONAMIENTO DEL BIORREACTOR

Se redondea a  $3\text{m}^3$  por la generación de espumas, por lo tanto el  $V_T = 3\text{m}^3$  en función del diámetro la ecuación para volumen es el  $V_T=0.58 \pi D^3$ , tenemos entonces que el diámetro es de 1.81m. Para este tipo de sistemas se recomiendan relaciones longitud diámetro de 1.5, es decir  $L/D= 1.5$  (Lema, et al., 1992) lo que nos da una longitud de 2.73m

#### 6.7 BASE DE CÁLCULO

1. Diagrama de distribución de la granja figura 33
2. Dimensionamiento del biorreactor:  
 $L=2.73\text{m}$   
 $D=1.81\text{m}$
3. Los materiales con los que propone se construya el biorreactor son: acero o ladrillo y una capa de asbesto.
4. El diámetro y la longitud de las tuberías calculado se ajusta a los diámetros comerciales y recomendados por la gente que ha trabajado con este tipo de sistemas, para la tuberías que conducen el biogás, se requieren 1.5 pulgadas de diámetro en tubería de cobre, para el sustrato se requiere tubería de 6 pulgadas

en PVC. La longitud de la sección A de tubería es de 32m, B es de 8m, C es de 4m, D es de 2,5m todo en PVC.

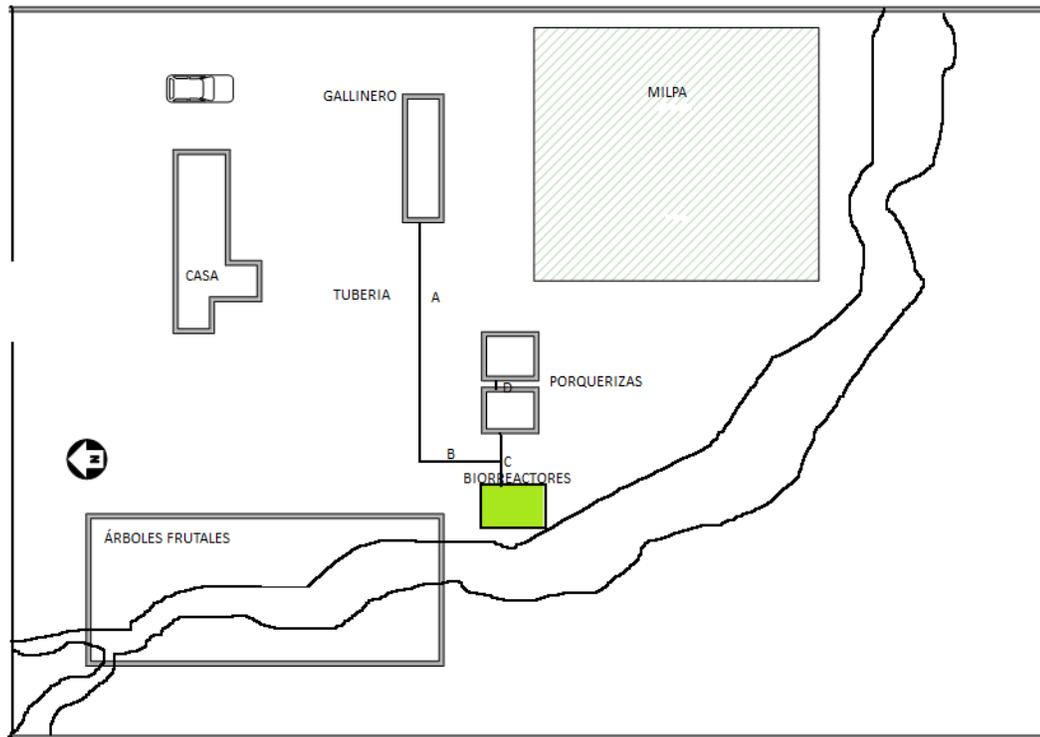


Figura 33: Diagrama de distribución de la granja.

