

PONENCIA DEL I SEMINARIO INTERNACIONAL SOBRE EL USO DE ENERGÍAS RENOVABLES:

PLANTAS DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA Y PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN EL ÁMBITO DOMÉSTICO, RURAL, O EN GENERAL DE MICRO APLICACIONES CON ENFASIS PARA COMUNIDADES ALTAS ANDINAS

Por: Msc. Ing. Juan Carlos Rojas Zerpa – VENEZUELA

1.- INTRODUCCIÓN

Recibo con gran beneplácito la realización e invitación al I Seminario Internacional Sobre el Uso de Energías Renovables, a realizarse próximamente en la localidad de Cuenca – Ecuador. Visto que, Latinoamérica en general presenta unas excelentes oportunidades climáticas, orográficas, fuentes hídricas, biomasa, entre otros aspectos, para la generación de energía primaria de origen renovable. Aunque el potencial exista, verdaderamente se aprovecha muy poco en comparación con otras fuentes de energía y en atención a las múltiples necesidades existentes.

Por ende, bien vale la pena curtirse de las tecnologías renovables existentes, a los fines de promover una nueva forma de desarrollo donde se integre el hombre y su entorno. Esta visión de sostenibilidad pudiera ser una nueva puerta de esperanza para la humanidad, en aras de encontrar vías o soluciones que permitan armonizar nuestra existencia sobre la tierra.

En este sentido, la biomasa representa una de esas fuentes renovables, que sin duda alguna pudiera ayudarnos a resolver ciertos problemas de suministro energético y de contaminación ambiental dentro de nuestro contexto geográfico, social, económico y político. De modo tal que bien vale la pena revisar ciertos asuntos de orden mundial, en torno a los acontecimientos que vienen ocurriendo por la utilización de la energía, el ambiente y la sociedad. Además de la fundamentación teórica en que se basa el aprovechamiento tecnológico de la biomasa.

La contaminación ambiental, el cambio climático, el agotamiento de las fuentes fósiles y la pobreza, son algunos de los mayores desafíos que debe enfrentar la humanidad con total urgencia, a los fines de ofrecer soluciones sostenibles y duraderas en aras de armonizar y fortalecer la paz del planeta.

La atmósfera siente el efecto de la inyección continua y desproporcionada de los gases causantes del efecto de invernadero (Dióxido de Carbono, Metano, Óxidos de Nitrógeno, entre otros), los cuales están amenazando la estabilidad climática mundial.

Las fuentes convencionales de energía (fósiles) son los mayores causantes del sobrecalentamiento global. De modo tal que el transporte, las industrias y la agricultura intensiva (degradación de la tierra, incluyendo la deforestación) son los principales agentes emisores de gases efecto de

invernadero (GEI). El dióxido de carbono (CO₂) se ha incrementado proporcionalmente al aumento de la temperatura global. Desde luego, las coincidencias entre las emisiones de CO₂ y temperatura global, elevan la sospecha directa en el ser humano.

Es evidente que el cambio climático se está sintiendo con mayor intensidad en todas las regiones del globo terrestre. Los diversos fenómenos que se manifiestan como consecuencia de las alteraciones al clima; llámense inundaciones, sequías, huracanes, tifones, retroceso de glaciares, calores y fríos intensos, variaciones estacionales, entre otros. Revelan que algo dramático sucede...

Los altos costos del petróleo y sus derivados (costos sostenidos), advierten la ocurrencia de un posible agotamiento de sus fuentes convencionales y reservas. De modo tal que la energía fósil pudiera estar más comprometida de lo que pudiéramos pensar. En la actualidad ya existen estimaciones y proyecciones que advierten una situación global desfavorable. Los tres principales recursos naturales primarios (petróleo, gas natural y carbón) se agotaran dentro de una escala de tiempo reducida. En este sentido, se pronostica de acuerdo a estimaciones lineales que el petróleo se agotará aproximadamente en el año 2037, el gas natural correrá la misma suerte para el año 2062 y el carbón para el año 2286. No cabe duda que si los consumos se incrementaran de forma exponencial (como ocurre normalmente en la realidad), la situación tendería a ser más dramática, es decir, un agotamiento de fuentes fósiles en menos tiempo de lo proyectado linealmente.

