



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
"CUAUTITLAN"**

**BIODIGESTORES: UNA ALTERNATIVA PARA SOLU-  
CIONAR LOS PROBLEMAS DE  
ENERGIA EN LAS REGIONES  
MARGINADAS.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO**

**P R E S E N T A :  
JOSE CASTELLANOS LOPEZ**

**DIRECTOR DE LA TESIS: I.Q. HUMBERTO LARIOS VELARDE**



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.

**PRESIDENTE:** I.Q. HUMBERTO LARIOS VELARDE

**VOCAL:** I.Q. RAMON MORALES TORRES

**SECRETARIO:** I.Q. FERNANDO SOTRES CARRERAS

**1er. SUPLENTE:** I.Q. ARNULFO CHAVANDO RAMIREZ

**2o. SUPLENTE:** I.Q. MARCELA ASTORGA ESCOLANO

# I N D I C E

Pág.

## CAPITULO I

INTRODUCCION.....	1
-------------------	---

## CAPITULO II

BIOMASA COMO ENERGETICO.....	5
- Disponibilidad y Situación de las Concentraciones de Biomasa Sólida.....	6
- Conversión de la Biomasa.....	8
- Características del Biogas.....	10
- Propiedades Físicoquímicas del Metano.....	12
- Antecedentes Históricos.....	15
- Situación Actual del Biogas en el Mundo.....	20

## CAPITULO III

### CONSIDERACIONES TEORICAS

- Consideraciones Teóricas.....	23
- Digestión Aeróbica.....	24
- Digestión Anaeróbica.....	24
- Microbiología y Sustratos de la Primera Etapa (Rompimiento de Polímeros).....	27
- Microbiología y Sustratos de la Segunda Etapa (Producción de Ácidos).....	31
- Microbiología y Sustratos de la Tercera Etapa (Producción de Metano).....	33

	Pág.
- Parámetros que gobiernan el Proceso de la Digestión.....	38
Materia Prima.....	39
Temperatura .....	44
Tiempo de Residencia.....	47
Porcentaje de Sólidos .....	50
Relación Carbono/Nitrógeno.....	52
Formación de Natas .....	65

#### CAPITULO IV

##### ASPECTOS SOCIOECONOMICOS

- Aspectos Socioeconómicos.....	68
- Estudio Socioeconómico .....	70
- Sistematización de Comunidades .....	73
- Breve descripción de la Comunidad seleccionada: Jicarero, Municipio de Jojutla, Morelos.....	75

#### CAPITULO V

##### DISEÑO, OPERACION, SEGURIDAD Y COSTOS

- Introducción al Diseño de Reactores.....	80
- Tipo de Reactores .....	81
- Reactor Ideal Discontinuo .....	82
- Reactor de Flujo Pistón en Estado Estacionario .....	83

	Pág.
- Reactor de Mezcla Completa en Estado Estacionario.....	84
- Diseño .....	87
- Consideraciones de Diseño dependientes de las dimensiones .....	88
- Hermeticidad absoluta .....	91
- Facilidad de Remoción de Natas y Sedimentos .....	91
- Válvula de Seguridad .....	92
- Equipo de Medición .....	92
- Pérdidas de calor y aislamiento térmico .....	92
- Protección contra corrosión .....	92
- Acceso al interior .....	93
- Salida de Gas .....	93
- Tubería y Contenedor de Gas.....	93
- Localización del Digestor .....	94
- Características del Terreno para su utilización como material de construcción .....	95
- Ventilación .....	95
- Seguridad .....	96
- Elección de Terreno para Construcción....	96
- Protección .....	96
- Balance de Materiales .....	98

	Pág.
- Diseño Mécanico del Digestor .....	101
Operación .....	108
Seguridad .....	110
Costos . .....	112
<b>CAPITULO VI</b>	
<b>USOS Y BENEFICIOS</b>	
- Utilización del Biogas .....	118
- Adaptación de Equipos . .....	120
- Intercambiabilidad de Gases .....	121
- Índice de Wobbe .....	123
- Usos del Biogas por el Digestor de 30m <sup>3</sup> que se instalará en la Comunidad de Jicarero .....	127
- Usos de los Lodos . .....	129
- Contaminación Ambiental.....	130
<b>CAPITULO VII</b>	
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>133</b>
<b>CAPITULO VIII</b>	
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>135</b>

## SIMBOLOS

C	Cantidad de carbono ó concentración molar
CN	Porcentaje de nitrógeno en peso
C	Coefficiente función de unidades utilizadas, forma de orificio y temperatura
D	Peso seco
d	Leaje diferencial
E	Estiercol
F	Velocidad de alimentación
M	Porcentaje de humedad ó peso
m	Masa
N	Cantidad de nitrógeno ó cantidad de moles
O	Cantidad de material
P	Presión relativa del gas antes del inyector
PCsup	Poder calorífico superior al gas
Qc	flujo calorífico
R	Relación carbono/nitrógeno
R.S.I.	Rendimiento sobre la inversión
S	Velocidad de reacción
S	Sólidos ó área de sección estrecha de la garganta
ST	Sólidos totales
SVT	Sólidos volátiles totales
S	Sección del inyector
t	Tiempo
V	Volumen del reactor
Vd	Volumen del digestor
	Volumen específico por unidad de masa
X	Fración molar
$\delta$	Gravedad específica (aire=1)
E	Fración de espacios vacíos (catalizador)
$\rho$	Densidad
$\tau$	Tiempo de residencia
$\phi$	Diámetro

## SUBINDICES

A	Componente A
f	Condiciones finales
g	Gas
i	Componente i ó condiciones iniciales
m	Mezcla
O	Condiciones iniciales o totales
s	Seco
t	Total
V	Volátiles
x	Componente x

# **CAPITULO I**

## **INTRODUCCION**

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

El desarrollo socioeconómico del país exige una integración de todos los sectores -aún los más marginados- a su proceso productivo. Entre dichos sectores figuran, por cierto, más de 80,000 comunidades rurales que carecen de energía eléctrica.

A pesar del creciente esfuerzo que realiza el Gobierno por parte de la Comisión Federal de Electricidad por proporcionar este servicio a las áreas rurales, la electrificación demanda fuertes inversiones en el caso de dichas comunidades, debido a su aislamiento y dispersión, que vuelve difícil su establecimiento por las vías convencionales.

Además, la crisis mundial de energéticos exige poner en práctica políticas condicionadas al uso racional de nuestros recursos no renovables, así como impulsar y desarrollar nuevas tecnologías que permitan, en un futuro, utilizar nuevas fuentes de energía. (1)

Existen varios procesos para la conversión de biomasa en energía, siendo la combustión directa de leña y residuos vegetales el método más utilizado en el medio rural, sobre todo en las

comunidades aisladas. Esto se debe principalmente a las dificultades para hacer llegar combustibles fósiles a estas áreas, dadas las limitaciones en las vías de comunicación y los altos costos de transportación, por lo que el combustible "comercial" que llega a las zonas rurales aisladas, resulta en la mayoría de los casos, demasiado caro para la población que en ellas habita.

Paralelamente, los fertilizantes químicos no llegan a los poblados pequeños, y si llegan son relativamente caros. Por lo tanto, la demanda de fertilizantes tiene que ser cubierta con recursos locales, los que vienen siendo los mismos que se emplean como combustible, estiércoles y residuos agrícolas, por lo que ambas aplica--ciones compiten por los mismos recursos.

Uno de los procesos de conversión de biomasa que evita el conflicto de la utilización del mismo tipo de recursos para la ob--tención de energía útil y fertilizantes, es la fermentación anaeróbica. En este proceso, la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno libre, lleva a la generación de un gas combustible, llama--do biogas, quedando como residuo del proceso materia orgánica ca--racterizada por su alto valor fertilizante y mejorador de suelos llama--do bioabono.

Y ya que la atención de nuestro país en el momento actual está enfocada hacia dos cuestiones que son: Energéticos y Alimentos,

por considerarse factores esenciales, para afirmar la continuidad del desarrollo económico. Esto viene siendo una alternativa viable para la solución de esos problemas.

En los países en vías de desarrollo, la base económica y la mayoría de la población, es aún rural, y los requerimientos de energía para maquinaarla (especialmente combustibles fósiles) no son excesivamente utilizados. Sin embargo, la falta de energía barata y adecuada, muchas veces estorba la ejecución de planes rurales y retrasa el desarrollo en las condiciones de vida dentro de este sector. Resolver el problema, tanto de generación de energía, como de distribución, es de vital importancia para el desarrollo económico, principalmente en el área rural. La solución para reducir o eliminar la importación de combustibles fósiles, los cuales son muy costosos, es cultivar los combustibles alternos en el lugar de origen.

Este trabajo esta dedicado al desarrollo de un recurso para producir energía alterna, individual o colectivamente, en el medio rural. Un recurso ideal es el que se produce en el lugar de origen y que pueda generar energía, dependiendo únicamente en los materiales locales.

(3)

Su mayor ventaja se cifra en que su fuente es casi inagotable -el verdadero laboratorio son los hombres y los animales, en

tanto que se alimente- y que no requiere una tecnología sofisticada. Es por ello asequible a los recursos de los países en vías de desarrollo. (4)

Con esto se pretende difundir en México las posibilidades del biogas como una fuente energética para el medio rural mexicano, que además, ofrece subsidiariamente un gran número de ventajas como son:

- saneamiento ambiental
- preservación del medio rural
- higiene
- salud
- elevación del nivel de la vida campesina

## **CAPITULO II**

### **LA BIOMASA COMO ENERGETICO**

CAPITULO IILA BIOMASA COMO ENERGETICO

La biomasa no solamente es importante como fuente de energía, sino también como fuente esencial de alimentos, productos químicos y fertilizantes, y presenta la ventaja adicional de ser un recurso renovable.

Una forma antigua y tradicional de obtener energía es quemar materias vegetales o residuos orgánicos de animales, es decir, biomasa obtenida por la fotosíntesis a través de la agricultura, la silvicultura o la ganadería, siguiendo la Ecuación empírica de combustión de los carbohidratos:



En esta reacción de la combustión, los carbohidratos generalmente liberan  $4.5 \times 10^6$  cal por kg. de materia seca, pero el rendimiento práctico varía según el contenido de humedad, el estado físico de agregación de la materia y la presencia de otros tipos de compuestos orgánicos.

Parte de la complejidad de uso de la biomasa como energético, surge del contexto productivo en que se obtiene, ya que la biomasa útil al hombre es, tanto una fuente de energía, como de alimentos de -

alta digestibilidad (granos de cereales, azúcar, féculas de tubérculos) o fuente energética de forrajes fibrosos para la ganadería de carne o leche (pastos, rastrojos, pajas, etc.), sustituto parcial o total de fertilizantes químicos (compostas, abonos animales, abonos verdes) o fuente energética para alimentar animales de tiro (bueyes, mulas, asnos, etc.) que se pueden substituir parcialmente a los energéticos empleados en los motores de combustión interna.

#### Disponibilidad y Situación de las Concentraciones de Biomasa Sólida

Para evaluar el potencial energético de la biomasa, podemos comparar, por un lado, sus disponibilidades a través de la producción fotosintética y por otro los niveles de consumo de los posibles usuarios.

El cuadro 1, muestra que diversos cultivos o plantas comunes rinden altas concentraciones por hectárea de biomasa, entre las que conviene destacar: la caña de azúcar, los eucaliptos y los pastos forrajeros, por ser plantas de cultivo factible en nuestro país y que pueden cosecharse en grandes cantidades. Sin embargo, tomando como referencia las 450,000 hectáreas de México, producen 30 MT de caña fresca con 15% de fibra junto con cerca de 10 MT de rastrojo de maíz producidas en cerca de 6,000,000 de ha, podemos calcular que las principales cosechas energéticas de México, generan cerca de  $65.25 \times 10^6$  G cal (G = 10<sup>9</sup>) equivalentes a 5,932 millones de litros de petróleo anuales, o

sea, cerca de 90,289 barriles diarios.

**Cuadro 1**  
**Productividad energética anual**  
**estimada para algunos cultivos vegetales\***

Cultivo	Biomasa ( T/ ha )	Energía Acumulada (G cal/ ha) **
Algas	50 - 100	225 - 450
Caña de Azúcar	30 - 112	135 - 504
Eucalipto	54	243
Pasto Sudán	36	162
Remolacha	15 - 33	68 - 148
Alfalfa	29	130
Mafz	4 - 13	18 - 58
Arroz	8	36
Soya	6	27

\* Se tomó el valor energético como  $4.5 \times 10^6$  cal/kg y se estimó la biomasa total en condiciones de alta productividad.

\*\* G cal =  $10^9$  cal equivalen a 90.91 lt de combustóleo.

## Conversión de la Biomasa

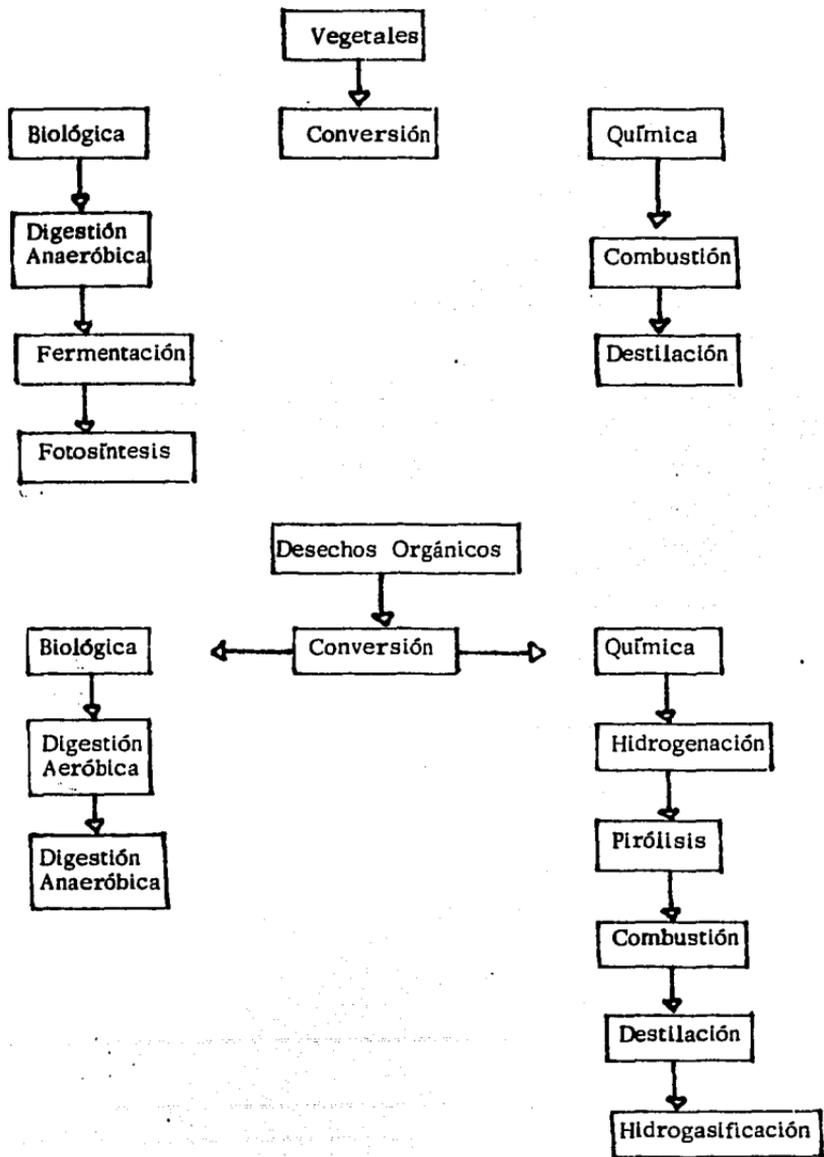
Los sistemas de conversión de biomasa en energía se clasifican en tres tipos:

- 1) Combustión directa de materiales de biomasa, generalmente para obtener calor de proceso y producción de vapor.
- 2) Conversión en moléculas ricas en carbono, hidrógeno o ambos y pobres en oxígeno y nitrógeno, elementos que no contribuyen al valor energético.
- 3) Alimentos para animales y uso de los desechos que producen.

Los procesos involucrados en las tres posibilidades se realizan a través de reacciones térmicas o microbiológicas. Las dos primeras involucran altas temperaturas y presiones, productos químicos corrosivos y pueden provocar contaminación. La tercera tiene efecto moderado sobre el medio ambiente.

La conversión de la biomasa en energía tiene por lo tanto - dos caminos fundamentales, el biológico y el químico, como se puede apreciar en el cuadro 2.

CUADRO 2



## CARACTERISTICAS DEL BIOGAS

Existe un grupo de microorganismos metanobacterianos que al actuar sobre los desechos orgánicos, sean vegetales ó animales, producen una mezcla de gases que en conjunto ha recibido el nombre de Biogas. La composición y producción de éste es variable y depende de las características de la materia prima utilizada y de las condiciones bajo las cuales tiene lugar la fermentación (2). (Véase cuadros 3, 4, y 5.)

Cuadro 3

### COMPOSICION DEL BIOGAS (9)

Gas Metano	55 - 70%
Bióxido de Carbono	30 - 45%
Hidrógeno	5 - 10%
Nitrógeno	4 - 6%
Acido Sulfhídrico	trazas

Cuadro 4

### DIGESTORES (8)

Desecho de:	Gas	Fertilizantes
1 vaca/día	23 MJ	60 gN <sub>2</sub> (35 lt de lodos)
1 hombre/día	0.6 MJ	9 gN <sub>2</sub> ( 1 kg de lodos)
1 gallina / día	0.4 MJ	1.7 gN <sub>2</sub> (0.3 lt de lodos)
1 puerco/día	6.0 MJ	28 gN <sub>2</sub> ( 6 kg de lodos)
1 kg. biomasa seca	10.0 MJ	80 gN <sub>2</sub> ( algas )

( 4.187 MJ = 1000 kcal )

Cuadro 5

**PRODUCCION DE GAS COMO UNA FUNCION  
DEL TOTAL DE SOLIDOS (10)**

---

Material	Biogas (ft <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>
Puerco	6.0 - 8.0
Vaca (India)	3.1 - 4.7
Gallina	6.0 - 13.2
Aguas negras	6.0 - 9.0

(a) por libra de sólidos totales adicionados.

En función de la proporción del metano contenido en el biogas, variará su poder calorífico, mismo que estará en el intervalo de 5000 a 6000 kcal/m<sup>3</sup> aproximadamente. Una aclaración importante, es el hecho de que la mezcla de gases ya puede servir de gas combustible cuando el contenido de metano es mayor al 50%.

La siguiente tabla ilustra el poder calorífico del biogas, comparado con otros combustibles.

Combustible	Kcal/m <sup>3</sup>	Kcal equivalente a 1m <sup>3</sup> de biogas
Biogas	5,335	1.000
Gas Natural	9,185	0.581
Metano	8,847	0.603
Propano	22,052	0.242
Butano	28,588	0.187

## PROPIEDADES FISICO QUIMICAS DEL METANO

En el sentido usual, el gas natural seco consiste en su mayor parte de metano (98%) con pequeñas cantidades de etano y propano. Pueden existir muy diversas composiciones de gases naturales, las cuales tienen aparte del metano, otros gases que se pueden considerar como impurezas, en virtud de sus propiedades químicas o físicas indeseables como combustibles.

Dentro de las propiedades combustibles del metano, se puede decir que el uso más común es como gas natural, dentro de la industria. El poder calorífico del gas natural es en promedio de 9,100 Kcal/m<sup>3</sup>.

La gravedad específica del metano es aproximadamente de 0.553 con respecto a la del aire. Esto lo hace ser un gas muy fácil de manejar en condiciones normales de presión y temperatura. (6)

El metano es incoloro e inodoro. Al combinarse con el aire puede llegar a formar mezclas explosivas, dependiendo de la relación metano-aire.

Nivel bajo de explosión	5.4%
Nivel alto de explosión	13.9%

La temperatura crítica del metano es  $-82^{\circ}\text{C}$  y tiene una presión crítica de  $47.36 \text{ Kg/cm}^2$ , características que obligan a utilizar el gas en su estado natural, ya que si se quisiera licuar, el equipo que se utilizaría sería muy costoso, y dadas las bajas cantidades de biogas que manejarían, resultaría incosteable la inversión.

La temperatura de ignición del metano en mezclas con aire, es la temperatura a la cual debe estar la mezcla para alcanzar una combustión espontánea. Este valor por supuesto varía con la pureza del gas, pero el metano puro a presión atmosférica en aire, tiene una temperatura de ignición de  $650^{\circ}\text{C}$ .