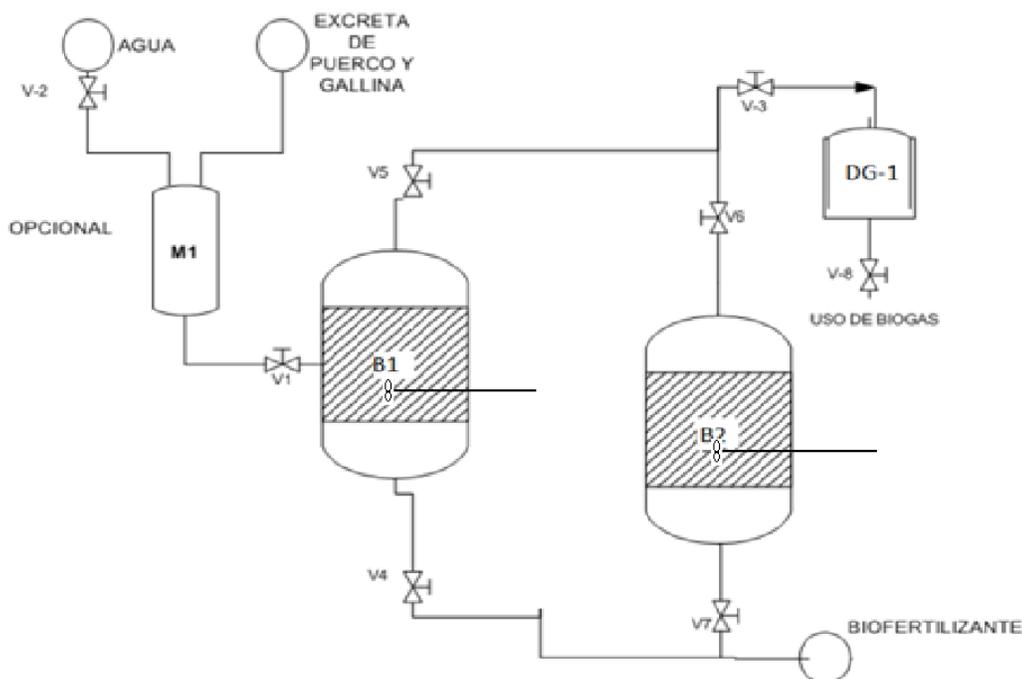


Figura 34: DFP

### 6.8 Descripción del proceso.

**MOLIENDA:** Esta se realiza manualmente al lavar las porquerizas diariamente, utilizando un cepillo de fibras gruesas y por ningún motivo utilizar algún químico limpiador como detergentes o cloro. Es muy importante triturar o moler, pues aumenta la superficie de contacto entre el sustrato y los microorganismos, ya que se reduce el tamaño de los sólidos.

**PRE-TRATAMIENTO DEL SUSTRATO:** este se realiza aproximando el agua con la que se lavan las porquerizas y los gallineros a una dilución 1:5 como anteriormente se especificó. Se pudiera agregar un poco de carbonato de calcio para ajustar pH.

**CARGA DEL DIGESTOR:** la granja posee la gran ventaja de estar construida en inclinación, lo que nos ahorra muchísimo dinero en bombeo, ya que se piensa alimentar por gravedad, al igual que la descarga será por gravedad, ya que el biorreactor queda aproximadamente a la mitad de la inclinación.

**ALMACENAMIENTO DE BIOGÁS:** Como anteriormente se menciona es muy posible no necesitar una gran capacidad de almacenaje, ya que el gas se ocupa continuamente, sin embargo existe una manera de almacenarlo, en caso de no ser así; por razones de seguridad de los habitantes de la granja.