Situación que obliga a replantear urgentemente el actual modelo de "desarrollo global".

La pobreza física y mental, en asociación con el analfabetismo ambiental de los diferentes niveles de gobierno, sin duda alguna, son una de las principales causas por la cual se expanden las fronteras agrícolas, se invaden tierras prístinas, se deforestan selvas y bosques, entre otros impactos socioambientales. Cuyas consecuencias inmediatas y acumuladas atentan, inclusive, contra la propia supervivencia del ser humano.

Latinoamérica no se escapa de esta nefasta realidad, la pobreza suele abarcar grandes estratos de la población, donde incluso existen niveles de pobreza extrema.

Curiosamente y por la diversidad biológica de la región, existen comunidades humanas bastante aisladas de las grandes ciudades, pueblos o centros poblados importantes, donde el factor ambiente, energía y sociedad suele marcar una significativa relación de supervivencia.

En este sentido, se propone la utilización de las plantas de biogás (Biodigestores) como una interesante alternativa para la disminución o prevención de la contaminación ambiental (saneamiento ambiental), producida por la inadecuada acumulación de residuos y excrementos provenientes de las actividades ganaderas y agrícolas (actividades rurales), o de los residuos fecales de una vivienda o grupo de viviendas unifamiliares. Al mismo tiempo que se obtiene como consecuencia de la descomposición del residuo, una fuente de gas metano (biocombustible) disponible para diversos usos energéticos (valor socioeconómico), abonos orgánicos estabilizados para la fertilización del suelo (agricultura conservacionista) y la oportunidad de ofrecer una solución autónoma, descentralizada, renovable y de mínimo impacto ambiental.

Afortunada o lamentablemente, son los países subdesarrollados los que más requieren aprovechar esta particular forma de energía; pero por razones económicas, sociales, culturales y/o tecnológicas, se ven amenazados y limitados en cuanto a su disposición y/o uso masivo.

Esperamos que en los próximos años, se modifique el patrón de abastecimiento energético mundial, y en efecto se comience a diversificar el uso de las energías renovables, compatibles con el ambiente y la sociedad.

2.- LIMITACIONES Y ALCANCES

Tanto en Venezuela como en el resto de los países andinos existe una región de páramo andino y altiandino, que requiere mayor atención gubernamental en cuanto a la adopción de políticas y estrategias que permitan armonizar la permanencia de las comunidades humanas dentro de sus territorios y/o unidades ecológicas, en aras de resguardar su diversidad cultural y genética.

La conformación orográfica de las grandes cadenas montañosas impide o limita el acceso a sus comunidades, de modo tal que su desarrollo socioeconómico está determinado por sus propias condiciones geográficas, lo que evidentemente restringe la disponibilidad de utilización de fuentes convencionales de energía (fósil, hidroeléctrica por redes, etc.)

En este sentido, las aplicaciones de las diferentes plantas de biogás suelen representar una excelente oportunidad para superar las limitaciones inherentes a la disponibilidad in situ de las fuentes convencionales de energía, con beneficios ambientales y socioeconómicos superiores a las fuentes anteriores. Sin embargo, hay ciertas restricciones en la dinámica de la digestión anaeróbica que impiden su uso en zonas de pronunciada elevación altitudinal, tal es el caso de las zonas altas andinas de Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia.

Como se veremos mas adelante, existe un factor ambiental que suele condicionar el rendimiento de una planta de digestión anaeróbica, principalmente cuando se desea operar en zonas de bajas temperaturas ambientales.