Tabla 1

Propiedades Físicas y Químicas  
del Metano

---

Fórmula Química:	$\text{CH}_4$
Peso Molecular:	16.042
Punto de ebullición a 14.696 psia (760 mm)	$-258.68^{\circ}\text{F}$ ( $-161.49^{\circ}\text{C}$ )
Punto de congelamiento a 14.696 psia (760 mm)	$-296.46^{\circ}\text{F}$ ( $-18.48^{\circ}\text{C}$ )
Presión crítica:	673.1 psia ( $47.363 \text{ Kg/cm}^2$ )
Temperatura crítica:	$-116.5^{\circ}\text{F}$ ( $-82.5^{\circ}\text{C}$ )
Gravedad Específica:	
Líquido (a $-263.2^{\circ}\text{F}$ $-164^{\circ}\text{C}$ )	0.415

Continúa Tabla.....

Gas (a $77^{\circ}\text{F} = 25^{\circ}\text{C}$ y 14.696 psia = 760 mm )	0.000658
Volumen específico a $60^{\circ}\text{F}$ ( $15.5^{\circ}\text{C}$ ) y 14.696 psia (760 mm)	23.61 pies <sup>3</sup> /lb (1.47 l/gm)
Valor calorífico $60^{\circ}\text{F}$ ( $15.5^{\circ}\text{C}$ ) y 14.696 psia (760 mm)	1,012 Btu/pies <sup>3</sup> (38, 130.71 Kcal/m <sup>3</sup> )
Aire necesario para la combustión pies <sup>3</sup> /pies <sup>3</sup> :	de 5 a 15% por volumen
Rango de Octanaje	130
Temperatura de ignición:	$1,202^{\circ}\text{F}$ ( $650^{\circ}\text{C}$ )
Ecuación de combustión:	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
$\text{O}_2/\text{CH}_4$ para completar la combustión:	3.98 por peso
$\text{O}_2/\text{CH}_4$ para completar la combustión:	2.0 por volumen
$\text{CO}_2/\text{CH}_4$ de la combustión finalizada:	2.74 por peso
$\text{CO}_2/\text{CH}_4$ de la combustión finalizada:	1.00 por volumen

---

Fuente: Katz, et al. (1959); Johnson y Auth (1961); y Weast,  
et al. (1964).

## ANTECEDENTES HISTORICOS

Las fuentes de energía llamadas "no convencionales", fueron el único recurso energético del hombre desde su aparición sobre la tierra, hasta la primera revolución industrial. A mediados del siglo XVIII, hace su aparición el carbón mineral, incorporándose a los procesos industriales de la época y desplazando a la leña y al carbón vegetal, cuyo uso intensivo había deforestado seriamente a Europa. A partir de ese momento, el hombre comienza a usar los combustibles fósiles, abundantes y baratos, generando una tecnología de uso de los mismos y una modalidad de desarrollo energético que ha reinado nuestros días. Véase gráfica 1. (5). La crisis energética de 1973, fué una llamada de atención que sacudió al mundo con un balance sumamente positivo, ya que hizo al hombre tomar conciencia de esta situación y volvió nuevamente el interés por la investigación en otras fuentes de energía, como la solar, nuclear, geotermia, etc. Además, el rápido crecimiento de la población y las necesidades de un desarrollo armónico y descentralizado, plantean exigencias cada vez mayores al sector eléctrico.

Sin embargo, en el medio rural debido a la carencia de infraestructura, especialmente de las líneas de transmisión, distribución y comunicaciones, la falta de mano de obra calificada que opere y mantenga las unidades generadoras y el bajo número de usuarios potenciales, hace que la dotación de energía eléctrica a estas poblaciones, en

general sea no rentable, por lo que difícilmente dispondrán de este - servicio a partir de las fuentes y vías de distribución convencionales. Es aquí donde la tecnología de los biodigestores encuentra su aplicación y proporciona una alternativa viable, tanto técnica como económica, para proporcionar energía útil a las pequeñas comunidades que carecen de ella. (3)

## HISTORIA

La producción de metano a partir de materiales orgánicos, no es un proceso nuevo. El hombre ha tenido conocimiento de esto, - desde que Volta descubrió el metano como gas de pantano en el siglo - XVIII y, las ideas y experimentos de como se podría utilizar el proceso, se han ido pasando de siglo en siglo, debido a la disponibilidad y bajo costo de otros combustibles, lo que disminuyó la utilización de me tano. Actualmente con el problema de que otro tipo de energético es costoso y limitado, el entusiasmo por el proceso, ha vuelto a tomar - importancia. (6)

La producción de metano por medio de digestión anaeróbica de desechos animales y materiales de Composteo, ha sido practicada - desde hace muchos años. En 1895, Donalo Camerón, en Inglaterra, co lectó metano producido por su, "diseño cuidadoso", tanque portador de gérmenes patógenos y lo usó para alumbrar las calles en la vecindad -

de la planta, en el centro de Exeter.

Lord Lveagh, en 1919-1920, con iniciativa personal, construyó cinco biodigestores en diferentes localidades de Inglaterra para la producción de gas metano (2). Estos digestores primitivos, consisten en cilindros de metal, de 28 pies de alto y 16 pies de diámetro; se tenía que idear una calefacción en el fondo del recipiente, además de la cámara de recolección de gas, para que esto funcionara correctamente. (7)

En países con baja producción de gas natural o inadecuada distribución de suministro de energía, han sido adaptados e introducidos equipos de generación de metano para satisfacer las necesidades en áreas no rurales. Las unidades de generación de metano con dimensiones familiares, han sido usadas en diversos climas y culturas. En la India, vieron con desagrado la pérdida del fertilizante de estiércol de vaca, por su uso como combustible, por lo que desarrollaron experimentos para aprovechar el estiércol seco. Estos experimentos se iniciaron en 1939 en el Instituto de Investigaciones Agrícolas de Nueva Delhi. A causa de las experiencias: "Los experimentos dieron como resultado el diseño de una planta de gas de fácil manejo, en la cual el estiércol fermentado produce gas combustible y los residuos (lodos digeridos) fueron utilizados como abono". El trabajo de la India continuó y se expandió con el estímulo de la Khadi and Willage Industries Commission. En 1961, la Gobar Gas Research Station, principió en Ajitmal, Etawah ---

(Uttar Pradesh), y en 1971 publicó una variedad de diseños de plantas de gas. Después de los experimentos se construyeron en la India, muchas miles de plantas en el país en las áreas rurales, para servir a una o varias familias.

Taiwan, experimentó desde 1955, con desechos de puerco y desarrolló un programa financiado por el gobierno. A la fecha, aproximadamente 7,500 plantas han sido construídas, operando con desechos de puerco a pequeña y mediana escala, de las cuales solamente la mitad, están en operación actualmente.

En la República Popular China (RPC), las construcciones se han promovido en gran escala, después de 1970. Varios simposios se han llevado a cabo, y en 1972 se asoció la Academia de Ciencia de China y el Ministerio de Agricultura y Forestal en Szechwan para ver sus progresos. Sus reportes indican que hay miles de plantas generadoras en RPC, basadas en el uso de aguas negras y de otros desechos de materias primas. En la provincia de Szechwan solamente, por ejemplo, más de 30,000 plantas de generación han sido reportadas.

Korea, también ha tenido experiencia con las plantas rurales, han instalado 24,000 entre 1969 y 1973.

Tanzania, Uganda y Bangladesh, han reportado instalaciones. Para 1971 los experimentos han sido llevados a las Islas del Sur del --

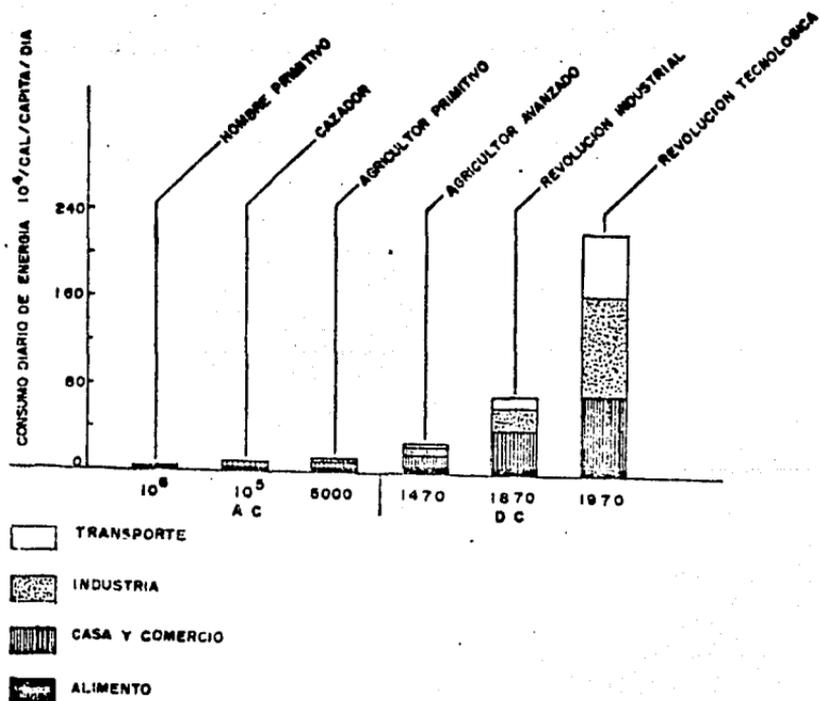


FIG. 1

Pacífico como proyectos pilotos, instalándose en el área rural de Fiji y demostraciones sucesivas han sido operadas en Port Moresoy, Padua - Nueva Guinea. Unas unidades prototipo usando desechos de pollos y guajolotes, han sido establecidas en México. (3)

### SITUACION ACTUAL DEL BIOGAS EN EL MUNDO

La experiencia cosechada por China en los últimos años, parece demostrar que el biogas -metano obtenido de la fermentación de residuos humanos y animales- es una alternativa más factible y efectiva que la energía solar o la nuclear para la mayoría de los países del tercer mundo.

China destaca en este campo porque produce actualmente una cantidad de biogas equivalente a tres millones de barriles de petróleo - por día. Esto representa el 15 por ciento de lo que utiliza diariamente el mayor consumidor mundial de hidrocarburos, Estados Unidos.

El biogas ha alcanzado su máximo desarrollo en el país pionero, China, donde están en servicio más de diez millones de biodigesto--res. Pero también está extendido en la India, con más de 40 mil plan--tas trabajando, y las hay en Filipinas, Kenya, Tanzania y algunos países de América Latina, con menos masividad.

La tecnología del biogas comenzó a desarrollarse en China en la década de los sesenta, y a partir de 1970 entró en rápida expansión. En Szechuan se pasó de 800 biodigestores en 1972 a 480 mil en 1975. Este año estarán en servicio trece millones de equipos en toda China. Para 1985 se calcula tener 70 millones de equipos, proveyendo energía al 70 por ciento de los hogares de los 750 millones de campesinos chinos.

En la Ciudad de Mienyang el 80 por ciento de las viviendas tiene biogas, con 108 mil biodigestores domésticos y 200 de gran capacidad para servicios industriales y públicos, que mueven plantas de bombeo, molinos y descarilladoras de arroz, hornos de ladrillo, etc.

El desarrollo del biogas ha contribuido además a la reforestación de China, al disminuir notablemente la demanda de carbón y leña, que durante varios milenios ha ido agotando bosques y suelos a costa de talas intensivas.

Cabe aclarar que por las características geográficas, económicas y demográficas de estos países, la mayoría de estos sistemas son a nivel familiar y comunidad rural, sin embargo, países occidentales como Inglaterra, han desarrollado sistemas a mayor nivel con diversos grados de automatización y disponibles comercialmente. Se tiene por ejemplo, el sistema de tratamiento de aguas negras de la Clu--

dad de Londres, en el que por medio de digestores, anaeróbicamente se procesan cerca de 650 toneladas por día de desechos domésticos y provenientes de una población de 7.5 millones de habitantes y una producción promedio de 9 millones de pies cúbicos de metano por día, con lo que el sistema satisface entre el 80 - 90% del total de sus requerimientos energéticos y el excedente es vendido como combustible.

Con los datos presentados, se ha pretendido resaltar la versatilidad del sistema en cuanto a magnitudes de aplicación y efectividad del proceso como técnica probada, sumando a lo anterior la multiplicidad de materiales de construcción y de materia prima que pueden ser utilizados. Al mismo tiempo se hace notoria la urgente necesidad de, sin recurrir a costosas tecnologías extranjeras, adecuar las experiencias obtenidas a las condiciones existentes del país.

Desde el punto de vista de los países en desarrollo, el biogas tiene la ventaja adicional de obtenerse en el lugar. Se simplifica así el costo de transportar la energía, sea electricidad, gas natural, o petróleo, elevadísimo en países con pobres infraestructuras. En especial para las generalmente desprovistas y aisladas zonas rurales. Finalmente son estos los grandes reservorios de energía animal.<sup>(4)</sup>

## **CAPI TULO III**

### **CONSIDERACIONES TEORICAS**

### CAPITULO III

#### CONSIDERACIONES TEORICAS

Dentro de los desechos orgánicos más comunes que se en encuentran en las comunidades rurales de nuestro país, están las de procedencia vegetal, tales como: rastrojos, pastos, cáscaras, etc., y los desechos de procedencia animal como lo son las excretas de ganado, conocido comunmente como estiércol.

El estiércol contiene muchas sustancias nutritivas (N, P, K,) benéficas para el crecimiento de las plantas.

Existen en el estiércol una gran cantidad de microorganismos, los cuales pueden ser clasificados en dos grupos, que son:

- Aeróbicos. - Estos necesariamente deben estar en contacto con el oxígeno para su proliferación.
- Anaeróbicos. - Los cuales proliferan en ausencia total de oxígeno.

Pueden existir microorganismos facultativos, los cuales pueden proliferar en ambos medios.

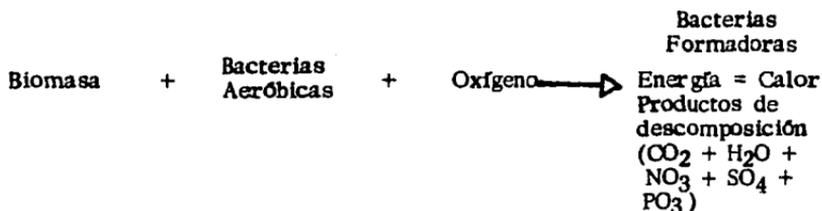
Estos dos grupos de microorganismos son capaces de des--

componer la materia orgánica y sus productos finales de descomposición son diferentes dependiendo del grupo que actúe.

### Digestión Aeróbica

La descomposición de la materia orgánica a partir de microorganismos aeróbicos, es conocida con el nombre de composteo y básicamente convierte las sustancias orgánicas en inorgánicas.

Durante esta descomposición se desprende calor y los microorganismos forman su propia sustancia (anabolismo) y segregan productos de desecho (catabolismo). De una manera esquemática, se podría representar el proceso de digestión aeróbica de la siguiente forma:



### Digestión Anaeróbica

El tratamiento anaeróbico puede ser considerado como un proceso de tres etapas, como se muestra en la Fig. 1. En la primera etapa, un grupo de microorganismos actúa sobre los substratos -

# FERMENTACION ANAEROBICA DE SOLIDOS ORGANICOS

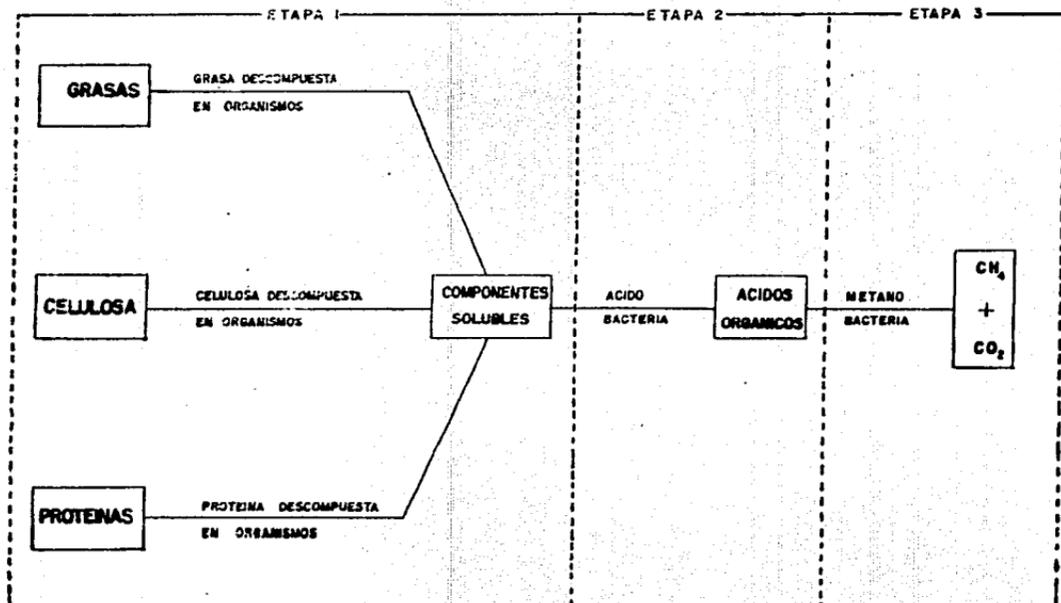


FIG. 1

# FERMENTACION ANAEROBICA DE SOLIDOS ORGANICOS

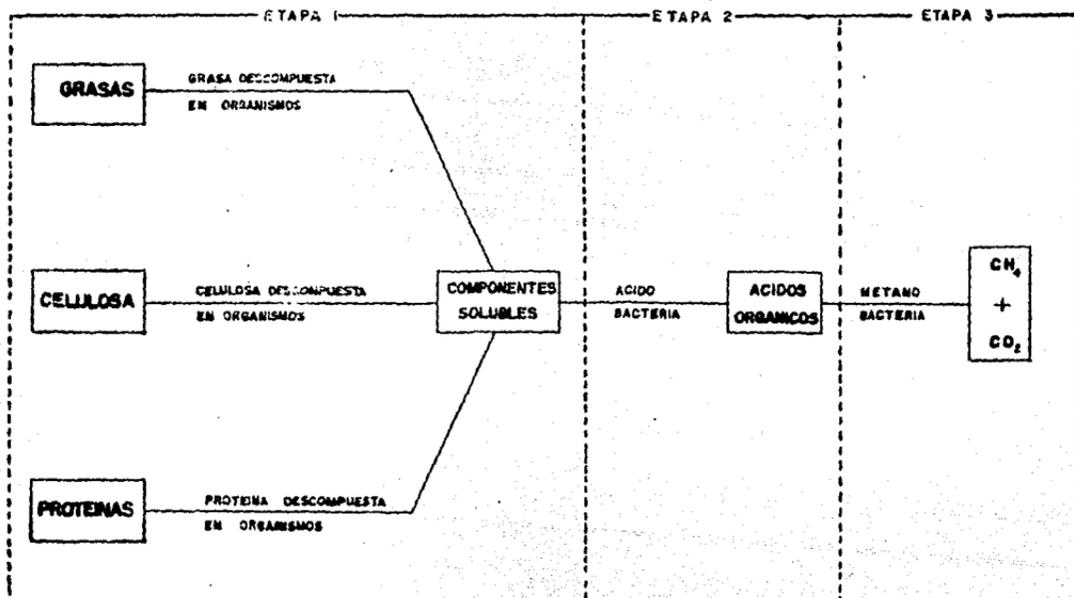


FIG. 1

orgánicos y por hidrólisis enzimática convierte a los polímeros en monómeros solubles que llegan a ser los sustratos para los microorganismos de la segunda etapa. En esta etapa estos compuestos se degradan formando ácidos orgánicos simples como el ácido acético, propiónico, etc. Las bacterias formadoras de ácidos, son de fácil reproducción y no son muy sensibles a cambios bruscos del proceso. La tercera etapa se refiere a la transformación de los ácidos orgánicos sensibles a metano y CO<sub>2</sub>, actuando en esta fase las bacterias metanogénicas, mismas que son difíciles de reproducir y demasiado sensibles a los cambios bruscos del medio ambiente. Estas bacterias son estrictamente anaeróbicas y pueden producir metano por dos caminos: por fermentación de ácido acético a metano y bióxido de carbono o por reducción de dióxido de carbono a metano usando gas hidrógeno que es producido por otras bacterias. La producción de metano, en la tercera etapa, reduce la cantidad de material remanente que demanda oxígeno. Esto hace que el producto final biológicamente sea estable.