**COPRODUCTO:** los lodos una vez concluido el tiempo de residencia, se pueden utilizar como abono, el cual es recomendable para suelos húmedos, ya que de no ser así los nutrientes se pueden volatilizar fácilmente, por otro lado el sobrenadante se puede usar como agua de riego, bastante aprovechable para la granja, ya que cuenta con una gran cantidad de árboles frutales.

## OPERACIÓN

La operación del sistema es tan sencilla que funciona casi por sí misma una vez efectuado su arranque.

Al inicio del ciclo, se alimenta el estiércol mezclado con la cantidad de agua necesaria para tener una composición de 25% de sólidos y vigilando que la acidez se mantenga en un valor de 8 a través del tanque receptor. Esta operación se continúa hasta que se alcanza en el digestor un nivel de 2.2 m a partir del fondo, a tal capacidad, se quitan los contrapesos colocados en la bolsa contenedora de gas, abriendo de antemano la válvula para salida de gas, colocada en su tapa, debe uno de cerciorarse de que no haya oxígeno en la parte superior del fermentador, pues la presencia de la más mínima cantidad de oxígeno es dañina, por lo que se procura eliminar totalmente el aire. Una vez hecho esto, se cierra la válvula de domo. Se procede a mover el agitador por lo menos 3 veces al día durante 5 minutos.

## 6.9 Lugar de escalamiento.



Figura 35: Lugar de escalamiento.

La granja está ubicada en el estado de México, en el municipio de Amecameca, la comunidad de San Pedro. Ubicada en el siguiente mapa. Zona rural.

El municipio de Amecameca está situado en las faldas de la Sierra Nevada, dentro de la provincia del eje volcánico y en la cuenca del río Moctezuma-Pánuco. Sus coordenadas geográficas son longitud  $98^{\circ} 37' 34''$  y  $98^{\circ} 49' 10''$ ; latitud  $19^{\circ} 3' 12''$  y  $19^{\circ} 11' 2''$ . La altura sobre el nivel del mar es de 2,420 metros en la cabecera municipal. Se ubica en la porción sur del oriente del Estado de México. En la Región III Texcoco. Los límites del municipio son: al norte, el municipio de Tlalmanalco; al este el estado de Puebla; al sur, los municipios de Atlautla y Ozumba; y al oeste, los municipios de Ayapango y Juchitepec.

### Clima

El clima es templado subhúmedo, con régimen de lluvias de mayo y octubre. La temperatura media anual es de  $14.1^{\circ}\text{C}$ ; el mes más frío es enero con  $2.4^{\circ}$  promedio, pero en febrero o diciembre la temperatura puede descender hasta  $-3^{\circ}\text{C}$  por la noche. El mes más caluroso es abril con  $24^{\circ}$  en promedio, pero la máxima temperatura extrema puede llegar hasta  $37^{\circ}$  en mayo o de  $32^{\circ}$  en octubre y diciembre. La precipitación anual es de 935.6 milímetros, febrero es el mes más seco (6.2 mm), seguido por diciembre (6.5 mm) y marzo (7.0 mm). Julio es el más lluvioso (341 mm), le sigue agosto (338 mm) y junio (321.4 mm).