No obstante, en el presente documento (ponencia) se describe una metodología desarrollada para mejorar estos rendimientos en tales circunstancias (mayor velocidad de digestión), además de las teorías y fundamentos numéricos indispensables para proyectar y/o diseñar una planta de biogás.

Para incrementar la velocidad de digestión y por ende obtener mayor producción de biogás por unidad de tiempo, se requiere elevar la temperatura interna del reactor. La propuesta de mejora energética se basa en el uso de la energía solar térmica y/o fotovoltaica, fuente primaria no contaminante y disponible abundantemente en los países tropicales.

El sistema de aprovechamiento diseñado permitirá la captación y transferencia de la energía solar en forma de calor y electricidad, logrando suministrar con dicho diseño el calor necesario y suficiente para incrementar la temperatura interna del reactor, acondicionándolo favorablemente para incrementar la eficiencia del digestor.

De esta manera se garantiza el saneamiento ambiental del lugar, entorno o comunidad; al tanto que se obtiene un biocombustible limpio y materia orgánica de amplio valor nutritivo para los cultivos, jardines o huertas medicinales.

3.- ENERGÍA DE LA BIOMASA

El término biomasa, en sentido amplio, se refiere a cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato en un proceso biológico. El concepto de biomasa comprende a productos tanto de origen vegetal como animal.

En la actualidad se ha aceptado el término biomasa para denominar al grupo de productos energéticos y materias primas de tipo renovable que se originan a partir de la materia orgánica formada por vía biológica. Quedan, por tanto, fuera de este concepto los combustibles fósiles y/o los productos orgánicos derivados de ellos.

3.1 Tipos de biomasa de acuerdo a su origen:

- **Biomasa primaria:** Es la materia orgánica formada directamente por los seres fotosintéticos (algas, plantas verdes, y demás seres autótrofos). Este grupo comprende toda la biomasa vegetal, incluidos los residuos agrícolas (paja o restos de poda) y forestales (leñas).
- **Biomasa secundaria:** Es la producida por los seres heterótrofos que utilizan en su nutrición la biomasa primaria. Este tipo de biomasa implica una transformación biológica de la biomasa primaria para formar un nuevo tipo de biomasa de naturaleza distinta a la inicial (Un ejemplo sería la carne o las deyecciones debidas a los animales herbívoros).
- **Biomasa terciaria:** Es la producida por los seres que se alimentan de biomasa secundaria, como sería el caso de la carne de los animales carnívoros, que se alimentan de los herbívoros.

3.2 Composición de la biomasa:

Esta composición está determinada de acuerdo al tipo de origen de la biomasa.

Los componentes principales de la biomasa vegetal, son (tejido vegetal):

- Hidratos de carbono (celulosa principalmente): 60%
- Prótidos: 25%
- Lípidos: 6%
- Minerales: 9%

Los hidratos de carbono es el componente que más abunda en la biomasa vegetal, de modo tal que dicha biomasa puede adquirir la siguiente denominación:

- Biomasa lignocelulósica: es aquella donde predominan las celulosas, llámense hemicelulosas y holocelulosas, y la lignina. Donde de este tipo de biomasa se encuentra la paja, la madera, la leña, el forraje, etc.
- Biomasa amilácea: el hidrato de carbono se encuentra en forma de polisacáridos de reserva, tales como el almidón o inulina. Los cereales o las papas pueden ser ejemplos representativos de este tipo de biomasa.

- Biomasa azucarada: el hidrato de carbono esta constituido por azúcares, ya sean monosacáridos (glucosa o fructuosa) o disacáridos (sacarosa). La remolacha o el tallo de la caña de azúcar son ejemplos de la biomasa azucarada.

En la biomasa de origen animal, la proporción de proteínas, lípidos e hidratos de carbono suele ser diferente a la biomasa vegetal, existiendo una disminución considerable del contenido de hidratos de carbono y un aumento en el contenido proteico y lipídico.