El crecimiento bacteriano ocurre durante todas las etapas del proceso de fermentación; sin embargo, la proporción del sustrato total utilizado para soportar el crecimiento bacteriano, es bajo comparado al utilizado en los procesos biológicos aeróbicos.

Algunos autores consideran la digestión anaeróbica como un proceso de dos etapas, consistente la primera en una formación de áci

dos, comúnmente llamada licuefacción y la segunda en una formación de gases conocida como gasificación. (18) (19) (20)

### Microbiología y Substratos de la Primera Etapa

#### (Rompiamiento de Polímeros)

Los substratos iniciales de la primera etapa pueden ser - materiales de desecho (véase Tabla 1), compuestos principalmente por carbohidratos, con algunos lípidos, proteínas y material orgánico. Los principales carbohidratos son la celulosa y otros compuestos fibrosos, como la hemicelulosa y lignina. Estos no se encuentran solamente en los residuos de cosecha, sino también en desechos animales, ya que no son fácilmente digeribles.

Un amplio espectro de la bacteria anaeróbica, se requiere para solubilizar esos materiales, incluyendo bacterias que posean capacidades enzimáticas para degradar celulosa, grasas y proteínas.

La actividad celulolítica es la más crítica en la reducción de las materias primas a componentes orgánicos simples y solubles. La mayor fracción de la materia orgánica en las aguas negras y residuos agrícolas es celulosa (Tabla 2). Este compuesto consiste de unidades polimerizadas de glucosa en una cadena indefinidamente grande con ramifi

TABLA 1

**MATERIAL ORGANICO CON POTENCIAL PARA LA GENERACION DE METANO**

---

Residuos vegetales	Bagazo de caña de azúcar; hierbas, maíz y rastrojo; paja, forraje (desperdicios)
Desechos de origen animal	Estiércol y orina de ganado, excrementos de borregos, cabras, aves de corral; desechos del rastro -- (sangre, carne); desechos de la <u>pe</u> ca, <u>pie</u> l y lana.
Desechos de origen humano	Excrementos, orina
Productos derivados y desperdicios de las - industrias agrícolas (procesos industriales)	Bagazo, salvado, tabaco y semillas; sobrantes de procesos de frutas y vegetales; del azúcar (prensado), polvo de algodón de las industrias textiles.
Residuos forestales	Corteza de los arboles, ramas y - hojas.
Residuos de origen acuático	Algas marinas, jacinto marino

---

**TABLA 2**  
**COMPONENTES QUIMICOS DE LOS SEDIMENTOS DE LAS**  
**AGUAS NEGRAS <sup>(a)</sup>**

---

<b>COMPONENTE</b>	<b>PORCENTAJE</b> <b>(peso seco del tejido fibroso)</b>
Hémicelulosa	6.0
Celulosa	34.5
Lípidos	14.0
Proteínas	19.0
Potasa	34.0

---

a) Fuente: Maki (1954).

caciones bastante complejas. Las bacterias Cellulolyticas reducen la cadena y los ramales a dímeros y a moléculas de azúcar monoméricas, las cuales son convertidas en ácidos orgánicos.

Las bacterias celulolíticas se dividen en dos clases, dependiendo de la temperatura óptima a la que ocurre la digestión. Estas son: las bacterias mesofílicas, tienen un rango óptimo de 30 - 40°C, como en el rumen de la vaca, mientras que las especies termofílicas trabajan óptimamente a 50 - 60°C. Ambos grupos trabajan en un rango óptimo de pH de 6.0 - 7.0. Al producirse los ácidos orgánicos por rompimiento de la celulosa, el pH baja, por lo que al inicio de la fermentación y durante el proceso será necesario agregar una solución tampón (cal) para estabilizar el pH.

Cuando las bacterias formadoras de ácidos (etapa 2) y las formadoras de metano (etapa 3), están presentes en una reacción balanceada, el pH de la solución está en equilibrio, ya que los ácidos orgánicos serán consumidos conforme se vayan formando.

La conversión de celulosa y otras materias primas complejas a monómeros simples es probablemente la etapa limitante en la producción de metano, ya que la acción bacteriana es mucho más lenta en la etapa 1, que en la 2 o 3. La velocidad de hidrólisis bajo diferentes condiciones de temperatura, substrato y especies bacterianas se

muestra en la Tabla 3. La velocidad de hidrólisis es dependiente del sustrato y de la concentración bacteriana, así como de los factores ambientales de pH y temperatura.

### Substratos y Microbiología de la Segunda Etapa

#### (Producción de Ácidos)

Los componentes monoméricos obtenidos por el rompimiento hidrolítico que ocurre durante la primera etapa son el sustrato para la segunda etapa. Los ácidos son el producto final del metabolismo de los carbohidratos, siendo los principales el acético, propiónico y láctico. Las bacterias metanogénicas están muy restringidas en la utilización del sustrato, algunas especies pueden producir metano a partir de hidrógeno y dióxido de carbono, este sustrato es producido durante el catabolismo de los carbohidratos. El ácido acético es probablemente el sustrato simple más importante para la formación de metano; algunos estudios han mostrado que aproximadamente el 70% del metano es formado a partir del ácido acético.

La microbiología de la segunda etapa no está aún bien determinada. Muchas especies bacteriológicas están involucradas, y la proporción de ácidos, hidrógeno, dióxido de carbono y alcoholes simples producidos, depende tanto de la materia prima, como de las condiciones del medio ambiente.

TABLA 3

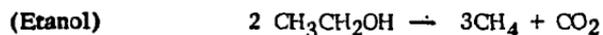
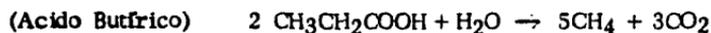
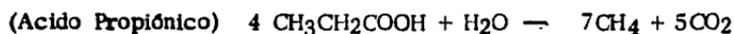
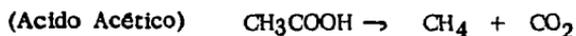
VELOCIDAD HIDROLITICA DE LA CELULOSA POR FERMENTACION ANAEROBICA

REFERENCIA	SISTEMA Y CULTIVO	CONCENTRACION DE LA CELULOSA (mg/l)		MATERIAL CELULOLITICO	pH	VELOCIDAD HIDROLITICA (mg/l por día)	
Maki	Batch, Mezcla de 2 cultivos puros de aguas negras a 38°C, mesofílico.	2,000		Whatman papel filtro # 1	6.8	(1)*	260
						(2)*	660
Henkelektan	Batch, cultivo puro de aguas negras a 25°C, mesofílico	3,120		Celulosa en sedimentos de aguas negras	7.4		142
McBee	Batch, cultivo puro de tierra y estiércol a 55°C, termofílico	1)	744	algodón absorbente		(1)*	149
		2)	2,980			(2)*	426
Stränke	Batch, mezcla de cultivo del rumen a 60°C, termofílico	41,200		Whatman papel filtro # 2	6.5		11,400

\* Experimentos con diferentes filtros.

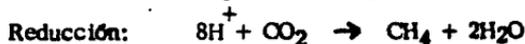
Substratos y Microbiología de la Tercera Etapa( Producción de Metano)

Esta etapa es conocida como la etapa metanogénica. Las siguientes ecuaciones muestran la obtención de metano como producto de la fermentación de ácido acético, propiónico, butírico, etanol y acetona.



Observándose que la naturaleza de los productos finales es independiente de la estructura del substrato original. La teoría de reducción del carbón publicada por Van Nier en 1938, es todavía aceptada, se basa en la fermentación de compuestos orgánicos por las bacterias metanogénicas que son completamente oxidadas a bióxido de carbono y este proceso de oxidación va seguido por uno de reducción, el cual una parte o el total de bióxido de carbono es reducido a metano.

La fermentación de Van Nier para el acetato es la siguiente:



Los microbios que afectan esta etapa son grupos fisiológicamente especiales de bacterias comunmente referidas a la bacteria "productora de metano". Las bacterias metanogénicas son altamente susceptibles a cambios bruscos de temperatura y a la presencia de oxígeno en el medio, trazas de éste, pueden destruir las bacterias en pocos minutos. Otra característica es que poseen un alto sistema metabólico con producción de metano como el mayor producto. La capacidad de metabolizar el metano, no es una característica común de todas las bacterias anaeróbicas, está restringida a un grupo especializado.

Como un grupo, las bacterias metanogénicas son también altamente específicas en el tipo de sustratos que pueden utilizar. La tabla 4 muestra algunas especies de bacterias metanogénicas y el sustrato que son capaces de utilizar.

Las bacterias metanogénicas muestran un desarrollo extremo de especificidad al sustrato. A manera de ejemplo podemos decir que para completar la fermentación de un compuesto simple, como es el ácido valérico, se requieren tres especies de bacterias. El valerato es inicialmente oxidado por *Mb syboxidans* en acetato y propiónico, los cuales no pueden ser procesados por este organismo. Una

TABLA 4

ESPECIES DE METANOBACTERIAS	SUBSTRATOS OXIDABLES
Metanobacteria Formicium	H <sub>2</sub> , CO, Formato
Metanobacteria Omellanski	H <sub>2</sub> , Etanol, Alcoholes primarios y secundarios
Metanobacteria Syboxidams	Butyrato, valerato, caproato
Metanosarcina Barkerii	H <sub>2</sub> , CO, metanol, acetato

segunda especie, *Mb propionicum*, metaboliza el propiónico en acetato, bióxido de carbono y metano, esta especie no puede reducir el acetato. Por lo tanto, una tercera especie, la *methano sarcina methánica* es requerida para formar el acetato. Una población balanceada de bacterias debe estabilizar el desarrollo del cultivo capaz de causar una rápida y completa fermentación de mezclas completas de compuestos orgánicos.

Otro factor importante del crecimiento de las bacterias metanogénicas es la concentración del ión hidrógeno. Estas bacterias crecen mucho más rápido en el rango de pH entre 6.4 y 7.2. Abajo de 6 y arriba de 8, la velocidad de crecimiento de las bacterias metanogénicas decrece drásticamente.

La tabla 5 muestra diez especies de bacterias metanogénicas, las cuales metabolizan compuestos orgánicos y los correspondientes substratos de reacción.

TABLA 5

METABOLIZACION ORGANICA POR ESPECIES DE METANOBACTERIAS  
Y SUS CORRESPONDIENTES PRODUCTOS DE REACCION<sup>II</sup>

<u>Organismos</u>	<u>Reacciones</u>
Metanobacteria Soehngeni Metacoccus Mazei Metanosarcina Metánica	$\text{CH}_3\text{COOH} \longrightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$
Metanosarcina Barkeri Metanobacteria Propionicum Metanococcus Mazei	$4\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 7\text{CH}_4 + 5\text{CO}_2$
Metanosarcina Metánica	$2\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 5\text{CH}_4 + 3\text{CO}_2$
Metano Bacteria Syboxidams	$2\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{CH}_4 + 4\text{CH}_3\text{COOH}$
Metanobacteria Omelianskii	$2\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} \longrightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2$
	$2\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{CH}_4 + 2\text{CH}_3\text{COOH}$
Metanobacteria Syboldams	$\text{CH}_3\text{COCH}_3 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{CH}_4 + \text{CO}_2$

## PARAMETROS QUE GOBIERNAN EL PROCESO DE LA DIGESTION

Los desechos orgánicos constituyen la materia prima en el proceso de generación de biogas, su composición y propiedades varían ampliamente atendiendo a factores como: clima, tipo de suelo o alimentación, condiciones de cultivo o crianza, estado de desarrollo o raza que los genera, así como también forma de recolección, manejo y estado físico de los mismos. Por todo lo anterior, no ha sido posible establecer un método único para caracterizarlos cuantitativa y cualitativamente. (2)

Como mencionamos anteriormente, las bacterias anaeróbicas, son las responsables de convertir la materia orgánica a gas metano ( $\text{CH}_4$ ), con dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) como subproductos. Análisis químicos de las bacterias anaeróbicas muestran la presencia de carbón, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, fósforo, sodio, magnesio, calcio y azufre. Estos elementos, al lado de trazas de materiales inorgánicos y orgánicos usualmente presentes en algunas materias primas, son usadas en la fermentación del metano, siendo esenciales para el crecimiento de las bacterias anaeróbicas; mismas que deben tener una dieta bien balanceada para realizar su metabolismo. Una dieta balanceada significa cantidades adecuadas de nutrientes, como nitrógeno y fósforo. El nitrógeno es generalmente el más importante, ya que limita el crecimiento bacteriano, y por lo tanto,

la velocidad y eficiencia en la producción de metano. Una dieta bien balanceada para las bacterias anaeróbicas requiere de aproximadamente 30 veces más de carbono que nitrógeno, de ahí que será necesario conocer la cantidad aproximada de la composición de ambos elementos antes de alimentar al digestor.

Asumiendo que la materia prima disponible es suficiente - en el lugar, otras condiciones ambientales deben satisfacerse para el crecimiento bacteriano: el porcentaje de sólidos alimentados al digestor, el rango de temperatura, la acidez o alcalinidad de la mezcla digerible, etc.

### Materia Prima

La tabla 6, da una idea general de la cantidad de energía - que se puede obtener de los desechos animales. Las tres variables mínimas (peso del animal, confinamiento de los animales y la recolección del estiércol). La tabla 7, muestra más específicamente como varía la producción con el peso del animal. El estiércol depositado en campo abierto, es obviamente más difícil de recolectar y transportar al digestor. Si el ganado patea durante el día en campo abierto y es estabulado durante la noche, se garantiza la recolección de la mitad del estiércol producido.

La tabla 8, da valores aproximados de las porciones digeribles de una variedad de materias primas. Estos datos han sido obtenidos

**TABLA 6**  
**PRODUCCION DE MATERIAS PRIMAS** <sup>10</sup>

Animal Adulto (promedio)	Porción de orina <sup>(a)</sup>	Porción fecal <sup>(a)</sup>
Bovinos (1000 lb)	20.0	52.0
Caballos (850 lb)	8.0	36.0
Cerdos (160 lb)	4.0	7.5
Oveja (67 lb)	1.5	3.0
Humanos (150 lb)	2.2	0.5

a) lb de desechos por animal por día.

**TABLA 7**  
**PRODUCCION DE DESECHOS DE PUERCO**  
**VS. PESO 10**

<b>Peso del puerco (lb)</b>	<b>Feces (a)</b>	<b>Orina(a)</b>	<b>T o t a l</b>
40 - 80	2.7	2.9	5.6
80 - 120	5.4	6.1	11.5
120 - 160	6.5	8.1	14.6
160 - 200	8.5	9.1	17.6

a)  
lb por día

TABLA 8  
COMPOSICION DE MATERIAS PRIMAS<sup>10</sup>

Material	% Humedad	% Total de sólidos (ST)	Sólidos volátiles (%ST)	% C	% N	Relación C:N
Desperdicio vegetal	1.0	99.0	77.8	54.7	3.04	18
Papel Kraft	6.0	94.0	99.6	40.6	0	
Periódico	7.0	93.0	97.1	40.6	0.05	813
Desechos de jardín	24.8	75.0	87.0	-	-	-
Abeto blanco	9.3	90.7	99.5	46.0	0.06	767
Desperdicios promedio	7.3	92.7	63.6	33.4	0.74	45
Desechos de gallina	9.8	90.2	56.2	23.4	3.2	7
Desechos de novillo	45.7	54.3	68.5	34.1	1.35	25
Desechos de novillo (fresco) <sup>a)</sup>	86.0	14.0	80.0	30.8	1.7	18
Desechos de caballo <sup>a)</sup>	84.0	16.0	80.0	57.5	2.3	25
Desechos de ovejas <sup>a)</sup>	87.0	13.0	85.0	-	3.8	-
Desechos de puerco <sup>a)</sup>	89.0	11.0	80.0	-	3.8	-
Orina humana	94.0	6.0	75.0	14.4	18.0	.08
Feces humanas	73.0	27.0	92.0	36.0 - 60.0	6.0	6 - 10
Desechos de gallina (frescos)	65.0	35.0	65.0	-	-	-

a)  
Incluyen orina

nidos bajo condiciones experimentales específicas, las cuales pueden variar en cualquier otro caso. (10)

Las características de esta materia prima variarán como se dijo anteriormente para cada caso específico de aplicación, debido a diferentes factores, tales como: dieta alimenticia, clima, especie de ganado, recolección, almacenamiento, etc., sin embargo, conociendo el tipo de desecho que se va utilizar en el proceso digestivo, se pueden fijar las condiciones de operación.

Al principio del capítulo se analizó el desarrollo que sufre el proceso biológico de fermentación de los desechos, tomando solamente en cuenta las características de las bacterias que participan en el proceso y su comportamiento al transformar la materia orgánica. Sin embargo para que el proceso se desarrolle en forma eficiente, es necesario el control de una serie de parámetros que afectan en forma directa la vida y reproducción de las bacterias.

Es necesario por lo tanto, conocer estos parámetros y analizarlos para poder controlarlos en un momento determinado, ya que según las condiciones del medio ambiente impuestas, será la eficiencia de la digestión de la materia orgánica. Las condiciones necesarias para optimizar el proceso de digestión anaeróbica dependen directamente de los siguientes parámetros:

- Temperatura
- Tiempo de residencia
- Porcentajes de sólidos
- Relación C : N
- pH

Analizando en forma independiente cada uno de estos parámetros se podrá observar la influencia que tienen en el proceso.

### Temperatura

Se puede decir que este parámetro es el que tiene mayor influencia en el proceso de fermentación anaeróbica, ya que la relación de producción de gas contra temperatura, así lo muestra.

La digestión anaeróbica puede ocurrir dentro de un rango de temperaturas entre 5 y 55°C. Dentro de este rango de temperatura encontramos dos zonas de operación del sistema, en las cuales hay una producción óptima de gas. Estas zonas se caracterizan por el tipo de bacterias productoras de gas, las cuales trabajan a diferentes temperaturas.

Estos rangos de operación son: el mesofílico que trabaja entre 30 - 40°C y el termofílico, entre 50 - 60°C. Cada uno de estos rangos ofrece ventajas y desventajas. Ver Fig. 2.

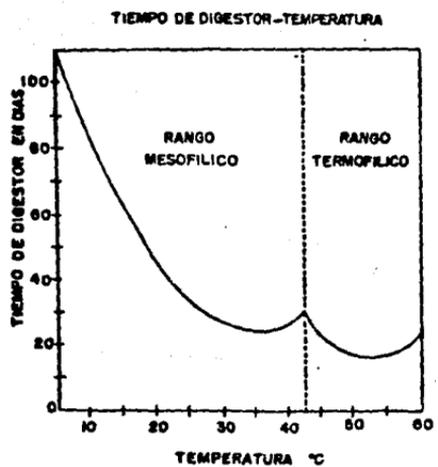


FIG. 2

El rango termofílico ofrece grandes ventajas en comparación con el mesofílico, en cuanto a tiempo de residencia se refiere, ya que un mismo volumen de materia orgánica es digerida en menor tiempo; sin embargo, tiene dos desventajas. La primera consiste en que las familias de bacterias que proliferan en este rango son muy sensibles a los cambios bruscos de temperatura, lo que hace necesario un control muy eficiente del sistema para evitar la variación de temperatura. La otra desventaja que presenta este rango de trabajo es que para mantener el sistema a una temperatura mucho más elevada que la temperatura ambiente, se haría necesario la introducción de un sistema de calefacción y un aislamiento muy eficiente.

El trabajar con bacterias del rango mesofílico, es una gran ventaja, ya que sólo bastaría precalentar la mezcla de alimentación para mantener temperaturas aceptables.

Durante las etapas de investigación que se han desarrollado para estudiar el proceso digestivo, se encontró que en el rango mesofílico, la temperatura óptima de operación es de 35°C. Fig. 2.

Esto no significa en ningún momento que el proceso no se pudiera llevar a cabo si la temperatura no es la óptima, sino que lo único que no va a verse afectado será el tiempo de residencia para lograr el mismo grado de conversión del máximo posible a cada temperatura.

En la Fig. 3, se muestran las curvas correspondientes a la producción de gas con respecto al tiempo de residencia de los desechos dentro del digestor a diferentes temperaturas, así como una curva que compara el tiempo de residencia que debería cumplir una determinada cantidad de desechos dentro del digestor para sufrir el mismo porcentaje de conversión del máximo posible a esa temperatura.