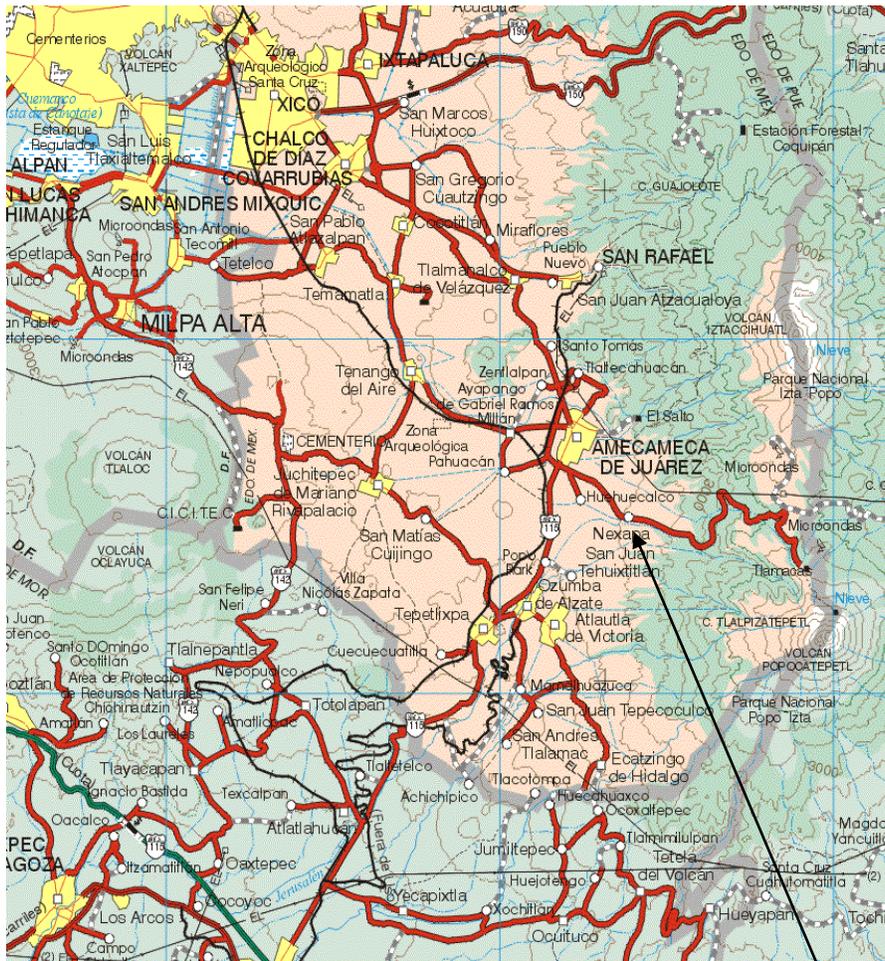


Figura 36: Mapa para la ubicación de la granja.

Granja Villavicencio

## 7. CONCLUSIONES

Se propuso una forma de aprovechamiento para los desechos porcinos y avícolas, generados en la granja Villavicencio. Al mismo tiempo se propone generar una energía alterna, cuidando el medio ambiente, evitando que el metano escape a la atmósfera y ayude al calentamiento global, ya que éste gas es de efecto invernadero. También con esto se propuso minimizar la contaminación del suelo y minimizar los focos de infecciones.

También se propuso un diseño del biorreactor, fundamentándose en los resultados que dio el biorreactor piloto que se construyó en Laboratorio de Desarrollo de Procesos para el Tratamiento de Residuos.

## 8. RECOMENDACIONES.

Por otro lado es recomendable antes de comenzar la construcción de este biorreactor en campo, llevar el biorreactor piloto a Amecameca, y realizar nuevamente el experimento en dicho lugar, para una posible optimización del diseño.

Realizar un cromatograma, para obtener la composición exacta del biogás y así prevenir posibles corrosiones en la tubería de cobre, además de valorarlo como combustible.

Seguir el biorreactor durante mayor tiempo de retención.