3.3 Biomasa para fines energéticos:

Las moléculas orgánicas de la biomasa contienen energía acumulada en sus enlaces, la cual puede ser liberada en los procesos de combustión. Esta energía procede en última instancia, de la energía solar captada por los vegetales en el proceso fotosintético que dio origen a la reducción del carbono inorgánico (CO₂) e hizo posible que se formaran los distintos tipos de moléculas orgánicas a través de los complejos mecanismos metabólicos de los seres vivos.

La materia orgánica integrante de la biomasa puede proporcionar su energía bien en forma directa, por combustión, o bien a través de compuestos originados por transformación de la biomasa primaria tales como alcoholes e hidrocarburos, que también devuelven la energía que contienen en sus enlaces al ser oxidados, ya sea en motores de explosión o en quemadores diseñados para tal efecto.

Hoy en día, la biomasa sigue abasteciendo una gran parte de la demanda energética de la humanidad, principalmente en los países en vías de desarrollo, donde la biomasa cubre cerca del 40% de la demanda energética. Según estimaciones del Banco Mundial, la biomasa es en la actualidad la principal fuente de energía de unos 2250 millones de personas (De Juana, 2003).

3.4 Situación de la biomasa comparada con las restantes energías a escala mundial

Del total de la energía que se consume en el mundo, estimada en 377 exajulios ($377 \text{ EJ} = 3,77 * 10^{20} \text{ J}$), la biomasa supone el 14,6 % (55 EJ), pero el reparto es muy desigual entre los países industrializados y los en vías de desarrollo. De modo tal que en los países industrializados el consumo de biomasa para fines energéticos se estima en unos 7 EJ (1,86 % del consumo energético mundial y 2,8% del consumo energético total de los países industrializados), mientras que en los países en vías de desarrollo la biomasa supone la fuente energética más importante, es decir, unos 48 EJ equivalentes a 12,73 % del consumo energético mundial (37,80 % del consumo energético total para los países en vías de desarrollo). (Ver tabla 2)

Tabla 2.
Situación de los países industrializados y en vías de desarrollo en consumo de energía

Concepto	Países industrializados	Países en vías de desarrollo	Total mundial
Energía no biomásica (EJ)	243	79	322
Biomasa (EJ)	7	48	55
Energía Total (EJ)	250	127	377
Población (millones de habitantes)	1200	3650	4870
Consumo anual per cápita (GJ)			
Energía no biomásica	200	21	65
Biomasa	6	13	11
Global	206	34	76

Fuente: De Juana, 2003

Evidentemente los países industrializados consumen poca energía de fuentes biomásicas, basando principalmente su desarrollo en fuentes primarias de origen fósil, nucleares, entre otras.

Cabe destacar que en los países industrializados cada persona consume anualmente unos 206 GJ de energía, mientras que en los países en vías de desarrollo solo consumen 34 unidades. De modo tal que la mayoría de la población (3/4 partes del planeta) residente en los países menos desarrollados, cuyo consumo energético per cápita es 6 veces inferior al de los países industrializados.

Tabla 3.
Consumo anual de biomasa

País	Consumo per cápita (GJ)
AMERICA LATINA	
Brasil	11,85
Colombia	18,30
Guatemala	13,05
Nicaragua	13,95
Perú	15,00
AFRICA	
Kenia	19,8
Mozambique	15,9
Nigeria	23,2
Ruanda	24,00
Tanzania	42,6
Zambia	14,1
Zaire	11,8

ASIA	
China	8,8
India	11,2
Nepal	10,6
Pakistán	12,9
Tailandia	24,1
Filipinas	15,7
OCEANIA	
Islas Fiji	18,7
Conjunto países menos desarrollados	34
Países industrializados	206
Mundo	76

Fuente: De Juana, 2003

Tabla 4.
Contribución de las distintas fuentes para satisfacer la demanda energética en los países industrializados y en vías de desarrollo