Las formas de poder controlar este parámetro son sencillas al no trabajar con temperaturas muy elevadas. Dentro de las formas de controlar la temperatura, están un aislamiento del digestor, una carga de materia prima diluida con agua calentada con energía solar y evitar con esto tener que quemar una cierta cantidad de gas que se produce para mantener la temperatura del digestor, enterrarlo, etc.

Ya que el tiempo de residencia es función directa de la temperatura de operación, analizaremos ahora el tiempo de residencia.

### Tiempo de Residencia

El tiempo de residencia es un factor muy importante dentro de la selección o el diseño de un digestor. Como tiempo de residencia se entiende el tiempo que se requiere para degradar completamente la materia orgánica. En un digestor tipo batch, trabajando en un rango mesofílico, este tiempo es aproximadamente de seis meses (estimado).

Para calcular el tiempo de residencia de un digestor, es ne-

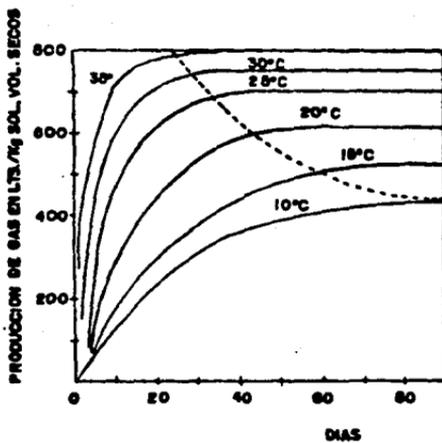


FIG.3

cesario definir el porcentaje de degradación que se quiere obtener del máximo posible en las condiciones de trabajo. El menor tiempo de residencia que es posible para el proceso trabajando a toda su capacidad (termofílico) es aproximadamente doce días, para lograr una conversión equivalente al 50%.

De las conclusiones sacadas en los experimentos que desarrollaron en el Instituto de Investigaciones Eléctricas, fue el obtener tiempos de residencia muy aproximados para la misma producción de gas, de tres diferentes experimentos, lo que sirvió para considerar que solamente con mantener las unidades enterradas y realizando la dosificación diaria con la mezcla precalentada era suficiente para conservar una temperatura de operación buena (28-30°C) que aunque no es la óptima puede mantenerse sin sufrir grandes variaciones.

Para esta temperatura el tiempo de residencia óptimo equivaldría a 28 o 30 días aproximadamente, para lograr la misma conversión que si se opera a 35°C con un tiempo de residencia de 20 a 22 días.

Finalizando, hay que recordar que los cambios bruscos de temperatura afectan fuertemente el metabolismo de la bacteria, lo que ocasiona una variación en la producción de gas, por lo que cuando se opere un digestor de desechos se tratará de mantener la temperatura de operación constante.

### Porcentaje de Sólidos

Este parámetro es importante, ya que dependiendo del tipo de desecho que se maneje será el porcentaje de sólidos que contenga, se debe encontrar un grado óptimo de dilución de estos desechos, con la finalidad de hacer más productivo el proceso.

Ya que el agua cumple un papel activo, tanto en la hidrólisis como en la formación de metano y además como medio para el substrato bacteriano, determinar analíticamente los requerimientos que de ella tiene el sistema, sería prácticamente imposible, por lo que los datos de sólidos totales óptimos han sido sacados experimentalmente, siendo además función del tipo de digestor y del tiempo de residencia.

De la experimentación se obtuvo: \*

La máxima producción de gas, se obtuvo en los digestores cargados con 4.1 y 5.7% de sólidos totales, en los cargados con 7.5 y 8.5 de sólidos totales (ST) la producción de gas fué 72.3% de la obtenida en los dos primeros y en los dos últimos con 13.0 y 15.3% de ST fué el 46.8% de la máxima obtenida, la Fig. 4, muestra la producción de gas correspondiente a los ST ensayados, en la práctica se ha encontrado que el porcentaje óptimo de sólidos está alrededor del 7% para digestores de flujo continuo, algunos autores amplían este rango entre

---

\* Aprovechamiento de Desechos Orgánicos en las Granjas "Cedena".  
Jaime Raymundo Cosío, Cuernavaca, Mor. 1978

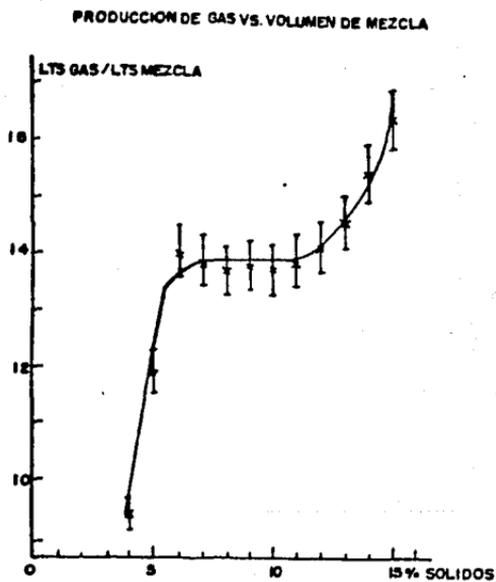


FIG. 4

5 - 15% de ST para este tipo de digestor y de hasta 25% de ST para uno Batch.

### Relación Carbono/Nitrógeno

Los organismos anaeróbicos descomponen el material orgánico conservando la cantidad de nitrógeno que entra al digestor y fijándolo en la mezcla digerible, al mismo tiempo que el material carbonoso es volatilizado y convertido en metano y bióxido de carbono.

La cantidad de gas que se produce puede incrementarse si predomina el material carbonoso que se agrega en la mezcla digerible, tal como pastos o en general materia vegetal.

Cuando la materia prima contiene una composición balanceada, tanto de celulosa y hemicelulosa, como de compuestos nitrogenados de naturaleza protefínica se podrá ejercer un control sobre el pH y mantenerlo dentro de las condiciones deseadas. La tabla 9, muestra la composición aproximada de algunos materiales orgánicos que son comunes y el volumen del gas que produjeron durante un periodo de experimentación de cuatro semanas a nivel escala laboratorio.

Con todo lo anterior se puede observar la ventaja de poder utilizar una mezcla de desechos, tanto para aumentar la producción de gas, como para aumentar la utilización de desechos generados en la comunidad.

TABLA 9

COMPOSICION APROXIMADA Y PRODUCCION DE GAS A PARTIR DE DIFERENTES MATERIALES ORGANICOS EN CONDICIONES DE LABORATORIO\*  
( Se emplearon 50 gra. de material secado al aire )

MATERIALES	COMPOSICION APROXIMADA** (%)					VOLUMEN DE GAS PRODUCIDO EN 4 SEMANAS (ml)	COMPOSICION DEL GAS EN VOL. (%)			
	Almidón	Celulosa	Hemi-celulosa	Lignina	Proteínas		CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> etc.
Papa	81.12	2.66	4.28	--	2.10	4,825	--	34.5	59.4	6.1
Maíz	80.36	5.12	5.84	--	3.60	3,700	--	67.2	25.6	7.2
Papel filtro	--	99.66	--	--	--	1,525	51.6	26.2	--	22.2
Aserrín	1.82	53.64	9.82	28.25	1.77	170	16.4	27.2	--	56.4
Cacahuete	7.54	8.54	6.26	3.20	31.66	1,300	44.3	24.2	--	31.5
Cáscara de cacahuete	0.26	16.82	42.21	15.73	14.82	18,200	70.5	28.4	--	1.1
Bagazo de caña	5.46	48.12	23.68	13.95	3.37	8,370	41.4	25.4	--	33.2
Peptona	--	--	--	--	94.20	3,500	--	51.5	--	48.5
Sangre	--	--	--	--	78.10	1,975	--	64.6	--	35.4
Cáñamo (1)	8.86	26.46	18.32	10.87	16.18	10,070	51.9	33.3	--	14.8
Deincha (2)	10.12	20.48	22.12	8.85	16.01	10,780	60.4	28.7	--	10.9
Legumbrea	16.68	7.10	21.20	10.60	25.11	18,725	60.6	26.7	--	12.7
Estiércol de vaca	5.24	28.59	26.01	17.72	8.28	18,560	56.6	30.5	6.8	6.1

\* Basado en datos de Acharya

\*\*La porción restante es la fracción soluble en éter y soluble en agua.

(1) *Crotalaria juncea* L

(2) *Sebania aulcata*

Ahora bien, lo importante es saber que esta composición balanceada de material orgánico, se controla por medio de la relación C:N que tiene la mezcla digerible, el valor óptimo de esta relación es 30:1 y está basado en la cantidad de carbono que asimilan los microorganismos con respecto a la cantidad de nitrógeno.

La tabla 10, provee una lista de desechos que son muy comunes y sus características más importantes incluyendo la relación C:N.

A continuación se indicará la forma de poder obtener la relación C:N óptima cuando se mezclan los desechos.

$R_x$	Relación carbono/nitrógeno de un material x
$C_i$	Cantidad de carbono de un material x
$N_x$	Cantidad de nitrógeno de un material x
$N_t$	Cantidad de nitrógeno total de la mezcla
$C_t$	Cantidad de carbono total de la mezcla
$D_x$	Peso seco de un material x
$M_x$	Porcentaje de humedad del material x
$CN_x$	Porcentaje de nitrógeno en peso seco del material x

La relación  $R_x$  de una cantidad de carbono ( $C_x$ ) a una cantidad de nitrógeno ( $N_x$ ) de algún material conocido x, se conoce como relación carbono/nitrógeno, y se puede escribir:

$$R_x = \frac{C_x}{N_x} \quad \text{Ec. (1)}$$

TABLA 10

PROMEDIO DE PRODUCCION, CANTIDAD DE NUTRIENTES,  
CONTENIDO DE HUMEDAD Y RELACION C:N DE MATERIALES ORGANICOS COMUNES

TIPO DE MATERIAL ORGANICO	N U T R I E N T E S					Relación C:N
	Kgs/dña	% humedad	N	P	K	
Heces humanas	0.20	73.0	6.0	4.2	1.8	8.0
Orina seca	0.06	94.0	17.0	3.7	3.7	0.8
Estiércol de vaca:	32.70	80.0	1.7	1.1	0.5	25.0
Alimentado con alfalfa	40.80	80.0	2.6	-	-	16.0
Alimentado con paja de arroz		78.0	2.0	-	-	21.4
Caballos, bueyes, mulas	27.20	75.0	2.3	1.3	1.4	25.0
Cerdos	4.10	82.0	3.8	3.1	2.5	14.4
Ovejas, chivos	1.50	68.0	3.8	1.9	1.3	20.1
Conejos			1.7			
Pavos		75.0	4.2			8.3
Pollos	0.16	56.0	6.3			5.2
Aserrín			0.1			511.0
Hierba desbrozada		6.5	2.2			19.0
Paja de avena			0.5			83.0
Hojas secas		50.0	0.2			203.0
Sangre			12.0			3.0
Carne			5.1			-
Trapos		10.0	4.6			12.0
Desechos domésticos		3.2	0.5			41.0
Puntas de caña de azúcar			0.3			113.0
Paja de trigo			0.3			124.0
Rastrojo y hojas de maíz			0.8			53.0

La cantidad total de nitrógeno ( $N_t$ ) es igual a la suma de las cantidades de nitrógeno de los diferentes tipos de desechos, por lo tanto:

$$N_t = \sum_1^k N_1 + N_2 + \dots + N_k \quad \text{Ec. (2)}$$

El subíndice indica varias fuentes de desechos y similarmente para el contenido total de carbono:

$$C_t = \sum_1^k C_x = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_k \quad \text{Ec. (3)}$$

Conociendo el peso seco de los diferentes desechos utilizados ( $D_x$ ) se obtienen mejores resultados, cuando es el caso de trabajar con materiales heterogeneos, tales como estiércoles y otros tipos diferentes de materia orgánica. Por lo tanto si  $O_x$  es la cantidad de un material y  $M_x$  es su porcentaje de humedad, su peso será:

$$D_x = O_x - (O_x) (M_x)$$

$$D_x = O_x - (1 - M_x) \quad \text{Ec. (4)}$$

$D_x$  = puede determinarse usando la tabla 9, o por medición y  $M_x$  puede determinarse fácilmente conociendo el peso del desecho después de calentarse en una estufa, o utilizando también la tabla 10 ( $D_x$  puede ser determinado fácilmente por la Ec. 4). Por supuesto,  $D_x$  también puede determinarse directamente, ya que es el peso seco después de que la muestra se calentó en la estufa.

Una vez conocido el peso seco del desecho, la cantidad de nitrógeno se puede calcular fácilmente utilizando la ecuación:

$$N_x = (D_x) (CN_i) \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde  $CN_i$  = porcentaje de nitrógeno en peso seco. Ver tabla 9

Combinando las Ecs. (1), (4) y (5) y despejando la cantidad de carbono (el cual es desconocido) y, ya que  $O_x$  se determinó previamente,

$$C_x = R_x CN_i O_x (1 - M_x) \quad \text{Ec. (6)}$$

La ecuación (6) puede escribirse como:

$$O_x = \frac{C_x}{(R_x) (CN_i) (1 - M_x)} \quad \text{Ec. (7)}$$

y poder utilizarla si se conoce el contenido de carbono de un material en particular.

Ejemplo: Como calcular la relación de carga óptima para un digestor hipotético (Ver tabla 10).

Este digestor se cargaría con el desecho de cuatro personas, su orina, el estiércol de diez cabezas de ganado y aserrín de desecho. Las características de estos desechos se muestran en la tabla 11 ,

Ya que:

$$\frac{C_f}{N_f} = 30 \text{ para una digestión óptima de desechos}$$

Y de la tabla 10:

$$C_t = 9.5 + 3.1 + 3121.2 + C_4; \quad N_t = 1.2 + 3.8 + 124.8 + N_4$$

Substituyendo:

$$30 = \frac{C_4 + 3133.8}{N_4 + 129.8}$$

De la tabla 10, Ec. (1) y Ec. (5)

$$C_4 = (N_4) (511)$$

$$N_4 = (D_4) (0.0011)$$

Utilizando la Ec. (4)

$$D_4 = O_4 \quad (\text{donde: } M_4 = O, \quad D_4 = O_4)$$

Y por sustitución y transposición:

$$30 (0.0011 O_4 + 129.8) = (0.0011 O_4) (511) + 3133.8$$

Despejando  $O_4$ :

$$O_4 = 1436.7 \text{ Kgs.}$$

Por lo tanto:

$$N_4 = 1.58 \text{ Kg} \quad \text{y} \quad C_4 = 807.4 \text{ Kg}$$

Resolviendo para las cantidades adicionales de materiales desconocidos ( $O_4$ ) de la misma sustancia ( $x = 4$ ), con la concentración de nitrógeno ( $CN_4$ ) y la relación C:N ( $R_4$ ) conocidas, es posible poder escribir:

$$R_t = \frac{C_t}{N_t} = \frac{C_x}{N_i} = \frac{C \text{ conocidos} + C_4}{N \text{ conocidos} + N_4} \quad \text{Ec. (8)}$$

$$30 = \frac{C \text{ con} + C_4}{N \text{ con} + N_4} = \frac{C \text{ con} + (N_4)(R_4)}{N \text{ con} + (D_4)(CN_4)} = \frac{C \text{ con} + R_4 (CN_4)(D_4)}{N \text{ con} + (CN_4)(D_4)}$$

De donde:

$$D_4 = \frac{30 N \text{ con} - C \text{ con}}{(R_4 - 30) (CN_4)} \quad \text{Ec. (9)}$$

$$O_4 = \frac{30 N \text{ con} - C \text{ con}}{(R_4 - 30) (CN_4) (1 - M_4)} \quad \text{Ec. (10)}$$

O también:

$$D_4 = \frac{30 N_x - C_x + N_4 R_4 - 30 N_4}{(CN_4) (R_4 - 30)} \quad \text{Ec. (11)}$$

$$O_4 = \frac{30 N_x - C_x + N_4 R_4 - 30 N_4}{(CN_4) (R_4 - 30) (1 - M_4)}$$

Como una fórmula general para poder determinar las cantidades de cualquier desecho a agregar, se debe utilizar una tabla similar a la del ejemplo para poder determinar la carga óptima en un determinado momento. (6)

TABLA 11

UN EJEMPLO DE COMO CALCULAR LA RELACION DE LA CARGA OPTIMA DE UN DIGESTOR HIPOTETICO<sup>\*1</sup>

X Tipo de Desecho	(O <sub>x</sub> ) 3 meses peso (Kgs)	(100 M <sub>x</sub> ) % mezcla	(D <sub>x</sub> ) peso seco (Kgs)	(100 C:N) % N	(N <sub>x</sub> ) N(Kgs)	R <sub>x</sub> C <sub>x</sub> /N <sub>x</sub>	C <sup>*2</sup> (Kgs)
1 Desecho de cuatro personas	73,5	73	20	6	1.2	8	9.5
2 Orina <sup>*3</sup>	(720 pts)	-	22.8 <sup>*4</sup>	17	3.8	0.8	3.1
3 Estiércol de 10 cabezas de ganado	36,774	80	7,354.8	1.7	124.8	25	3,121.2
4 Aserrín	O <sub>4</sub> <sup>*5</sup>	Despreciable	D <sub>4</sub> <sup>*5</sup>	0.11	N <sub>4</sub>	511	C <sub>4</sub>
T O T A L E S	36,847.5 + O <sub>4</sub>		7,397.6 + O <sub>4</sub>		129.8 + N <sub>4</sub>		3,133.8 + C <sub>4</sub>

\*1 O<sub>x</sub>, N<sub>x</sub>, CN<sub>x</sub>, R<sub>x</sub> fueron obtenidos de la tabla 7.

\*2 C<sub>s</sub> = R<sub>x</sub>N<sub>c</sub> de la ecuación 7.

\*3 Según la referencia: Gotaas, H.B. 1956 p. 35

\*4 1 pint = 0.125 gal = 0.07 lbs peso seco = 0.03 Kgs.

\*5 O<sub>4</sub> = cantidad de aserrín; D<sub>4</sub> = peso seco del aserrín, pero ambos son desconocidos.

## pH

Inicialmente las bacterias formadoras de ácidos, se encarga rán de destruir la materia orgánica y producir ácidos grasos volátiles. Como resultado de esta fase, la acidez del proceso es incrementada, lo cual se nota en el decremento de pH, el cual se encontrará por debajo del valor neutro. Después de un par de semanas, las bacterias formadas de metano comenzarán a ejercer su acción sobre los ácidos grasos volátiles, degradándolos a metano, lo que volverá a incrementar el valor del pH (Fig. 5). Otro factor que tiende a incrementar el valor del pH durante este tiempo, es el contenido de amoníaco, el cual aumenta cuando son degregadas las proteínas. El amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), se encuentra disuelto en agua en forma de alcalí ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ). Esto tiende a neutralizar la acidez. Por lo tanto como el pH se incrementa sobre el valor neutro de 7, mayor producción de amoníaco, será tóxico para la formación de metano, Fig. 6.

El tercer factor que tiende a prevenir las condiciones favorables de pH en la digestión de los desechos, son los cambios sufridos en la alcalinidad, debido a la formación de bicarbonatos. La concentración del ión bicarbonato ( $\text{HCO}_3$ ) es directamente proporcional al contenido de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en el gas y al pH. Por lo tanto, si la materia orgánica está siendo destruida por las bacterias, ésta aprovechará el acetato formado para producir metano y liberará  $\text{CO}_2$ , lo cual original

A- LICUEFACCION ACIDA +  
FERMENTACION

B- DIGESTION DE MATERIALES  
RESISTENTES

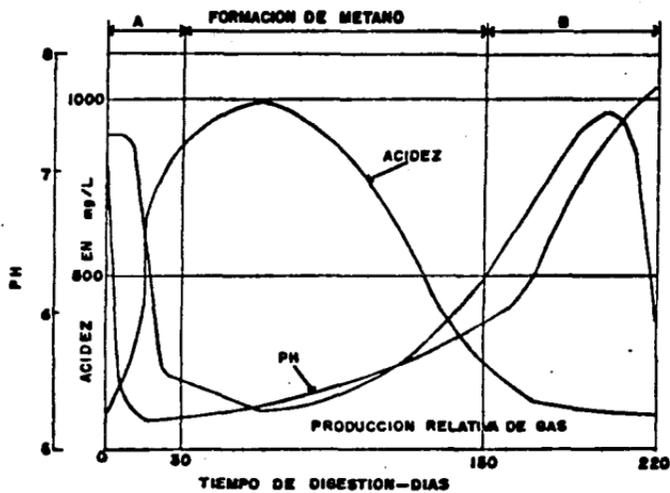


FIG. 5

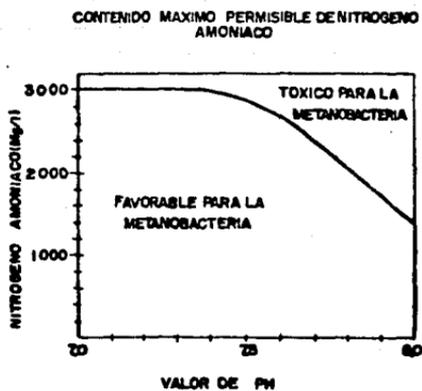


FIG. 6

rá un exceso de  $\text{CO}_2$  en el gas y de ahí que existirá una gran concentración de  $\text{CO}_2$  disuelto en el líquido como bicarbonato. Esto tenderá también a prever una disminución en el valor del pH, lo que provocaría en un determinado momento, la muerte de las bacterias formadoras de metano, cuyo pH óptimo se encuentra entre 7 y 8, (ligeramente alcalino).