Realizar pruebas de sólidos suspendidos volátiles a lo largo del experimento, para obtener mayor información en cuanto a la actividad del biorreactor.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- *"Diseño, construcción y operación del digester comunal de desechos orgánicos. 11E/FE-A2/13."* Instituto de investigaciones eléctricas, Cuernavaca, Mor., México, agosto 1979.
- *"El Biogás 2. Construcción de unidades Perfeccionadas."*, 1986 Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. Colección FAO: desarrollo económico y social. Roma ISBN 92-5-302392-9
- *"El Biogás. Producción y utilización. "*, 1983 Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. Colección FAO: desarrollo económico y social. Roma ISBN 92-5-301290-0
- *"Estudios, adaptación y pruebas de equipos comerciales para la utilización del biogás, informe 11E/FE-A2/14."* Instituto de investigaciones eléctricas, Cuernavaca, Mor, México, mayo 1979.
- *"Estudios, adaptación y pruebas de equipos comerciales para la utilización del biogás"*, informe 11E/FE-A2/14. Instituto de investigaciones eléctricas, Cuernavaca, Mor, México, mayo 1979.
- *"Evaluación de la influencia de la temperatura en la digestión de desechos orgánicos."* Informe 11E/FE-A2/10. Instituto de investigaciones eléctricas, Cuernavaca, Mor, México, mayo 1980.
- *"Evaluación de la mezcla de estiércol bovino y esquilmos vegetales para la obtención de biogás por fermentación anaeróbica."* Informe 11E/FE-A2/12. Instituto de investigaciones eléctricas, Cuernavaca, Mor, México, junio 1979.
- *"Informe final sobre la operación del digester familiar."* Informe 11E/FE-A2/11. Instituto de investigaciones eléctricas, Cuernavaca, Mor, México, abril 1979.
- Andrews, J. F. y Graef S. P. 1971. *"Anaerobic biological treatment processes."*, ACS Monograph.
- Aungenstein, D. C., Wise D. L. y Conney C. L., 1976. *"Packed bed digestion of municipal solid wastes."* Res. rec. cons.2 1976.)
- Bergmann, D., y Noack, R.1991 *"Liquefaction of bigas. A possibility for conventional engine fuel substitution."*, Wasserwirtschaft Wassertechnik.
- Boshof, W. M. 1977., *"Reaction velocity constants for batch methane fermentation on farms, notably in the tropics."*J. Ag. Sc. Camb.
- Bryant, M. P. octubre 1977. *"Paper presented at DOE Conference"*, Hastings, Nebraska
- Constant M., Naveau H., Ferrero G.-L. & Nyns E.-J.. 1989. *"Biogas end-use in the European Community"*. Elsevier Applied Science. Northern Ireland.

- Demuyck, M., Nyns, E.-J., y Palz, W., 1984. *"Biogas plants in Europe. A Practical Handbook."* Energía solar R&D Programa en el EC, Serie E vol. 6. Ed. Reidel Publ. Alemania.
- Galicia R.E. 1982. *"Estudios sobre obtención de metano en digestores de estiércol bovino."* Tesis profesional. Facultad de química, UNAM, México, D.F.
- Geraca Knely. 2000. *"Ingeniería ambiental"* Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. Ed. McGraw-Hill.
- Górida Casablanca F. y López Santin J. 2005. *"Ingeniería Bioquímica"* Editorial Síntesis, S. A.. España.
- Gustavson, M., Marzo 2000. *"Biogas Technology. Solution in search of its problem"* Sección Ecología Humana., Universidad de Göteborg.
- Guyot, W. 1989 *"Methanogenesis from sucrose by defined immobilized consortia."* Appl. Environ Microbiol. 47: 1-6
- Hobson P. N. & Wheatley A. D.. 1993. *"Anaerobic Digestion, Modern Theory and Practice."* Elsevier Applied Science. Great Britain.
- I. J. Dunn, Heinzle, E. Ingham J., Prenosil J. 1992. *"Biological Reaction Engineering"*. VCH, Weinheim. Federal Republic of Germany.
- Kispert, R. G., Sedek, S. E. Anderson L. C. y Wise, D. L., 1977. *"Fuel gas production from solid waste."* Informe final en NSF contract. C-927. Enero 1997. Dynattech R/D 1997.)
- Kouzeli-Katsiri y P.J. Newman. 1990. *"Anaerobic digestion of sewage sludge and organic agricultural wastes."* Elsevier. New York.
- Lenninger L.A. 1979. *"Bioquímica."* Edit, Omega, S.A., Barcelona,
- Lema, JM: R. Méndez, Soto, M (1992). *Bases cinéticas y microbiológicas en el diseño de Digestores Anaerobios.* Ingeniería Química 191-201
- Lewandowski, G., Armenante, P., y Baltzi B.. 1988 *"Biotechnology applications in hazardous waste treatment"*. Engineering Foundation. New York.
- López Alonso Roberto., 2002. *"Factibilidad técnico-económica del uso del biogás obtenido de la digestión anaerobia del estiércol porcino, para la generación de electricidad."*, Tesis profesional. Facultad de Ingeniería UNAM. México D.F.
- López Villanueva Berenice., 2003. *"Proyecto para la construcción de una planta generadora de biogás, a partir de desechos generados en la central de abastos del Distrito Federal."*, Tesis profesional., Facultad de arquitectura UNAM., México D. F.