Fuente de energía	Países industrializados	Países en vías de desarrollo	Total mundial
Petróleo (%)	38,3	25,8	34,1
Carbón (%)	24,5	23,4	24,1
Gas natural (%)	22,7	7,1	17,4
Hidráulica (%)	5,7	5,1	5,5
Nuclear (%)	5,9	0,6	4,1
Biomasa (%)	2,8	38,0	14,6
Otras (%)	0,1	-	0,2
Consumo total (EJ)	250	127	377

Fuente: De Juana, 2003

3.5.- Biocombustibles

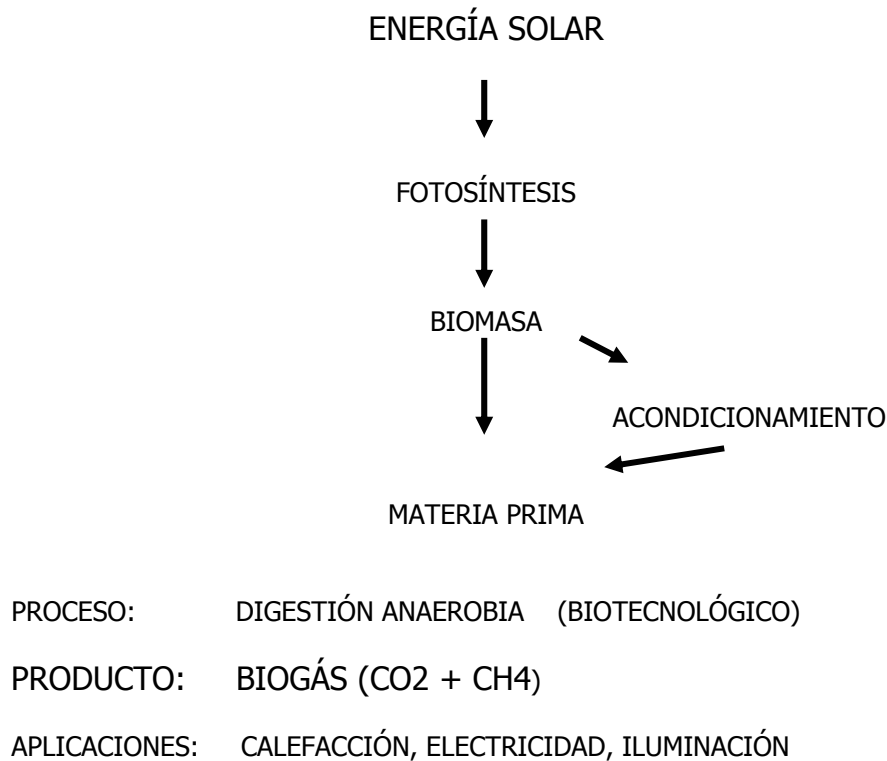
Con la denominación de combustible se hace referencia comúnmente a cualquier sustancia que, en contacto con el oxígeno del aire y a partir de una determinada temperatura, arde y produce energía.

En principio, pueden establecerse dos tipos de combustibles según su naturaleza: los combustibles fósiles, constituidos por el petróleo, el carbón y el gas natural y sus derivados, y los biocombustibles, que son los que proceden de la biomasa.

El uso de la biomasa con fines energéticos implica una adecuación de la materia prima para su empleo como combustible en los sistemas convencionales. Esta adecuación puede ir precedida de un acondicionamiento inicial para convertirla en el producto idóneo, que se tratara luego por el proceso de transformación adecuado. Según la naturaleza de la biomasa y el tipo de combustible deseado, se pueden utilizar procesos mecánicos (astillado, trituración, compactación), termoquímicos (combustión, pirólisis y gasificación), biotecnológicos (microbianos o enzimáticos) y extractivos, para obtener combustibles sólidos, líquidos o gaseosos.