Después de que se ha operado un digestor en régimen de lote (Batch) por varias semanas, el pH asciende bajo esta influencia y la producción de metano llegará a un máximo y esto ayudará a balancear la formación de ácidos producidos por la destrucción de la materia orgánica. Por lo tanto, después de varios meses, la materia orgánica se irá degradando hasta quedar completamente agotada y la producción de metano llegará a su fin.

Lo anteriormente expuesto abarca todos los factores que están íntimamente ligados y que van a tender a mantener el pH dentro de un rango correcto (entre 7 y 8) que ayude a la digestión y a la producción de metano. Naturalmente que cuando empieza la operación de un digestor, la población de bacterias formadoras de ácidos será mayor y esto traerá como consecuencia que exista mayor materia orgánica y que el pH sea bajo. Cuando las cantidades de bacterias sean balanceadas, se provocará que exista un equilibrio en el valor óptimo de pH y con esto, que el proceso no sufra fluctuaciones fuertes. Por lo tanto, si -

las condiciones del medio ambiente donde se desarrolla el proceso son alteradas bruscamente, la acción de las bacterias productoras de metano será inhibida y la acción de la bacteria formadora de ácidos se promoverá, esto ocasionará que el digestor se encuentre fuera de balance.

Si se trabaja con digestores de alimentación continua y se encuentran con problemas de acidez, una forma de poder solucionar esto es suspendiendo la carga por algunos días. Esto dará tiempo a que se reproduzca la bacteria formadora de metano y que reduzca la concentración de ácidos grasos volátiles. Cuando se trabaja en un régimen continuo donde no existe la posibilidad de poder suspender por un tiempo la alimentación a los digestores, se puede aumentar el pH agregando hidróxido de calcio, el cual es alcalino. Esto puede sin embargo, ser desventajoso si el pH aumenta a un valor muy alto, ya que el bióxido de carbono del digestor se combinará con el hidróxido de calcio para formar carbonato de calcio, el cual es muy insoluble en agua. Esto no solamente removerá el bióxido de carbono (que es una fuente de alimentación para la bacteria metanogénica) sino que formará una costra interna en el digestor. Esta costra provoca una disminución de transferencia de calor cuando se trabaja con digestores provistos de calefacción y al mismo tiempo de retención de los desechos en el digestor.

### Formación de Natas

Uno de los problemas graves que se presentan durante el -

proceso de digestión de los desechos, es la formación de natas en la su perficie del digestor.

Todos los desechos, principalmente los de origen vegetal, - contienen materia orgánica que durante el proceso no alcanza a digerirse, parte de ésta se acumula por diferencia de peso específico en la su perficie, formando una capa sólida, conocida comunmente como nata.

Esta nata conforme pasa el tiempo de digestión, solidifica y forma una gran costra impermeable, la cual dificulta que el gas formado salga a la superficie.

Lo más conveniente para evitar el problema de formación de las natas, sería el poder extraer esta capa del digestor. Este no es un problema fácil de resolver, ya que no se debe poner en contacto las bacterias anaeróbicas con aire. Lo que se ha utilizado con mayor fre cuencia y que ha dado buenos resultados, es la colocación de rompedores de natas, los que básicamente son agitadores manuales que accionan sobre la zona problema.

La solución no sería una agitación continua, ya que podría - provocarse con ésta, el problema de depositar materia sin digerir en el extremo de la descarga y extraerse antes de llevar a cabo su periodo de digestión, sino realizar una agitación con la suficiente intermitencia para que la nata no solidifique.

El problema de formación de natas se torna más crítico en los digestores del tipo vertical, ya que el espesor de las natas es muy grande. En los digestores horizontales el problema es menos crítico, ya que la superficie de digestión es mucho mayor, por lo tanto, el espesor es delgado, lo que facilita la maniobra de destrucción de las natas.

## **CAPITULO IV**

### **ASPECTOS SOCIOECONOMICOS**

## CAPITULO IV

### ASPECTOS SOCIOECONOMICOS

Es necesario considerar la actitud que en un momento dado pueda tener la comunidad frente a un cambio que significa poner en acción nuevas fuentes de energía, y hay que tomar en cuenta dos cosas:

- 1) temor a la innovación tecnológica
- 2) el cambio al proceso productivo

Estos dos aspectos se relacionan mucho entre sí, ya que el objetivo es que el campesino sea un sujeto activo, tanto en la realización como en la promoción del proyecto. Ya que si el campesino no interviene, y esta conciente del cambio por la introducción de la nueva tecnología, como también en su proceso productivo, el proyecto iría encaminado a un fracaso rotundo.

Otro aspecto importante que cabe destacar, es que la obtención de soluciones técnicas y sociales para la comunidad, están en relación directa a su contexto ecológico y cultural y, en consecuencia, difiere la experiencia histórica de otros medios.

Se tiene entonces que buscar la manera de aumentar, por ejemplo, la producción de alimentos y forrajes sin grandes inversiones de capital. Para ello se requiere:

- a) un examen cuidadoso del potencial de recursos específicos de cada comunidad y de la relación con las necesidades sociales por satisfacer, utilizando sistemas de producción y técnicas con una sencillez tal, que sean de fácil manejo para los campesinos;
- b) elaborar con ellos, las estrategias en cuanto a la investigación requerida para la utilización de recursos y la tecnología y su participación directa en la ejecución de las acciones acordadas para lograr los cambios productivos;
- c) analizar conjuntamente (campesinos y técnicos) el medio en que viven y las posibilidades que ofrece un cambio en la tecnología utilizada hasta el momento.

Lo anteriormente expuesto, hace necesario una investigación socioeconómica para que la innovación tenga éxito. Pero ya que se pretende con este trabajo tratar de guiar a los que se interesen

con este tema, se presentará en este capítulo, cuáles serían los pasos para obtener el mayor rendimiento posible en la selección de una comunidad y cuáles en un momento determinado, deberán ser los estudios a realizar.

### ESTUDIO SOCIOECONOMICO

Las investigaciones socioeconómicas a realizar, pueden dividirse en dos etapas: la primera abarcaría hasta la formulación del proyecto para cada comunidad, y la segunda comprendería desde el inicio del proyecto hasta la evaluación del impacto de los sistemas.

Los objetivos globales de una investigación socioeconómica son:

- 1) Obtener información socioeconómica detallada para formulación de los proyectos.
- 2) Evaluar los impactos de la introducción de los sistemas en la organización socioeconómica de las comunidades.
- 3) Determinar los factores que influyen en el grado de aceptación de los sistemas y en las formas de aprovechamiento que se haga de ellos.

Los puntos más importantes a desarrollar durante las dos etapas serían:

- Caracterizar la organización socioeconómica previa a la introducción de los sistemas.
- Anticipar y evaluar los cambios en la organización socioeconómicas, originados por la construcción y operación de los sistemas, refiriéndose en especial a los cambios en la organización.
- Identificar las posibilidades de aplicación de los sistemas en actividades productivas.
- Anticipar y evaluar los cambios originados por el aprovechamiento de la energía en actividades productivas (productividad, ingresos, etc.)
- Evaluar impactos globales de los proyectos en la estructura socioeconómica de las comunidades.
- Identificar factores que influyen en las formas de aprovechamiento de los sistemas.

Es necesario reconocer que el grado de aceptación de los digestores dependerá en gran medida de las formas de integración, operación, y aprovechamiento. Por ello, la participación de

la comunidad debe considerarse desde la formulación del proyecto, sobre todo en las alternativas de utilización se refiere. Además, la investigación socioeconómica que se debe realizar y la formulación del proyecto basado en ella, debe evaluar que elementos tendrá que aportar la comunidad para la construcción y operación del digestor, sobre todo en fuerza de trabajo, quienes dentro de la comunidad harán estas aportaciones y bajo que formas de organización se realizarán. Por otro lado, al considerar las posibilidades de aplicación de los sistemas en actividades productivas, deberán anticiparse los beneficios que se obtendrán por el aprovechamiento de los sistemas y la distribución de los mismos al interior de la comunidad. De esta manera, el empleo de tiempo de trabajo de cada miembro de la comunidad debe contribuir una opción claramente beneficiada y superior a las demás alternativas existentes. Esto debe tomarse en cuenta para la formulación y desarrollo del proyecto, considerando sobre todo, las épocas en las que, dada la organización socioeconómica actual en las comunidades, se emplea casi la totalidad de la mano de obra.

Lo anterior supone que la investigación socioeconómica, debe considerar a los diferentes grupos e intereses existentes al interior de la comunidad. Asimismo, su análisis no debe limitarse a la comunidad como unidad aislada, sino deben considerarse las relaciones económicas, políticas e ideológicas que se establecen hacia

fuera.

(4)  
SISTEMATIZACION DE COMUNIDADES

- a) Obtener una lista de los poblados no comprendidos en los programas de electrificación, y que por su aislamiento, número de habitantes y condiciones económicas, no podrán contar con este servicio en forma inmediata, según informes de las juntas de Electrificación. Aunque el hecho de estar electrificados, no es un impedimento a la introducción de nuevas fuentes de energía.
- b) Obtener información:
- I. Indirecta: En este renglón se incluyen los datos generales de las comunidades o zonas cercanas obtenidas en distintas dependencias oficiales y centros de investigación del área a estudiar.
  - D. Directa: Se tiene la información recabada en cada una de las comunidades visitadas.

c) **Guión de Investigación Preliminar:**

Con el fin de obtener datos lo más preciso posible de cada comunidad, se tiene que elaborar una guía de preguntas respecto a recursos naturales, uso de esquimos vegetales y animales, recursos energéticos de la comunidad, existencia de ganado, agricultura (superficie agrícola, cultivos principales, técnicas, insumos, etc.), dispersión de la población y otros aspectos importantes, desde el punto de vista técnico.

d) **Análisis de la Información:**

El proceso que sigue es jerarquizar toda la información que se haya obtenido en cada comunidad, para saber el potencial existente.

**BREVE DESCRIPCIÓN DE LA COMUNIDAD SELECCIONADA:**  
**JICARERO, MUNICIPIO DE JOJUTLA, MORELOS**

El estudio socioeconómico que se realizó, fue en la Comunidad de Jicarero, Municipio de Jojutla en el Estado de Morelos.

En la primera etapa de elaboración de este estudio (Recopilación de Material), se me informó que el Instituto de Investigaciones Eléctricas iba a realizar un proyecto para dicha comunidad, y se me concedió el derecho de hacer una encuesta preliminar, cuyo resultado se enuncia a continuación:

- Número de habitantes:

56 ejidatarios, 2500 habitantes

- Comunicación:

Se llega a la comunidad por carretera pavimentada y brecha como de dos kilómetros.

- Agua:

El agua les llega por tubería de unos pozos pero es muy común que se les descomponga la bomba. Para la siembra se les manda por canal cada ocho días.

- Suelo:

El suelo es arcillado, arenoso y empedrado.

- **Aspectos sociales y tenencia de la tierra:**

Están divididos en ejidos y son propietarios.

- **Grupos de poder político:**

Tienen ayudante municipal

- **Para la parte beneficiada:**

- **Número de habitantes y familias:**

22 personas, 3 jefes de familia

- **Superficie:**

20 hectáreas, de las cuales 5 tienen cultivo  
de maíz

- **Dispersión de las viviendas:**

Son 3 casas que se encuentran concentradas.

- **Agua:**

Les llega por tubería de unos pozos situados  
a 500 mts. de las casas

- **Fauna:**

Tienen cría de conejo, con una base de 119  
conejos, y venden aproximadamente 200 al  
mes (si no les falla el alimento concentrado).  
Además poseen 20 vacas que ocupan aproxi-  
madamente 1 hectárea.

- **Energéticos:**

Tienen luz eléctrica y consumen aproximadamente 120 kilogramos de Gas L.P., al mes. La leña la usan en caso de ausencia de gas. No utilizan gas para bañarse, ya que con la temperatura del agua es suficiente.

- **Crédito:**

Están sujetos a crédito para la compra de alimento concentrado y 30 vacas. Por medio de la Institución Banrural.

- **Relaciones de Intercambio:**

Son 7 hombres de la familia los que realizan el trabajo. Cuando existe exceso de trabajo, se contratan peones temporales (eso es cada tres años aproximadamente).

- **Relaciones de Intercambio:**

Tratan de crear una Sociedad de Producción Agropecuaria.

Esta comunidad a pesar de estar electrificada, presenta una gran ventaja al estarse organizando en una Sociedad de Producción Agropecuaria, ya tienen una forma organizada de trabajo y además fueron ellos los que pidieron la introducción del digestor;

pasando así a ser sujetos activos, y por consecuencia, su participación en el proyecto es total, presagiándose así, un éxito en el gestor.

## CAPITULO V

### DISEÑO, OPERACION, SEGURIDAD Y COSTOS

## CAPITULO V

### DISEÑO, OPERACION, SEGURIDAD Y COSTOS

Los procesos químicos-industriales, se han de proyectar para obtener económicamente un determinado producto, a partir de diferentes materias primas, que se someten a etapas diferentes de tratamiento.

En forma general, las materias primas se someten primero a una serie de etapas de tratamiento físico para llevarlas a la forma que puedan reaccionar químicamente, y posteriormente pasarlas al reactor. Después los productos de reacción reciben nuevos tratamientos físicos (separaciones, purificaciones, etc.), para obtener el producto deseado.

Desde el punto de vista económico, la etapa de tratamiento químico, puede ser de poca importancia, como por ejemplo si ésta se realiza en un simple tanque de mezcla; pero es más frecuente que esta etapa sea la más significativa del proceso, es decir, la que económicamente decide la posibilidad del mismo.

## INTRODUCCION AL DISEÑO DE REACTORES

Para llevar a cabo el diseño de un reactor, se han de conocer el tamaño y tipo de reactor y las condiciones de operación más adecuadas para el fin propuesto. Como esto puede exigir que las condiciones en el reactor varíen con la posición y con el tiempo, es necesario efectuar la integración adecuada de la ecuación cinética:

$$r_i = \frac{1}{V} \left( \frac{dm_i}{dt} \right) \text{ por reacción} = f \text{ (condición de la región de volumen)}$$

para las condiciones de operación. Esta integración puede presentar dificultades debido a que la temperatura y la composición de fluido reaccionante pueden variar de un punto a otro del reactor, dependiendo del carácter exotérmico o endotérmico de la reacción y de la velocidad de intercambio de calor con los alrededores. Por otra parte, las características geométricas del reactor, determinan la trayectoria del fluido a través del mismo, y fijan las condiciones de mezclado que contribuyen a diluir la alimentación y redistribuir la materia y el calor. Por lo anterior, se han de tener en cuenta muchos factores, constituyendo el principal problema del diseño, el conocimiento del modo más adecuado de tratar estos factores.

El punto de partida para el diseño es el balance de materia referido a cualquier reactante (o producto).

Dependiendo del tipo de reactor (Batch, Estacionario y Continuo), la ecuación de balance de masa, se simplifica o se aplica.

### Ecuación del Balance de Masa

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Caudal de} & & \text{Caudal de} & & \text{Caudal p\u00e9r} & & \text{Caudal de} \\ \text{entrada de} & & \text{salida de} & & \text{dido de} & & \text{acumula--} \\ \text{reactante} & & \text{reactante} & & \text{reactante} & & \text{ci\u00f3n de --} \\ \text{en el ele--} & = & \text{del elemen} & + & \text{debido a la} & + & \text{reactante} \\ \text{mento de -} & & \text{to de volu-} & & \text{reacci\u00f3n -} & & \text{en el ele-} \\ \text{volumen} & & \text{men} & & \text{qu\u00edmica en} & & \text{mento de} \\ & & & & \text{el elemento} & & \text{volumen} \\ & & & & \text{de volumen} & & \end{array}$$

En los procesos no isot\u00e9rmicos, ha de emplearse el balance calor\u00edfico, juntamente con el balance de masa. Es de cir:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Flujo de} & & \text{Flujo de} & & \text{Desaparici\u00f3n} & & \text{Acumulaci\u00f3n} \\ \text{entrada de} & & \text{salida de} & & \text{de energ\u00eda -} & & \text{de energ\u00eda} \\ \text{energ\u00eda ca} & = & \text{energ\u00eda ca-} & + & \text{calor\u00edfica por} & + & \text{calor\u00edfica en} \\ \text{lor\u00edfica al} & & \text{lor\u00edfica al} & & \text{reacci\u00f3n en} & & \text{el elemento} \\ \text{elemento} & & \text{elemento de} & & \text{el elemento} & & \text{de volumen} \\ \text{de volumen} & & \text{volumen} & & \text{de volumen} & & \end{array}$$

El balance de materia y de calor, est\u00e1n interrelacionados por sus terceros t\u00e9rminos, debido a que el efecto calor\u00edfico est\u00e1 originado por la propia reacci\u00f3n.

### TIPO DE REACTORES

En el reactor discontinuo de la Fig. 1, los reactantes se introducen al reactor, se mezclan, se deja que reaccionen un tiempo determinado, y finalmente se descarga la mezcla resultante.

Esta es una operación no estacionaria en la que la composición va variando con el tiempo, aunque cada instante es uniforme en todos los puntos del reactor.

### Reactor Ideal Discontinuo

$$t = C_{a0} \int_0^{X_a} \frac{dX_a}{(-r_a)}$$

Esta es la ecuación general que nos da el tiempo necesario para que se alcance una conversión  $X_a$ , en condiciones de operación isotérmicas o no isotérmicas; el volumen del fluido reaccionante, y la velocidad de reacción quedan bajo el signo integral, porque en general, varían durante el transcurso de la reacción:

$$\text{A } \rho = \text{cte.} \quad t = C_{a0} \int_0^{X_a} \frac{dX_a}{-r_a} = \int_{C_{a0}}^{C_a} \frac{dC_a}{-r_a}$$

Para todas las reacciones en las que el volumen de la mezcla reaccionante varía proporcionalmente con la conversión, como por ejemplo, en las reacciones elementales de fase gaseosa con variación significativa de la densidad, la ecuación se convierte en:

$$\begin{aligned} t &= N_{a0} \int_0^{X_a} \frac{dX_a}{(-r_a) V_0 (1 + \epsilon_a X_a)} \\ &= C_{a0} \int_0^{X_a} \frac{dX_a}{(-r_a) (1 + \epsilon_a X_a)} \end{aligned}$$

Un reactor ideal de flujo estacionario es el representado<sup>(1)</sup> Fig. 2, se conoce con diferentes nombres: reactor de flujo en tapón, de flujo de pistón, de flujo tubular ideal, y de flujo uniforme. Se caracteriza porque el flujo del fluido a su través es ordenado, sin que ningún elemento del mismo, sobrepase o se mezcle con cualquier otro elemento situado antes o después de él; en realidad, en este reactor puede haber mezcla lateral de fluido, pero nunca ha de existir mezcla o difusión a lo largo de la trayectoria de flujo. La condición necesaria y suficiente para que exista flujo es que el tiempo de residencia en el reactor sea el mismo para todos los elementos del fluido.