- Malina. J.F jr . Pohland F G. 1992. "*Design of Anaerobic Processes for the Treatment of Industrial and Municipal Wastes.*" Technomic Publishing Co. Inc
- Mandujano M., I. 1981. Biogas: Energía y fertilizantes a partir de desechos orgánicos. Manual para el promotor de la tecnología. Organización Latinoamericana de Energía. Cuernavaca, Morelos, México
- Mandujano M.I., Martínez A. junio 1981 "*Biogás, energía y fertilizantes a partir de desechos orgánicos.*", Manual para el promotor de la tecnología. OLADE, serie de publicaciones especiales No. 6, Instituto de investigaciones eléctricas, Cuernavaca, Mor., México,.
- Manilla E. 2004. "*Diseño de un biorreactor que genera biogás a partir de desechos agrícolas*". Tesis Profesional. FES Zaragoza. México D. F.,
- Martínez I.A. 1989 "*Experiencias sobre biometanización,*" 11 curso regional de la OEA, combustibles por fermentación UAM/IMETA/ICAITI., México, D.F., OCTUBRE
- Marty, B. 1984. "*Microbiology of anaerobic digestion.*" pp. 72-85. In: A.M. Bruce, A.
- McCarty, P.G. 1964. "Anaerobic waste treatment fundamentals." Part 1. Chemistry and microbiology. Public Works.
- McCaskey, A.T. 1990. "Microbiological and chemical pollution potential of swine waste." En: Memorias del Primer Ciclo Internacional de Conferencias sobre Manejo y Aprovechamiento de Estiércol de Cerdos. CINVESTAV. Guadalajara, Jal., México.
- Mejía M., G. 1996. Digestión anaeróbica. Folleto Técnico 1. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yuc., México.
- Monroy H.O. Viniegra G.1991., "*Biotecnología para el aprovechamiento de los desperdicios orgánicos.*" AGT Editor S.A., México, D.F., 1991.
- Monroy, H. O., Viniegra G. 1981., "*Biotecnología para el aprovechamiento de los desperdicios orgánicos.*". AGT Editor, S.A.. México DF.
- Noyola A. y Monroy O. 1994. "*Experiencias y expectativas del tratamiento de residuales porcinos en México.*" Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa.
- Palz, W., Coombs J., y Hall, D. O., 1985. "*Energy from biomass.*" 3rd E. C. Conference. Elsevier Applied Science Publishers. Great Britain.
- Pichardo J.E. 1980. "*Obtención de energía mediante la digestión de estiércol de vaca.*" Tesis profesional ENEP Cuautitlan. UNAM. México. D.F.
- Revista TERRA. Vol 19 número 4 Universidad de Chapingo.2001
- Santander Nadia, Cepeda César. "*Buscan darle brillo a la basura*". Ciudad y Metrópoli., Reforma, Lunes 23 de Mayo del 2005.
- Señor, R. 2005., "*Obtención de biogás mediante la fermentación anaerobia de residuos alimentarios.*" Departamento de calidad y Medio Ambiente. Madrid.