A continuación se muestra un esquema del proceso de producción y aprovechamiento del biogás

Esquema sintético del proceso de producción y aprovechamiento del biocombustible (biogás)



El denominado biogás es un biocombustible gaseoso que se obtiene en la digestión anaerobia (en ausencia del oxígeno) de la biomasa y cuyos principales componentes son el metano (55 – 65%), el dióxido de carbono (35 – 45%) y, en menor proporción, nitrógeno (0 – 3%), hidrógeno (0 – 1%), oxígeno (0 – 1%) y sulfuro de hidrógeno. Se produce a razón de unos 200 – 400 litros por kilogramo de materia seca, con un valor calórico de unas 5500 kcal/m³ (depende del metano)

La digestión anaerobia está muy indicada para el tratamiento de biomasa con alto contenido en humedad, ya que el proceso se favorece en medio acuoso. En este sentido, tiene una aplicación

muy clara en el tratamiento de aguas residuales urbanas y de explotaciones ganaderas o agrícolas. También se produce este proceso de forma natural en los vertederos de RSU, pudiéndose obtener el gas resultante mediante perforaciones realizadas a intervalos regulares sobre la superficie del vertedero.

4.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL BIOGÁS

4.1 El Biogás

4.1.1 Generalidades

Los productos de la descomposición en ausencia del aire (anaeróbica) de desechos sólidos tipo orgánico (biogás), y el producto de su descomposición (Bioabono), presentan características apropiadas para ser utilizadas como combustible y fertilizante respectivamente.

Por lo tanto, según el Instituto Colombiano Agropecuario I.C.A (1.992), "El biogás es un combustible producido mediante fermentación anaeróbica de desechos orgánicos de origen animal ó vegetal, dentro de cierto límite de temperatura, humedad y acidez".

El biogás presenta la siguiente composición química:

- Metano (CH₄): 50 - 70 %
- Dióxido de Carbono (CO₂): 30 - 50 %
- Ácido Sulfhídrico (H₂S): 0,1 - 1 %
- Nitrógeno (N₂): 0,5 - 3 %

El poder energético del biogás, depende en gran parte de la calidad y pureza, respecto al contenido de metano presente en la mezcla.

4.1.2 Descripción del proceso de producción de biogás:

El proceso de descomposición de materia orgánica en medio anaeróbico se denomina digestión, ocasionado por la acción de enzimas extracelulares que intervienen en dicho proceso de acuerdo a varias etapas:

a) **Etapa aeróbica:** El oxígeno entra al digestor (reactor de descomposición) en conjunto de la materia orgánica de desecho.

Dicho oxígeno es usado por las bacterias aeróbicas permitiendo su descomposición posterior. En esta etapa se produce Dióxido de Carbono (CO₂) y se genera calor.

b) **Etapa anaeróbica:** Las bacterias fermentativas liberan enzimas, que descomponen inicialmente los polímeros, dando lugar a los ácidos orgánicos solubles.

c) **Digestión ácida:** Las bacterias acetogénicas convierten los ácidos en acetatos, Hidrógeno y Dióxido de Carbono. En esta fase se obtiene hidrógeno (H₂), combustible de excelentes propiedades energéticas, pero su presencia es escasa en la composición del biogás, siendo usado por las bacterias anaeróbicas en la siguiente etapa para producir el metano.

d) **Producción del biogás:** Las bacterias metanogénicas utilizan los subproductos derivados de la fase anterior para convertirlos en agua, dióxido de carbono y metano. En un proceso denominado Metanogénico.