#### Reactor de flujo pistón en estado estacionario

$$\frac{V}{F_{A0}} = \frac{\tau}{C_{A0}} = \int_0^{X_{Af}} \frac{dX_A}{-r_A}$$

$$\tau = \frac{V}{v_0} = C_{A0} \int_0^{X_{Af}} \frac{dX_A}{-r_A}$$

Las ecuaciones anteriores permiten calcular el tamaño del reactor conociendo el caudal de la alimentación y la conversión requerida:

$$\rho = \text{Cte}$$

$$\frac{V}{F_{Ao}} = \frac{\tau}{C_{Ao}} \int_0^{X_{Af}} \frac{dX_a}{-r_a} = \frac{-1}{C_{Ao}} \int_{C_{Ao}}^{C_{Af}} \frac{dC_a}{-r_a}$$

$$\tau = \frac{V}{v_o} = \frac{1}{C_{Ao}} \int_0^{X_{Af}} \frac{dX_a}{-r_a} = \frac{1}{C_{Ao}} \int_{C_{Ao}}^{C_{Af}} \frac{dC_a}{-r_a}$$

Cualquiera que sea su forma, las ecuaciones de diseño interrelacionan la velocidad de reacción, la conversión, el volumen del reactor y el caudal de la alimentación, de tal manera que si se desconoce una de estas magnitudes, puede calcularse a partir de las otras tres.

El otro reactor ideal de flujo estacionario, se denomina (Fig.3) reactor de mezcla completa, reactor ideal de tanque con agitación, y como su nombre lo indica, es un reactor en el que su contenido está perfectamente mezclado y su composición en cada instante es la misma en todos los puntos del reactor. Por consiguiente, la corriente de salida en este reactor tiene la misma composición que la del fluido contenido del mismo.

#### Reactor de flujo de mezcla completa en estado estacionario

$$\frac{V}{F_{Ao}} = \frac{\Delta X_a}{(-r_a)\tau} = \frac{X_{Af} - X_{Ai}}{(-r_a)\tau}$$

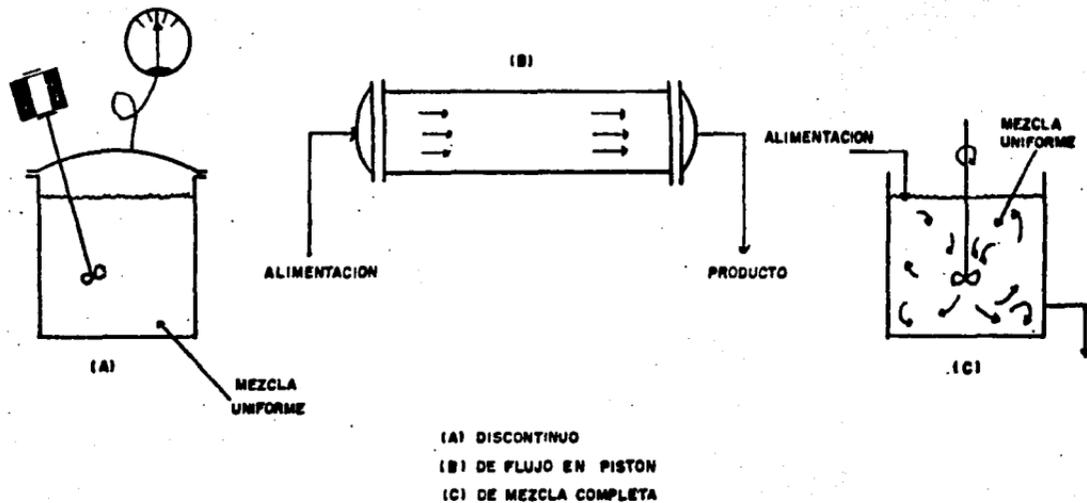
$$\tau = \frac{V C_{Ao}}{F_{Ao}} = \frac{C_{Ao} (X_{Af} - X_{Ai})}{(-r_a)\tau}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Si } \rho &= \text{Cte} \\
 \frac{V}{F_{ao}} &= \frac{X_a}{-r_a} = \frac{C_{ao} - C_a}{C_{ao}(-r_a)} \\
 \tau &= \frac{V}{\bar{v}} = \frac{C_{ao} X_a}{-r_a} = \frac{C_{ao} - C_a}{-r_a}
 \end{aligned}$$

Estas ecuaciones relacionan de manera sencilla los cuatro términos  $X_a$ ,  $-r$ ,  $V$  y  $F_{ao}$ ; por consiguiente, conociendo tres, cualesquiera de ellos obtenemos directamente el cuarto. Entonces, en el diseño, el tamaño del reactor necesario para la función determinada, o el grado de conversión en un reactor, de tamaño conocido, se calcula directamente.

Los principios nuevos de diseño, las reacciones modernas y los nuevos compuestos, sugieren por lo general, aplicaciones de importancia industrial. Tales aplicaciones pueden ser un nuevo proceso o la mejora de uno existente, requiriendo ambos el diseño y construcción de nuevos servicios y pudiendo implicar gastos mayores. Dado que una parte tan grande del diseño de ingeniería es de naturaleza empírica, rara vez es posible saltar del vaso de precipitado a la planta terminada; por lo que se recomienda experimentar con planta piloto. Pero debido a que desconocemos grandemente la microbiología del proceso, no nos queda mas que despejar en forma experimental las incógnitas encontradas en la literatura.

## REACTORES



FIGS. 1,2,3.

## DISEÑO

Durante el diseño de un digestor, se deben fijar objetivos bien claros, esto permitirá identificar el tipo correcto del digestor que podría diseñarse y cuáles serían los criterios con los cuales debe ser diseñado.

Un sistema a nivel industrial y otro para el medio rural, tendrán diferencias muy grandes de operación y sus diseños deberán ser acordes con aspectos ecológicos, nivel tecnológico, organización (15) y capital.

Lo primero que debe tomarse en cuenta, es definir si la digestión anaeróbica se utilizará como un proceso de control de contaminación, por ejemplo: tratamiento de aguas negras provenientes de colonias urbanas -con la consecuente producción de gas que podría ser utilizada- o que el objetivo fuera darle énfasis a la producción de metano, por último que lo primordial fuera la producción de nutrientes del suelo.

Para justificar la construcción de un digestor, deben cumplirse tres requisitos: 1) las plantas de gas más pequeñas deben justificarse económicamente; 2) la cantidad de desechos disponibles debe ser por lo menos, la mínima requerida para satisfacer las necesidades energéticas de la parte beneficiada; 3) deben contar con agua su

ficiente para la mezcla que se alimenta al digestor.

Consideraciones secundarias -pero también importantes- que deben tomarse en cuenta son: 1) lugar adecuado para la construcción del digestor; 2) el lugar debe estar cercano al lugar de recolección de estiercol, y así como al lugar de uso, tanto del biogas como de los fertilizantes; 3) el digestor no debe construirse demasiado retirado de la toma de agua.

#### Consideraciones de Diseño dependiente de las dimensiones

Las variables dependientes de las dimensiones en el diseño de un digestor son principalmente:

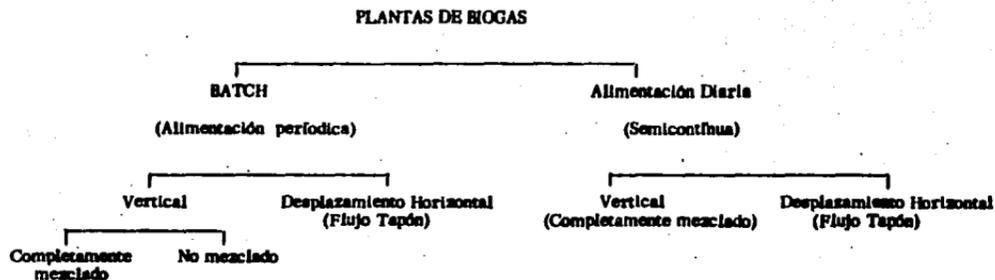
- la cantidad de materia prima disponible
- el tipo de materia prima
- la temperatura
- disponibilidad de materiales de construcción

Las tres primeras, ya vimos (en el capítulo III, en la parte de factores que gobiernan el proceso de digestión) cuales son sus características principales. Para la cuarta, nada más se refiere al tipo de suelo en el que se vaya a construir, que tipo es: arcilla, piedra caliza, arenoso, etc.

#### Consideraciones de Diseño independientes de las dimensiones

- determinar el mejor flujo de materiales

El flujo de materiales debe ser considerado antes que el sistema pueda ser diseñado. En este respecto, las plantas de biogas para áreas rurales en países en desarrollo puede ser ampliamente caracterizado como sigue:



El mezclado completo tiene cierto grado de complejidad al requerir etapas de predigestión y premezclado de la materia prima y el uso de bombas de alimentación y sistemas de agitación para lograr un mezclado completo, lo cual hace difícil implantar estos sistemas en el campo y muy en especial en el medio rural.

Referente a los digestores que operan en régimen estacionario, cargándose de una sola vez y descargándose cuando ha terminado la generación de biogas, es aplicable en casos muy particulares, como sería el caso de materia orgánica conteniendo un tipo de sólidos que pudieran bloquear la tubería de carga o descarga de un sistema continuo o cuando la materia a procesar esta disponible en forma intermitente. En esos casos generalmente se usan varios digestores cargados a diferentes tiempos para tener siempre biogas disponible. Otro caso sería cuando el interés primordial es la obtención del fertilizante orgánico, las cargas normalmente se hacen en forma diaria y la descarga una o dos veces por año, en la época de siembra. Así también el digestor a régimen estacionario es ideal cuando a nivel laboratorio se desean evaluar los parámetros del proceso o el comportamiento de un desecho o mezcla de desechos.

Los sistemas semicontinuos con desplazamiento horizontal son simples en término de diseño y operación, utilizan alimentación por gravedad y no requieren de bombeo ni agitación. La desventaja es que la degradación de la materia orgánica y la producción de biogas es un poco menor que la obtenida en las anteriores. Los digestores de estos tipos pueden ser construidos, horizontales o verticales, de sección transversal, circular, cuadrada, rectangular, etc., y la selección del diseño obedecerá entre otros, a criterios -

económicos y a factores locales. (15) (3) (6)

### Hermeticidad Absoluta

Uno de los principales requisitos que debe cumplir el digestor de desechos orgánicos, es el ser hermético, primero para evitar el contacto de los desechos digeribles con el aire, ya que el proceso de digestión es anaeróbico. En segundo lugar, la necesidad de evitar las fugas de gas del recipiente; deberán tomarse en cuenta dentro de la seguridad de la instalación.

### Facilidad de Remoción de Natas y Sedimentos

La necesidad de evitar al máximo la acumulación de natas y material digerido es importante, ya que con esto se evitaría: 1) obstrucción de salida de gas, lo que en un momento determinado podría obligar a parar el proceso; 2) pérdidas del espacio en donde sedimenta el lodo (espacios muertos), con la consiguiente reducción de volumen de digestión.

Los digestores de carga semicontinua, deben contar con salidas lo suficiente grandes para lograr la extracción de lodos y la remoción de natas en forma sencilla; para facilitar la descarga se puede utilizar un sistema de vasos comunicantes donde la descarga se efectúa por gravedad al momento de entrar la carga diaria del digestor.

### Válvula de Seguridad

Tomando en cuenta que el digestor es un recipiente - que genera gas, está sujeto a presión, por lo que deberá contar con un sistema de seguridad, que permita su escape en caso de incrementos de presión mayores que la máxima permisible.

### Equipo de Medición

Es necesario instalar instrumentos de medición de temperatura, con la finalidad de saber la distribución de temperatura en el digestor, así como las pérdidas de calor del sistema. La instalación de un gasómetro, es muy útil para cuantificar la producción de gas y detectar las variaciones que pudiera sufrir el proceso digestivo

### Pérdidas de calor y Aislamiento Térmico

Se puede enterrar y utilizar el mismo suelo como aislante térmico, cuando las condiciones meteorológicas y los niveles freáticos así lo permitan. Bajo condiciones más severas, será conveniente reforzar el aislamiento parcial o totalmente.

### Protección contra Corrosión

Es necesario aplicar algún material anticorrosivo al digestor; sobre todo en la zonas expuestas al gas que es corrosivo y

podría atacar, tanto al material de construcción como a las tuberías.

### Acceso al Interior

Al diseñar digestores de cúpula fija, es necesario contar con un registro de entrada hombre para tener acceso al interior y poder hacer reparaciones, o darle mantenimiento.

### Salida de Gas

Se deberá contar con una o varias salidas de gas del digestor para su recolección.

### Tuberías y Contenedor de Gas

#### Presión de Operación. -

El contenedor primario de gas, deberá ser capaz de mantener una presión de 20 cm. de columna de agua como máximo (cúpula del digestor) pudiendo almacenar posteriormente al biogas en recipientes de mayor presión.

#### Válvula de Seguridad. -

Si el gas producido se piensa comprimir en un recipiente especial, éste deberá contar también con una válvula de seguridad.

#### Tuberías. -

Estas podrán ser de cualquier material que soporte el ataque del  $H_2S$ , ya que éste es el compuesto más corrosivo que se

encuentra en la mezcla del biogas. Deberán instalarse válvulas de no retorno, con la finalidad de no tener una sobre presión en un momento determinado en el contenedor primario.

#### Trampa de Líquidos .-

Será necesario su instalación, ya que el biogas se encuentra saturado con vapor de agua y éste ayuda a aumentar el poder corrosivo del biogas. Utilizar un pequeño condensador, es una forma práctica, barata y recomendable.

#### Localización del Digestor

##### Características Físicas del Terreno. -

Es importante analizar el terreno donde se piensa construir, ya que la localización del mismo puede simplificar su operación. El hecho de que el digestor se construya en un terreno en declive, implica la eliminación de un sistema de bombeo para realizar carga y descarga del mismo, pudiendo utilizar solamente en sistemas de vasos comunicantes para tal fin. y, cargar por gravedad el digestor. No es recomendable localizar el digestor, en terrenos muy rocosos, ya que la excavación sería costosa, sin embargo, seleccionar un terreno muy arcilloso es problemático por la poca resistencia que tendría el suelo y la necesidad de cimentar, lo cual, también aumentaría los costos de construcción.

### **Localización Estratégica. -**

El digester debe estar localizado en un lugar en que se encuentre lo suficientemente cerca del lugar de recolección de los desechos, con finalidad de facilitar su transporte, pero que al mismo tiempo, este cerca del lugar del consumo del gas y del fertilizante, sin pensar que en un momento determinado represente un peligro para la comunidad. Siempre es más problemático transportar desechos, sobre todo tratándose de estiércol que transportar agua, sin embargo, es conveniente buscar sitios cercanos a la toma de agua.

### **Características del Terreno para su Utilización como Material de Construcción**

Uno de los criterios de la utilización de digestores, es el poder construirlos a bajo costo y aprovechar al máximo los recursos con que cuenta la comunidad, por lo tanto es conveniente pensar que se podría utilizar el terreno del lugar como material de construcción.

### **Ventilación**

El digester debe de localizarse en zonas completamente ventiladas para asegurar al máximo, que los riesgos, tanto de explosión como de contaminación sean mínimos.

## Seguridad

### Protección contra Flamas. -

De preferencia cuando se realicen las conexiones de tuberías, tanto para extraer el gas del contenedor primario (cúpula del digestor) como para el almacenamiento y uso del mismo, será necesario instalar trampas de flamas que pudieran evitar una explosión, lo cual evitaría en un momento determinado que pudieran suceder percances de consideración.

### Elección de Terreno para Construcción

El digestor deberá construirse en terreno firme, ya que dependiendo del tamaño y dimensiones de éste, será la presión que soportará el terreno, por lo tanto, es necesario que el área elegida para construirlo sea lo suficientemente firme para evitar al máximo los costos de cimentación. Además, hay que tener en cuenta que una vez que el digestor se encuentre cargado, no tenga movimientos fuertes de asentamiento, ya que se podrían producir grietas no deseables en la construcción.

### Protección

De preferencia todas las instalaciones del digestor deben encontrarse localizadas en una sola área, ayudando con esto a que esta área, sea aislada y permitir el acceso solamente a las -

personas que operarán el digestor y los equipos, con esto se elim  
narían problemas derivados del manejo inadecuado, tanto del equi-  
po, como del digestor.

BALANCE DE MATERIA DE LA COMUNIDAD DE JICARERO

Después de analizar cada uno de los parámetros que gobiernan el proceso, el potencial de los desechos con que se cuenta y los criterios independientes de las dimensiones, ya estamos en posibilidad de hacer el balance de materiales y el diseño de un digestor.

El problema a resolver sería:

Cuál es el volumen del digestor, y cuál es la producción de biogas diaria. Si se cuenta con un total de 20 vacas de aproximadamente 400 kg., y por problemas de recolección, se supone que se recolecta un 60% del total de estiércol producido por día. Además, cuál sería la forma del digestor y cuáles sus dimensiones en detalle.

Kg. de estiércol producido por día

Kg. de vacas totales

$$20 \text{ vacas} \times 400 \text{ kg} = 8000 \text{ kg.}$$

Kg. de estiércol/día

Por observación se sabe que la vaca produce un 9% de su peso

Kg. de estiércol totales/día

$$8000 \times 0.09 = 720 \text{ kg/día}$$

Kg. de estiércol para diseño

$$Et = (720 \text{ kg/día}) (0.60) = 432 \text{ kg/día}$$

Como notamos en capítulos anteriores:

Co. = Concentración de sólidos totales	17.5 %
Cd. = Concentración de carga	8.0%
Tiempo de residencia	30 días
(Es) = Estiércol seco = (432 kg/día) (0.175)	75.6 kg/día
(Mm) = Peso de la mezcla	
= $\frac{(Es)(100\%)}{Cd} = \frac{(75.6)(100)}{8} =$	945 kg/día

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de agua de estiércol} &= Et - Es \\ &= 432 - 75.6 = 356.4 \text{ kg. de agua/día} \end{aligned}$$

Cantidad de agua por agregar

$$(Mn) - (Et) = 945 - 432 = 513 \text{ kg. de agua/día}$$

Volumen del Digestor

$$\rho \text{ Mezcla} = 1.15 \text{ kg/lt}$$

$$Vm \frac{Mm}{m} = \frac{445 \text{ kg/día}}{1.15 \text{ kg/lt}} = 821.74 \text{ lt/día}$$

$$\begin{aligned} Vd &= \text{Volumen del digestor} = Vm \times \text{tiempo de residencia} = \\ &821.74 \text{ lt/día} \times 30 \text{ días} \end{aligned}$$

$$Vd = 24652.2 \text{ lt} = 24.239 \text{ m}^3$$

Como se le da un 9% para contenedor primario de gas

$$Vd = 26.42 \text{ m}^3 \text{ por lo que lo diseñaremos de } \underline{30 \text{ m}^3}, \text{ dando un margen de seguridad de } 10\%$$

Tomando una base de cálculo de 100 lt de mezcla,

$$Mm = 100 \text{ lt} \times 1.15 \frac{\text{kg}}{\text{lt}} = 115 \text{ lt}$$

También como ya notamos anteriormente, los datos que se dan a continuación son datos obtenidos por el Instituto de Investigaciones Eléctricas.

$$Sti = \text{Sólidos totales iniciales} = 0.08$$

$$Svi = \text{Sólidos volátiles iniciales} = 0.057$$

$$\rho_{mf} = \text{Densidad de la mezcla final} = 1.03 \text{ kg/lt}$$

$$Stf = \text{Sólidos totales finales} = 0.05$$

$$Svf = \text{Sólidos volátiles finales} = 0.035$$

$$Mm \times \% Sti = 115 \times 0.08 = 9.2 \text{ kg Sti}$$

$$Mm \times \% Svi = 115 \times 0.057 = 6.555 \text{ kg Svi}$$

$$Mmf = 100 \text{ lt} \times 1.03 \text{ kg/lt} = 103 \text{ kg}$$

$$Mmf \times Stf = 103 \text{ kg} \times 0.05 = 5.15 \text{ kg Stf}$$

$$Mmf \times Svf = 103 \text{ kg} \times 0.035 = 3.605 \text{ kg Svf}$$

Sólidos Volátiles Transformados (SVT)

$$Svi - Svf = 6.555 - 3.605 = 2.95 \text{ kg SVT}$$

$$\rho = 1.25 \text{ kg/lt}$$

$$Vg = \text{Kg (SVT)} \times \frac{1}{\rho} = 2.95 \text{ kg} \times \frac{1}{1.25 \text{ kg/m}^3}$$

$$= 2.36 \text{ m}^3/100 \text{ lt mezcla}$$

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de Biogas Total} &= \frac{Vm \times Vg}{\text{Base}} = \frac{(821.74 \text{ lt/dfa}) (2.36 \text{ m}^3)}{100 \text{ lt}} \\ &= \underline{\underline{19.40 \text{ m}^3/\text{dfa}}} \end{aligned}$$

Rendimiento de la Producción de Biogas.-

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{Svf}{SvI} \times 100 = \frac{2.95 \text{ kg}}{6.555 \text{ kg}} \times 100 = \underline{\underline{45\%}}$$

Se construirá un digestor de 30 m<sup>3</sup> de volumen para producir 19.40 m<sup>3</sup> de biogas por día, con tiempo de residencia de 30 días, pero como están por recibir 30 vacas, se le aumentará la carga y se disminuirá el tiempo de residencia a 20 días, lo que nos generará aproximadamente 30 m<sup>3</sup> de gas por día.