- Van M. P., Heythuysen J.H. 1983., "*Methyltransferases involved in methanol conversion by methanosarcina Barkeri.*" Arch. Microbiol. 134-238-242.
- Viniegra G., Munguia A., 1982 "*Evaluación económica de los digestores anaeróbicos. 11 curso regional de la OEA. Combustibles por fermentación*"., UAM/IMETA/ICAITI. México, D.F., octubre, 1982.
- Wayne H. S., & James R. F., 1990. "*Methane from biomass. A systems approach.*", Elsevier Applied Science. Great Britain.
- Zeicus J.G. 1990., "*The biology of methanogenic bacteria.*" Bact. Rev. 41: 514-541(1977).

#### DIRECCIONES WEB

<http://www.recicla.net/noticia.php?id=82>  
[http://www.micromacro.tv/construyalo\\_inic\\_loc\\_desf\\_glob\\_bagaso.htm](http://www.micromacro.tv/construyalo_inic_loc_desf_glob_bagaso.htm)  
<http://www.energia.gob.mx/wb/distribuidor.jsp?seccion=361>  
<http://www.conae.gob.mx/work/secciones/1465/imagenes/renovables.pdf>  
<http://www.funtener.org/documento170903.html>  
[http://www.mundilink.com/magisterio/espacio\\_verde.html](http://www.mundilink.com/magisterio/espacio_verde.html)  
<http://www.mty.itesm.mx/die/ddre/transfereencia/66/66-I.08.html>  
[http://www.cleanairnet.org/lac/1471/articles-58337\\_recurso\\_1.pdf](http://www.cleanairnet.org/lac/1471/articles-58337_recurso_1.pdf)  
<http://www.edomexico.gob.mx/se/resisol.htm>  
[http://www.sma.df.gob.mx/bibliov/modules.php?name=Downloads&d\\_op=getit&lid=23](http://www.sma.df.gob.mx/bibliov/modules.php?name=Downloads&d_op=getit&lid=23)  
<http://www.alambre.info/archives/00000124.html>  
[http://www.cipav.org.co/index.php?option=com\\_content&task=view&id=92&Itemid=79](http://www.cipav.org.co/index.php?option=com_content&task=view&id=92&Itemid=79)  
<http://www.epa.gov/espanol/>  
<http://www.epa.gov>  
<http://www.sener.gob.mx>

## ANEXO.

Estos datos fueron proporcionados por el Laboratorio de contaminación Atmosférica, de la FES "Zaragoza"; pero solamente se muestran los más importantes referidos a la temperatura promedio por mes al año, de la estación meteorológica más cercana a la granja Villavicencio. Solo se colocaron estos datos, sin embargo; es muy importante mencionar que el Laboratorio proporcionó más de 5000 datos históricos, los cuales no se colocarán en el anexo por cuestiones de espacio.