#### Ahora la parte del diseño mecánico del digestor

Como vimos en los capítulos anteriores, los factores que afectan el diseño mecánico son:

- condiciones de terreno
- área disponible
- comparación de costos

El Instituto de Investigaciones Eléctricas, por medio de un Bufete de Ingenieros Civiles, realizó un estudio de las condiciones del terreno y una comparación de precios de los diversos digestores

que se podrían construir: verticales ó horizontales con diferente sección transversal para ver cuál de ellos era el más económico.

#### Verticales. -

Tienen el inconveniente de que se tienen que perforar pozos de mayor profundidad, más el costo de cimentación, da un precio mayor. Los verticales normalmente se dimensionan con relaciones de altura diámetro de (2:1 ó 3:1). A pesar de estas ventajas, este digestor es muy práctico en lugares donde el área disponible es poca.

#### Horizontales de sección transversal rectangular. -

En este tipo de digestores, se encontró que es necesario construirse con cimentación (metálica) por lo que su costo es mayor al que analizaremos a continuación.

Su desventaja en cuanto al proceso es que presenta (en donde hacen ángulo las paredes y el suelo) puntos de acumulación de materia digerida y puntos críticos de concentración de esfuerzos en dichos ángulos.

#### Horizontal de sección transversal con forma de huevo invertido. -

Es el que presentó mayores ventajas para la comunidad, ya que no se necesita cimentación, porque el mismo suelo sirve de apoyo al digestor, no se presentan puntos de acumulación de lodos y además no existen puntos críticos de concentración de esfuerzos, ya

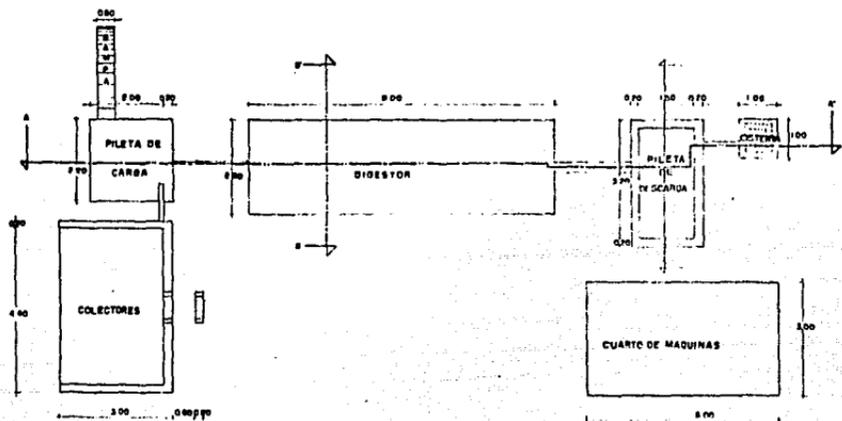
que la presión ejercida por la carga y el gas se reparten uniformemente. Además debido a la carencia de cimentación, el costo del digestor es más barato que los anteriores. Por lo que respecta al proceso, tiene la ventaja de no presentar puntos de acumulación de lodos digeridos. Por lo tanto, debido a estas ventajas, el diseño mecánico es el que se muestra en las figuras.

La información que se les proporcionó a los Ingenieros Civiles fue: Presión de Operación: 20 cm de columna de agua en el contenedor. Que la alimentación deberfa ser por gravedad y al fondo del recipiente para efectuar un movimiento total de toda la mezcla. Que debfa tener dos salidas, una por la parte superior para sacar las natas, y deberfa de tener un sello hidráulico para no permitir la salida de gas, ni la entrada de aire. Y la otra, por la parte inferior con el fin de sacar los lodos digeridos del digestor.

En los digestores horizontales se opta porque tengan relaciones largo a ancho (5:1 y en algunos casos 8:1).

Como mencionamos anteriormente, los parámetros importantes para situar el digestor son: distancia de la materia prima al digestor, disponibilidad de agua, usos del gas y usos de lodos digeridos.

Tomando en cuenta estos factores, la situación geográfica quedo como se muestra en el esquema siguiente:

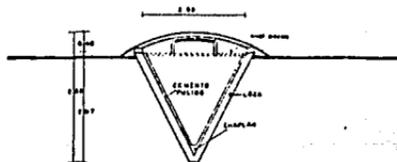
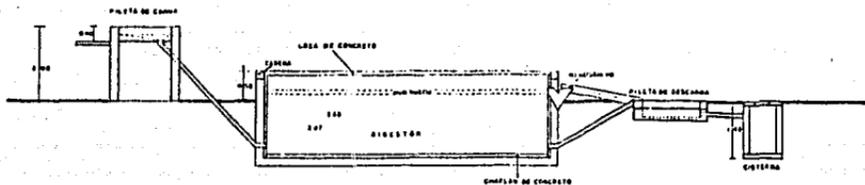
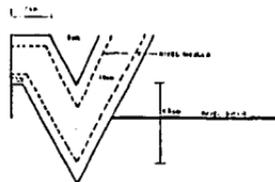


ESC. 1: 50

PLANTA DE CONJUNTO

104

FAC. DE EST. PROF. QUAUTITLAN	U.N.A.M.
TESIS PROFESIONAL	
PLANTA DE CONJUNTO	
FECHA: OCTUBRE 1980	
FIRMA: JORGE JOSE CASTELLANOS L.	

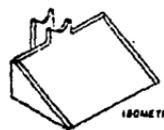


(101)

FAC DE EST PROF CUAUTITLAN U N AM	
TESIS PROFESIONAL	
C D R T E S	
FECHA OCTUBRE 1980	
FIG 7	INGENIERO JOSÉ CASTELLANOS

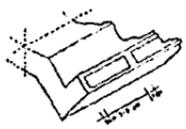


FACHADA

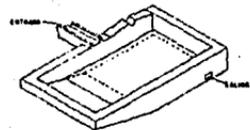


ISOMETRICA

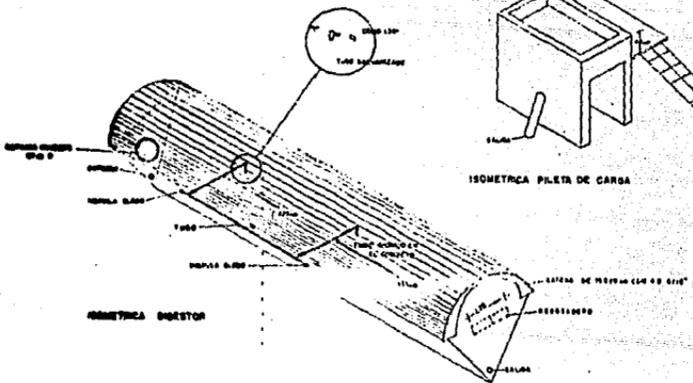
SOPORTE DE COLECTORES SOLARES



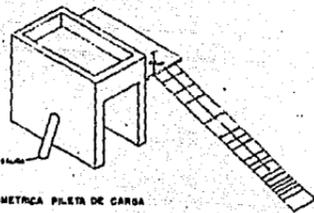
ISOMETRICA FERRASADERO



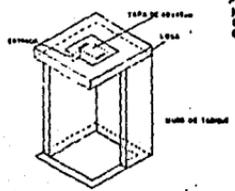
ISOMETRICA PILETA DE DESCARGA



ISOMETRICA QUETTOR



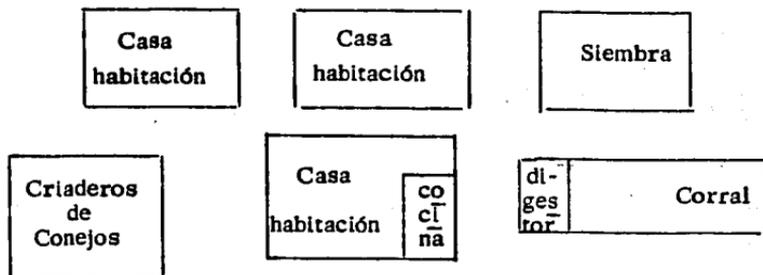
ISOMETRICA PILETA DE CARGA



ISOMETRICA DE SISTEMA

90°)

FAC DE EST PROF CUMATILAN U.N.A.M
TESIS PROFESIONAL
ISOMETRICAS Y FACHADAS
FECHA: OCTUBRE 1980
FIG 3 NOMBRE: JOSE CASTELLANOS L



La temperatura en esa zona es del orden: mínima 15°C, máxima 42°C, por lo que se recomienda instalar un colector solar para calentar el agua de alimentación. Debido a que la temperatura mínima no es muy baja, el aislante de tierra es suficiente para mantener la temperatura óptima en el digestor (se verá con mas detalle en operación).

Por lo que toca a la corrosión y, ya que el material corrosivo es el H<sub>2</sub>S, y está presente en pequeñas cantidades (trazas), se recomienda pintar el digestor en la parte de contenedor primario con una pintura anticorrosiva, siendo esto suficiente, si se hace una vez por año.

## OPERACION

La operación de digestores toma en cuenta una gran diversidad de factores que en mayor o menor grado influyen en el proceso, dando como resultado una determinada relación de volumen de digestor a volumen de gas producido, que se pretende maximizar cuando el interés fundamental es el gas.

Como ya hemos mencionado antes, los factores operacionales son:

Materia prima.-

Estiércol de bovino recolectado en el corral.

Porcentaje de sólidos totales.-

El porcentaje de sólidos totales alimentados debe ser de 8%. Considerando que el estiércol fresco tiene 17.5% de sólidos, hay necesidad de diluirlo con agua, para lo cual se emplea agua caliente a una temperatura de aproximadamente 40°C.

Temperatura.-

La carga diaria que se efectuará a temperatura de 40°C empleando agua caliente producida por los colectores solares. Con esto se puede conseguir que la temperatura se mantenga entre 27 y 30°C, durante todo el periodo de operación. Lo cual es aceptable para que las bacterias mesofílicas trabajen. Que es el caso que nos

ocupa, donde los sistemas deben ser de construcción y operación sencilla y es preciso hacer hincapié en que son sumamente sensibles a cambios bruscos de temperatura.

#### Agitación. -

En digestores que operan con bacterias mesofílicas, la agitación requerida es muy leve, siendo suficiente la que produce la carga diaria al entrar al digestor.

#### Relación carbono/nitrógeno. -

Esta relación se mantendrá constante, siempre que se trabaje con estiércol bovino, que tiene una relación de 25. Cuando se manejen dos materias primas, hay que hacer un balance para que se mantenga una relación óptima.

#### Tiempo de residencia. -

Como se mencionó este debe ser de 30 días.

El digestor se carga con un 8% de sólidos totales inoculándose carga con material digerido, con objeto de inducir la producción de gas combustible. Se tiene que esperar de 10 a 18 días para que empiece la produccion de biogas, una vez que empieza la producción de gas se sigue cargando con una treintava parte del volumen de la mezcla total del digestor, se desplaza un volumen igual de material digerido (se recomienda que la descarga sea una vez por el revosadero y tres veces por la parte de los lados), el cual se condu

ce a una pileta de almacenamiento.

Con objeto de evitar el posible daño a tuberías, estufas, refrigeraciones, compresoras, etc., por las trazas de ácido sulfúrico en el biogas, se debe poner un filtro con limadura de hierro oxidada, lo que da un resultado muy aceptable. Para regenerar este filtro, se recomienda ponerlo al aire durante un día, esto hace que el procedimiento anterior sea un método accesible y económico.

### SEGURIDAD

El biogas puede causar explosiones al tener como principal componente el metano, el cual tiene niveles de explosión que van desde 5 hasta 15% (proporción de volumen con aire).

Considerando que la composición del biogas incluye una proporción de metano de 60 - 70%, los niveles de explosión son:

- nivel bajo 9%
- nivel alto 23%

Al encender fósforo o bien producir chispas por choques metálicos, el gas puede alcanzar temperaturas de 650-750°C, a las cuales puede deflagar o explotar.

La densidad y su composición son también factores importantes en la seguridad, pues tomando en cuenta que la densidad del

aire es de 1.293 gr/lt, la del metano 0.27 gr/lt, y la del bióxido de carbono 1.98 gr/lt, y considerando una composición entre 30 y 40% de CO<sub>2</sub>, la densidad del biogas llega a 1.09 gr/lt, lo que lo hace más ligero que el aire y puede diluirse fácilmente. Si la proporción de CO<sub>2</sub>, rebasa el 45.7%, el biogas se vuelve más denso que el aire, subiendo su límite de peligrosidad, ya que puede ser asfixiante, cuando su acumulación causa que el oxígeno del aire baje a 17.3%, y si llega a 13% es positivamente sofocante.

Por todas estas razones, hay que tener precauciones en el manejo de biogas similares a las que se tienen con el gas doméstico.

- Al llenar tanques de biogas, estos deben estar libres de oxígeno, al igual que las líneas de transporte de gas.
- Se deben realizar pruebas de fugas con agua jabonosa.
- Cuidar que no haya flamas, brazas, cigarrillos encendidos o calzados con clavos que produzcan chispas en las áreas de compresión y carga.
- Los locales donde se maneje gas, deben ser de preferencia altos y ventilados.
- Los extinguidores deben ser CO<sub>2</sub> y polvo ABC.

(16) (17) (6) (3).

## COSTOS

La evaluación de un proceso consiste del análisis, tanto de la ingeniería, como de la economía del proceso, y, en su sentido más amplio, es una operación continuada. Debe iniciarse antes de cualquier trabajo de laboratorio. Un cuidadoso análisis de costos en una etapa inicial, indicará si el proceso propuesto es prometedor, y también puede sugerir la dirección de las experimentaciones. La evaluación del proceso debe continuar a intervalos regulares, con objeto de cubrir de esta manera los datos nuevos y significativos que se vayan obteniendo.

Esta continua reevaluación de los factores de ingeniería y económicos en el proceso propuesto, ayuda a la planeación global del trabajo en escala laboratorio y de planta piloto. La planeación que se hace entre el trabajo de laboratorio y el de planta piloto, uno de los factores menos tangible en favor de la evaluación del proceso, es que el hacer una estimación de costo, requiere el conocimiento del equipo por emplear, y por consiguiente, fuerza automáticamente al Ingeniero Químico a razonar en forma objetiva. Este razonamiento inevitablemente sugiere muchos renglones de información que deben ser obtenidos de la elaboración de plantas piloto.

El tipo de estimación de costo requerida por este estudio, se denomina estimación de costos de diseño preliminar, puesto que -

esta basada únicamente en la información que se dispone antes del diseño real del equipo de la planta y es función de la lejanía donde se ubica la planta, debido al costo de transportación.

Conforme al trabajo de diseño y construcción aumenta, se deben hacer nuevas estimaciones del costo final, con el fin de optimizar el proceso y esto ayudará a tener bases de apoyo a la introducción de digestores.

Se hace a continuación una estimación económica preliminar por medio del método Chilton<sup>(21)</sup> que ofrece una estimación detallada, ya que permite la variación de partes importantes del costo de las unidades.

1. Costo del equipo estimado	Calentadores solares	\$ 15,000.00
	Refrigeradores	\$ 20,000.00
	Estufa	\$ 4,000.00
\$ 39,000.00	Total:	\$ 39,000.00

El factor 1.15 ya es fijado por el método Chilton.

2. Costo del equipo instalado  
\$ 44,850.00

3. Tuberías de proceso Se estima un 30% del concepto 2, debido a que se maneja, tanto estado sólido, como líquido y gaseoso.

Planta tipo	% del concepto 2
sólido	7 - 10
sólido-fluido	10 - 30
	30 - 60

\$ 13,455.00

4. <u>Instrumentación</u> <u>cantidades de</u> <u>controles auto-</u> <u>máticos</u>	<u>% del</u> <u>concepto 2</u>
ninguna	2 - 5
regular	5 - 10
extensa	10 - 15
<b>\$ 897.00</b>	

Se estima un % del concepto 2, ya que no hay ningún tipo de instrumentación automática.

5. <u>Edificios y</u> <u>estructura</u>	<u>% del</u> <u>concepto 2</u>
exterior	5 - 20
exterior e int.	20 - 60
interior	60 - 100
<b>\$ 26,920.00</b>	

Pensamos que se construirán los digestores a la interperie, pero debe hacerse una construcción hermética. Se considerará un 60% del concepto 2.

6. <u>Auxiliares</u> <u>magnitud</u>	<u>% del</u> <u>concepto 2</u>
existentes	0
adic. menores	0 - 5
adic. mayores	5 - 25
serv. nuevos	25 - 100
<b>\$ 4,485.00</b>	

Se podrían considerar adicionales mayores, ya que habría que instalar un depósito especial de agua y sus tuberías correspondientes, por tanto consideramos un 10% del concepto 2.

7. <u>Líneas exteriores.</u> <u>Longitud</u> <u>promedio</u>	<u>% del</u> <u>concepto 2</u>
corta	0
intermedia	5 - 15
larga	15 - 25
<b>\$ 1,794.00</b>	

La instalación de los digestores no requiere de una gran cantidad de tuberías exteriores, solamente la del cabezal de descarga de gas y la del agua, por lo tanto se puede considerar una longitud corta. No existe ningún otro tipo de línea, por lo tanto se considerará el 4% del concepto 2.

8. Suma de los conceptos  
2, 3, 4, 5, 6 y 7

\$ 92,392.00

9. Tubería y construcción

<u>Complejidad</u>	<u>% del concepto 8</u>
sencilla	20 - 35
difícil	35 - 50

\$ 18,478.2

Se pretende que la Ingeniería utilizada sea accesible a la gente de la comunidad rural y además aprovechar sus recursos, por lo tanto, se considere una Ingeniería y construcción sencilla. Tomándose el 20% del concepto 8.

10. Factor de tamaño

<u>Tamaño</u>	<u>% del concepto 8</u>
grande	0 - 5
pequeño	5 - 15
planta piloto	15 - 35

Se piensa operar con un digestor capaz de utilizar todo el desecho que se genere en la comunidad, por lo tanto, la instalación será grande. Considerando sólo un 2% del concepto 8.

11. Contingencias

<u>Proceso tipo</u>	<u>% del concepto 8</u>
firme	10 - 20
sujeto a cambio	20 - 30
especulativo	30 - 50

\$ 9,239.1

El proceso es estable, no hay que esperar muchas contingencias del mismo, por lo tanto, se considera un proceso firme con un 10% del concepto 8.

12. Suma de los conceptos  
8, 9, 10 y 11

13. Costo total de la planta

\$ 121,956.12

Los productos que se obtendrán del digestor son básicamente biogas y lodos digeridos, estimando un valor comercial de 0.63 pesos/m<sup>3</sup>, alrededor de un año representa un total de 6,898.5 pesos/año, y considerando un valor para el N<sub>2</sub> de 10.4 pesos/Kg de N<sub>2</sub>, nos representa un valor de \$10,590.00 por año, arrojándonos un total de 17,488.5 pesos/año.

Sin embargo, se estima que habrá una depreciación de la instalación de un 10% anual, por lo que el equipo amortizará en 10 años, lo que representa una cantidad de 12,195.6 pesos/año, arrojando un saldo a favor de 5,292.9 pesos/año.

Será necesario estimar los costos de mantenimiento, pensando en que los digestores se vaciaran una vez por año, para hacer limpieza y reparación de equipo.

Suponemos que se contratará una persona de la propia comunidad que realizará la operación, las refacciones del equipo no pueden ser programadas, sino tendrán que ser repuestas en el momento de su avería, sólo se podría considerar una partida de imprevistos. Por estas dos operaciones se considerará un 12% del costo del equipo, lo que arroja una cantidad de 4,680.00 pesos por año, por lo tanto el rendimiento sobre la inversión sería:

$$R.S.I. = \frac{UTILIDADES}{INVERSION} \times 100$$

$$\text{R.S.I.} = \frac{\$ 612.9}{\$121,956.12} \times 100 = 0.5$$

Como puede notarse, el rendimiento de la inversión es casi nulo, sin embargo, considerando que el proceso tiene como finalidad proporcionar un sistema alternativo de energía, se debe considerar aceptable.