### TEMPERATURAS PROMEDIO MENSUAL POR AÑO EN AMECAMECA SAN LUIS. EN °C

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ACUMULADO	MEDIA MESES	
1961	21.857	24.322	26.633	27.483	22.066	21.096	22.322	21.05	22.048	21.2	20.483	250.6	22.8	11	
1962	21.403	24.232	25.516	23.866	25.725	24.75	23.403	23.322	21.183	21.548	21.2	20.096	276.2	23.0	12
1963	21.741	21.392	24.919	26.8	24.677	23.2	21.907	21.919	21.333	20.354	21	20.983	270.2	22.5	12
1964	19.629	23.086	24.532	26.85	25.096	22.1	21.79	22.451	21.95	22.193	21.883	19.951	271.5	22.6	12
1965	19.693	20.482	24.306	25.2	25.983	23.483	21.258	20.758	22.316	20.725	22.683	20.596	267.5	22.3	12
1966	19.241	20.464	21.935	23.166	25.193	23.766	22.483	22.483	21.733	21.564	21.55	20.096	263.7	22.0	12
1967	19.177	21.714	23.774	25.133	25.225	23.066	22.274	21.887	20.416	20.887	21.733	20.274	265.6	22.1	12
1968	20.951	19.948	22.596	24.866	24.145	23.15	21.387	21.887	21.766	22.354	21.633	20.596	265.3	22.1	12
1969	21.177	22.892	23.08	25.75	26.5	26.383	22.967	20.967	21.65	22.935	21.9	21.129	277.3	23.1	12
1970	20.596	21.321	23.822	26.933	25.725	22.3	21.29	21.612	20.883	22.822	21.933	249.2	22.7	11	
1971	22.177	22.142	24.516	24.516	26.129	22.266	21.322	21.096	21.55	22.332	21.75	21.241	271.0	22.6	12
1972	21.193	22.224	23.564	26.333	25.193	22.433	21.451	21.354	22.283	22.29	22.766	21.871	273.0	22.7	12
1973	21.774	23.339	25.693	25.566	26.048	22.533	21.516	20.741	21.433	21.032	21.116	19.112	269.9	22.5	12
1974	20.983	21.696	23.532	24.366	24.871	21.25	20.451	22.225	22.274	22.05	21.193	244.9	22.3	11	
1975	19.983	22.607	25.5	27.1	24.483	21.483	21.08	21.935	22.133	22.564	23.316	20.935	273.1	22.8	12
1976	20.516	22.362	25.225	24.416	24.5	23.983	21.451	21.419	22.316	21.822	19.483	21.274	268.8	22.4	12
1977	21.903	21.803	26.193	24.083	25.435	22.916	23.58	23.55	24.258	21.7	22.661	258.1	23.5	11	
1978	21.532	20.767	22.822	26.933	26.79	21.85	22.403	22.935	22.683	21.387	23.366	22.854	276.3	23.0	12
1979	22.371	22.071	24.677	26.45	26.338	24.933	24.016	22.725	21.783	25.887	23.733	21.516	286.5	23.9	12
1980	21.387	23.206	26.935	26.233	27.645	26.616	25.29	23.371	22.65	24.564	22.366	22.338	292.6	24.4	12
1981	20.274	23.772	25.096	26.8	27.532	23.666	23.29	23.58	24.266	24.29	24	23.403	290.0	24.2	12
1982	24.177	24.535	28.193	29.166	26.983	26.933	24.516	25.548	25.383	24.758	24.616	22.161	307.0	25.6	12
1983	20.887	21.589	25.322	27.566	29.838	28.116	23.596	24.806	23.35	24.032	23.583	25.209	297.9	24.8	12
1984	22.419	23.069	25.983	28.816	26.161	24.3	22.709	22.935	21.483	25.451	24.05	23	290.4	24.2	12
1986	22.274	24.25	25.193	28	26.629	23.966	23.467	24.322	25.066	23.903	24.416	22.516	294.0	24.5	12
1987	23.274	23.589	24.58	25.833	27.5	24.533	23.338	24.322	25.216	25.806	24.033	24.629	296.7	24.7	12
1988	22.322	24.569	24.887	27.3	29.209	24.683	23.435				176.4	25.2	7		
1995		23.321	25.193	25.9	26.467					100.9	25.2	4			
1996	21.983	23.965	23.871	25.996	27.29	23.546	22.983	22.838	23.5	23.241	22.883	262.1	23.8	11	
1997	21.032	23.285	24.354	22.936	23.967	24.916	23.467	23.983	22.65	22.5	22.433	21.935	277.5	23.1	12
1998	20.677	23.071	25.532	27.896	29.919	27.033	24.338	23.161	22.066	21.112	22.833	22.193	289.8	24.2	12
1999	21.806	23.482	25.145	27.116	26.741	24.666	22.096	22.629	22.45	21.354	21.883	20.693	280.1	23.3	12
2000	22.532	24.534	25.774	26.85	25.129	22.25	23	22.338	23.033	23.838	24.216	21.516	285.0	23.8	12