## **CAPITULO VI**

### **USOS Y BENEFICIOS**

## CAPITULO VI

### USOS Y BENEFICIOS

#### UTILIZACION DEL BIOGAS

Los posibles usos para la utilización del biogas, pueden ser listados bajo tres amplias categorías: calor, luz y energía. El uso del calor se debe dirigir al gas, y en general, este es el método más eficiente en la utilización de energía.

El uso del biogas directamente como luz, es históricamente el primer uso que se conoce. En lámparas de calle en Exeter, Inglaterra, 1895. A pesar de no ser tan eficiente en comparación con la luz eléctrica, si es buen sustituto.

El tercer rubro puede ser dividido en dos categorías: energía para movimiento y energía estacionaria. La energía para movimiento es utilizada en camiones, tractores y carros. Los problemas que aquí se presentan, es la comprensión del biogas, el almacenamiento y la corrosión.

Sin embargo, el problema de corrosión es fácilmente remediado por medio de la purificación de gas. El problema de almacenamiento es el más caro y complicado. Por ejemplo: unos 380 litros de gas almacenado a una presión de 18.5 kg/cm<sup>2</sup> puede

ser utilizado para mover un tractor por un período de 30 a 45 minutos debido a que el tanque de almacenamiento es de 0.61 metros de diámetro y 1.22 metros de largo y acarrearía problemas en la transportación. Una alternativa sería utilizar un compresor de alta capacidad, pero esto resultaría incosteable.

El problema de compresión es por demás crítico por las siguientes razones: a) al comprimir una mezcla de gases que contiene 40% de gas inerte ( $\text{CO}_2$ ), es obvio que su eficiencia disminuye notablemente; b) el costo del compresor es inalcanzable para el campesino.

La segunda categoría de usos del gas como energía, es en máquinas estacionarias. Una aplicación común es en la operación de máquinas de combustión interna para generar electricidad. Este tipo de aplicación es atractivo, ya que con esto se minimizan las necesidades de almacenamiento y compresión del gas. Pero también su generación resulta demasiado cara.

En vista de lo anterior, lo práctico y recomendable es usarlo en:

- estufas domésticas
- lámparas de gas tipo capuchón
- refrigeradores de absorción

Ya que éste es de tipo de equipos accesibles en áreas

rurales con pocos recursos económicos.

Estos equipos no existen para el uso del biogas, por lo que tenemos dos posibilidades:

- diseñarlos especialmente para este combustible
- adaptar los ya existentes

Por aspectos económicos obvios, la segunda alternativa es la recomendable.

### ADAPTACION DE EQUIPOS

Bajo el nombre de quemadores, enmarcaremos los aspectos relevantes de la adaptación de estufas domésticas, lámparas de capuchón y refrigeradores de absorción.

El quemador es básicamente un mezclador, cuya función es asegurar que la proporción aire-gas produzca una combustión segura e higiénica. De la buena relación aire-gas, depende que la flama tenga una estructura y una dimensión bien definidas, a condición de que la velocidad de salida de la mezcla se halle dentro del intervalo de dos valores críticos:

- si la velocidad es inferior a un cierto valor mínimo, se produce un retroceso de la flama.
- si la velocidad es superior a un cierto valor máximo, se produce un despegue de la flama.

Cada quemador tiene una región de funcionamiento satisfactorio que se obtiene, al graficar en las ordenadas el flujo calorífico  $Q_c$  (Kcal/hra) por unidad de área de los orificios de salida del quemador, y en las abscisas la proporción de aire primario referido a la cantidad estequiométrica,  $n$ , Ver Fig. 1 .

La extensión de la región comprendida entre las curvas limitantes, es índice de la flexibilidad del quemador para un gas determinado.

#### INTERCAMBIABILIDAD DE GASES

Dos gases son intercambiables respecto a un quemador, cuando sin ninguna modificación o ajusted de éste, se puede alimentar con cualesquiera de los dos gases y obtener condiciones de funcionamiento satisfactorios; y serán satisfactorias, si en ambos casos el flujo calorífico (Kcal/hr) es aproximadamente el mismo y no se producen puntos amarillos o retroceso de flama.

Cuando dos gases no son intercambiables con respecto a un quemador, será forzoso modificar éste en mayor o menor grado, al pasar de un combustible a otro, transformación que se denomina conversión.

## DIAGRAMA DE INTERCAMBIABILIDAD DE GASES

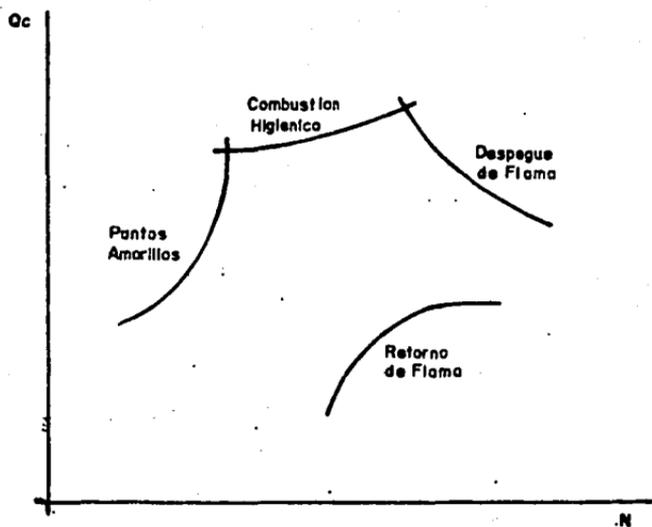


FIG. 1

INDICE DE WOBBE

El flujo calorífico (Kcal/hr), entregado por un quemador está dado por la siguiente expresión:

$$Q_c = c_s \frac{PC_{sup}}{\sqrt{\delta}} \sqrt{P}$$

La relación  $\frac{PC_{sup}}{\sqrt{\delta}}$  es llamada índice de Wobbe y se le designa como W, quedando:

$$Q_c = c_s W \sqrt{P}$$

donde:

s y P son constantes

El flujo calorífico es una función lineal del índice de Wobbe, de lo cual, se deduce que la primera condición de intercambiabilidad, es que los gases tengan un índice de Wobbe semejante.

El índice de Wobbe, fué adoptado por la Unión Internacional de la Industria del Gas, como base a la clasificación de los diferentes gases combustibles en tres familias (teoría y tecnología de la combustión. Vol. I, II y III Gas del Estado, Argentina, Junio, 1976):

Índice de Wobbe (Kcal/m <sup>3</sup> )	Familia
4,500 - 9,000	1a.
9,000 - 14,000	2a.
18,999 - 22,000	3a.

Si lo que deseamos es cambiar el combustible Gas L.P. por biogas, y ya que no existe intercambiabilidad, ya que el Gas L.P. pertenece a la tercera familia y el biogas a la primera, como el cambio de gas es definitivo será necesario modificar el quemador y probablemente la presión de alimentación.

El problema de esta conversión se plantea denominando: primero al gas para el que fue diseñado el quemador (Gas L.P.) y cuya presión de alimentación e índice de Wobbe son respectivamente  $P_1$  y  $W_1$ . La pregunta es: ¿Cuál deberá ser la sección del inyector ( $S_2$ ) y el índice de Wobbe ( $W$ ) del gas 2 (biogas) a fin de mantener un determinado quemador con el mismo flujo calorífico y la misma proporción de aire primario?

Con la hipótesis de conservación de flujo calorífico y cantidad de movimiento y de la proporción de aire primario, lleva a las siguientes ecuaciones:

$$(1) \quad S_1 W_1 P_1 = S_2 W_2 P_2 \quad \text{Conservación del flujo calorífico}$$

$$(2) \quad N_1 = N_2 \quad \text{Conservación de la relación de aire primario}$$

$$(3) \quad N = \frac{\sqrt{S}}{At} \sqrt{\frac{S}{s}} \quad \text{At: relación de aire estequiométrico con respecto al gasto del gas.}$$

La modificación a los quemadores se pueden calcular en base a la ecuación 1. Ejemplos:

Estufa

$$S_1 = 0.785 \text{ mm}^2 \quad S_2 = \frac{S_1 W_1 P_1}{W_2 P_2}$$

$$\phi = 1 \text{ mm}$$

$$W = 19,100 \text{ Kcal/m}^3$$

$$P_1 = 0.1 \text{ kg/cm}^2$$

$$S_2 = ? \quad S_2 = \frac{(0.785)(19,000)(0.1)}{(5,000)(0.024)}^{1/2}$$

$$= 6.12 \text{ mm}^2$$

$$\phi = ?$$

$$W_2 = 5,000 \text{ Kcal/m}^3$$

$$P_2 = 0.024 \text{ Kg/cm}^2 \quad \phi_2 = 2.79 \text{ mm}$$

Lo cual significa incrementar 7.8 veces el área del inyector para asegurar el mismo flujo calorífico.

Lámpara de capuchón marca COLEMAN de 300 bujías

$$S_1 = 0.0248 \text{ mm}^2$$

$$\phi = 0.2778 \text{ mm} \quad S_2 = \frac{S_1 W_1 P_1}{W_2 P_2}$$

$$W_1 = 19,100 \text{ Kcal/m}^3$$

$$P_1 = 16 \text{ Kg/cm}^2$$

$$S_2 = ? \quad S_2 = \frac{(0.0248)(19,100)(16)}{(5000)(10)}$$

$$\phi = ?$$

$$W_2 = 5000 \text{ Kcal/m}^3$$

$$P_2 = 10 \text{ Kg/cm}^2 \quad S_2 = 0.12 \text{ mm}^2$$

$$\phi = 0.39 \text{ mm}$$

Es necesario incrementar la sección del inyector 4.8 veces para obtener el mismo flujo calorífico.

Un refrigerador de absorción, amoníaco-agua, adaptado para operar con biogas:

$$S_1 = 0.07 \text{ mm}^2$$

$$S_2 = \frac{S_1 W_1 P_1}{W_2 P_2}$$

$$\phi = 0.3 \text{ mm}$$

$$W_1 = 19,000 \text{ Kcal/m}^3$$

$$P_1 = 0.1$$

$$S_2 = \frac{(0.07)(19,000)(0.1)}{(5000)(0.025)}$$

$$S_2 = ?$$

$$\phi = ?$$

$$W_2 = 5000 \text{ Kcal/m}^3$$

$$P_2 = 0.025 \text{ Kg/cm}$$

$$S_2 = 0.0535 \text{ mm}^2$$

$$\phi = 0.825 \text{ mm}$$

lo que significa incrementar el orden de 7.6 veces el área del inyector, para asegurar el mismo flujo calorífico.

Se debe de hacer un pequeño ajuste al aire primario y a la presión de trabajo para que la flama no presente despegue o retroceso y sea higiénica.

Experimentos realizados en el IIE mostraron que sí existe intercambiabilidad en estos gases, ya que tanto el consumo energético,

como la eficiencia, fue del mismo orden para la lámpara y la estufa, y para el refrigerador, la única diferencia estriba en el tiempo de realizar un trabajo.

Usos del biogas generado por el digester de 30 m<sup>3</sup> que se instalará en la Comunidad de Jicarero

El consumo de Gas L.P. en la comunidad, es de 120 Kg/mes, lo cual equivale a:

$$120 \frac{\text{Kg}}{\text{mes}} \times \frac{11,800 \text{ Kcal}}{\text{Kg}} = 1,416,000 \frac{\text{Kcal}}{\text{mes}}$$

La cantidad de biogas producida por el digester en un mes, es del orden de:

$$30 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} = 900 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}}$$

lo que nos da un total de energía:

$$900 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}} \times \frac{5335 \text{ Kcal}}{\text{M}^3} = 4,801,500 \frac{\text{Kcal}}{\text{mes}}$$

De éstas, 1,416,000 se emplearán en la cocción de alimentos, quedando un remanente de:

$$4,801,500 \frac{\text{Kcal}}{\text{mes}} - 1,416,000 \frac{\text{Kcal}}{\text{mes}} = 3,385,500 \frac{\text{Kcal}}{\text{mes}}$$

Lo que en la comunidad existe un remanente de leche, la cantidad de biogas sobrante, podría ser utilizado en la conservación de ésta por medio de refrigeradores de absorción.

Ya que el objetivo craso de esta tésis es la de fomentar las actividades productivas en las regiones rurales, se propondrá a la comunidad, la elaboración de productos derivados de la leche como una alternativa viable a la diversificación de su mercado agropecuario.

La capacidad de refrigeración que se tendrfa es:

$$3,385,500 \frac{\text{Kcal}}{\text{mes}} \times \frac{\text{m}^3}{5,335 \text{ Kcal}} = 634.6 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}}$$

Si por cada pie<sup>3</sup> de capacidad de refrigeración se necesitan 1.2 pies<sup>3</sup>/hr de biogas, entonces:

$$634.6 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}} \times \frac{35.31 \text{ pies}^3}{1 \text{ m}^3} \times \frac{1 \text{ mes}}{720 \text{ hr}} = 31.12 \frac{\text{pies}^3}{\text{hr}}$$

$$\frac{31.12 \text{ pies}^3/\text{hr}}{1.2 \text{ pies}^3/\text{hr}} \times 1 \text{ pie}^3 = 25.9 \text{ pies}^3 \text{ de volumen}$$

Por lo que se podrían instalar tres refrigeradores de 8 pies<sup>3</sup> de volumen.

Otros usos prácticos podrían ser: el secado de grano y forrajes, la conservación de alimentos, etc.

USO DE LOS LODOS

El aprovechamiento de los lodos residuales del digestor, puede ser de dos formas:

- por su valor fertilizante
- por su valor nutritivo

El lodo y los fluidos que quedan después de la digestión anaeróbica, debido a la eliminación de carbono e hidrógeno, durante el proceso, son más ricos en nitrógeno y fósforo que la original, y así es mejor abono que el composteo tradicional. Véase cuadro .

Balance de un digestor de 15 m<sup>3</sup> para 10 vacas  
de 500 Kgs.

	Nitrógeno		Fósforo	
	Kg	% (base seca)	Kg%	(base seca)
entrada	0.95	( 2.5 )	0.25	( 0.7 )
salida	0.93	( 3.8 )	0.25	( 1.0 )
biogas	0.02	-	-	-

El lodo residual sólido requiere aplicación manual, mientras el líquido sobrante puede ser rociado sobre las áreas de cultivo. El utilizar este abono acarrea un ahorro importante en fertilizantes químicos.

La fracción líquida del digestor puede considerarse como un sustituto parcial de la urea en la alimentación bovina, ya que con

tiene sales amoniacales y protefna unicelular. La protefna cruda pue  
de contabilizarse como un sustituto parcial de la soya y de otros in  
gredientes protefnicos de los concentrados.

### CONTAMINACION AMBIENTAL

El gran incremento que ha experimentado la poblaci3n mundial, su aglomeraci3n en centros urbanos y el surgimiento de em  
presas de producci3n masiva, industrial y agropecuaria, para satisfa  
cer necesidades crecientes de la poblaci3n, son caracterfsticas nota-  
bles de nuestro tiempo; como lo son tambi3n la generaci3n de enor--  
mes cantidades de desechos de todo tipo, los cuales elevan cada dfa  
los ndices de contaminaci3n del medio ambiente, hasta hacer de cier  
tos lugares del planeta en lugares casi inhabitables.

En el caso de la granja moderna, la explotaci3n intensi-  
va es un problema que requiere soluci3n inmediata, el disponer de -  
grandes cantidades de esti3rcol y otros desechos que se producen, de  
manera que no contaminen el agua, ni propicien la proliferaci3n de in  
fecciones, malas hierbas y olores desagradables y que al mismo tiem  
po, se facilite el aprovechamiento de estos desechos orgnicos, se  
puede obtener, porque si bien es cierto que contienen sustancias n3-  
tritivas que benefician los cultivos, si se deposita en exceso (cosa que  
normalmente ocurre), los nutrientes son arrastrados o lavados hacia  
otras zonas o hacia cursos de agua y lagos, en donde las bacterias al

descomponer la materia orgánica para su sustento, consumirán el oxígeno contenido en el agua y que es necesario a la vida acuática, que de este modo es destruida con los consiguientes daños ecológicos.

Además, el estiércol puede contener gérmenes patógenos, que provocan el aumento de enfermedades infecciosas (tanto en seres humanos, como en animales), que vienen por el mal manejo y la acumulación de éste, además produce olores desagradables, ya que contiene sustancias odoríferas, como: amoníaco, ácido sulfhídrico, mercaptanos y ácido butírico. Para la solución de este gran problema, es la fermentación anaeróbica.

## **CAPITULO VII**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CAPITULO VII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Por lo anteriormente visto podemos asegurar que la construcción de biodigestores nos permite evitar la competencia que podría presentarse entre el aprovechamiento tradicional de residuos animales y vegetales para fines agrícolas y combustibles, obteniendo con esto:

- La obtención de gas combustible para fines de cocción de alimentos, alumbrado, refrigeración, etc.
- La obtención de lodos digeridos como abono de la tierra, tanto sólidos como líquidos, con mejores rendimientos.
- Saneamiento ambiental, eliminando los malos olores.
- Higiene. Conservando y eliminando las plagas que pueden causar infecciones a la comunidad.
- Preservación de la flora, evitando la tala de bosques.
- Elevación del nivel de vida campesina brindándole satisfactores técnicos, económicos y sociales.

Por todo lo anterior, la fermentación anaeróbica, la presento como una alternativa posible para solucionar los problemas energéticos de la comunidad rural. Además, recomendaría el uso de digestores en el tratamiento de aguas negras, de las grandes ciudades, evitando así la destrucción paulatina de la flora y la fauna.

Con el trabajo hasta aquí realizado, se trató de encauzar uno de los problemas de México, y si con esto se puede crear un incentivo para el mejoramiento de las comunidades, ojalá también sirva para aumentar la investigación y mejorar el rendimiento de este proceso.

CAPITULO VIIIBIBLIOGRAFIA

1. Boletín IIE, Vol. 3, Núm. 3, Marzo de 1979.
2. Aprovechamiento de Desechos Orgánicos en las Granjas "CEDENA". Jaime Raymundo Cosfo. México, 1978.
3. "Methane Generation From Human, Animal and Agricultural Wastes". National Academy of Science.
4. Día. 11 de marzo de 1980
5. "Micro-organisms as Tools for Biomasa Conversion" Edgar J. Da Silva. Impact of Science on Science, Vol. 29, No. 4, 1979.
6. "Obtención del Biogas". Felipe H. Santander, México 1978.
7. "Methane Production from High Rate Anaerobic Digestion of Hog and Dairy Cattle Manure". Wang Y. Fong. Mayo 1973.
8. Boletín IIE. Vol. 2, Núm. 6, Junio 1978
9. "La Energía por Desechos Orgánicos". Ing. Alfonso Félix Almada. 1978.
10. "Other Homes and Garbage". Leckie, Sim. Master, Gil. Otros. Sierra Club Books, Sn Francisco, 1975.
11. "Energy from Solid Wastes. Cheremisinoff", Paul N., Morresi. Angelo C., Ed. Dekker, U.S.A. 1976.
12. "Sistemas Energéticos Integrados, Avances de la Investigación Socioeconómica". IIE - CECODES. 2º Informe, Julio, 1977.
13. "Anteproyecto de Comunidades Piloto para la Implantación de Sistemas Energéticos Integrados en el Medio

- Rural". S. Valverde y otros. Cuernavaca, Mor. Agosto 26 de 1978.
14. IDEM. E. Caldera y otros. Cuernavaca, Mor. Diciembre 15, 1977.
  15. "Diseño y Operación de Digestores". IIE. Abril 1980.
  16. "Ingeniería Básica y Puesta en Operación de un Digestor de Desechos Orgánicos". IIE. Febrero 1980.
  17. "Informe Final Sobre Operación de un Digestor Familiar", IIE, Cuernavaca, Mor., Abril, 1979.
  18. Porter, J. "Microorganisms as Tools for Rural Processing of Organic Residues". Proceedings of the Point WH-NR United Nations University Conference Bioconversion of Organic Residues for Rural Communities, Guatemala, November 1978.
  19. Doroty J. de Renzo. "Energy from Bioconversion of Waste Materials", Moyes Data Corporation, 1977.
  20. Philip M., Khon. "Biomass: A Growing Energy Source", Chemical Engineering, Enero, 1978.
  21. "Ingeniería de Proyectos para Plantas de Proceso" E. F. Rase y M. H. Barrow, Ed. CECSA, 1973.
  22. "Estudios, Adaptación y Pruebas de Equipos Comerciales para la Utilización del Biogas". IIE, Cuernavaca, Mor. Mayo, 1979.