4.1.3 Etapas del proceso metanogénico:

En 1989, Nymy citado por Thuyhardat (1.992), dice: "El proceso metanogénico por su complejidad se considera en un sentido sensu largo que caracteriza al proceso, como el producto de una serie de etapas biológicas bien estructuradas y comprendidas, mientras que las fisicoquímicas no se conocen apropiadamente". El proceso fermentativo se lleva a cabo a su máxima plenitud, en 10 etapas:

1. Hidratación de la materia prima
2. Acción bacteriana sobre partículas de fermentación
3. Cambio en la estructura de la masa en la materia prima
4. Solubilización
5. Hidrólisis
6. Fermentación productora de hidrógeno molecular
7. Equilibrio Iónico
8. Transferencia de hidrógeno molecular
9. Amalgamiento Acetático
10. Movimiento del hidrógeno

Descripción:

1. **Hidratación de la materia prima:** El proceso metanogénico se inicia hasta que la humedad de la materia prima sea mayor o igual a un 50 %. La hidratación progresiva de la materia prima en la fermentación Batch es lo que compensa la producción de gas en función del tiempo.
2. **Acción bacteriana sobre las partículas de fermentantes:** Los microorganismos lanzan el ataque sobre la materia en fermentación, en forma aleatoria mediante la producción de exoenzimas, o en forma sistemática por adhesión de grupos sencillos o mezclados de poblaciones bacterianas sobre la matriz del sustrato.
3. **Cambio en la estructura de la masa de la materia prima:** La materia orgánica en su estado rugoso original, pasa a un estado suave, lo cual es muy importante cuando se aplican técnicas de bombeo en la digestión continua de sólidos.
4. **Solubilización:** La materia orgánica se transforma en moléculas solubles por la acción biológica y en compuestos coloidales por la acción mecánica y físico química.
5. **Hidrólisis:** Las macromoléculas orgánicas se convierten en micromoléculas, por la acción de bacterias celulolíticas y proteolíticas y por la acción de hidrólisis química.
6. **Fermentación productora de hidrógeno molecular:** a) Los microorganismos fermentadores transforman las pequeñas moléculas de materia prima a formas acéticas, carbono inorgánico e hidrógeno molecular. b) Los microorganismos acetogénicos productores de hidrógeno obligados, transforman las moléculas de vida corta en formas acéticas, carbono inorgánico e hidrógeno molecular si la presión parcial del hidrogeno es baja.

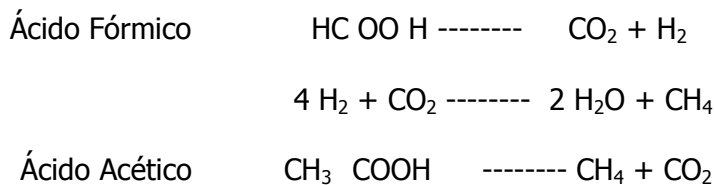
7. Equilibrio iónico: a) El medio fermentativo está o se llega a enriquecer con moléculas solubles. b) En razón de la producción de aniones inorgánicos en la fermentación, deben existir pares equivalentes de cationes y eventualmente producirse, cuando estos son hidrógeno H_3O^+ , lo cual ocurre frecuentemente, originando cambios en el pH.

8. Transferencia de hidrógeno molecular: a) El hidrógeno molecular producido por las bacterias fermentativas debe ser factible de alcanzar por los microorganismos recicladores de éste, logrando esto en su mejor forma en los agregados microbianos, los donantes de hidrógeno, en donde se encuentran presentes ambos tipos de microorganismos. b) Debido al bajo coeficiente de transferencia de la fase líquida a la gaseosa, el hidrógeno molecular tiende a acumularse en el medio líquido en un estado de no - equilibrio.

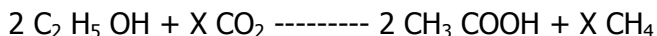
9. Amalgamiento acético: Formación a través de oxido reducción de metano y dióxido de carbono a partir de compuestos acéticos.

10. Movimiento del Hidrógeno: Competencia por el hidrógeno reciclable. Un gran número de poblaciones bacterianas, compite por consumo de hidrógeno molecular. a) Las bacterias metanogénicas arcaicas utilizan el hidrógeno molecular para reducir el carbono inorgánico para producir metano. b) Las bacterias sulfato - reductoras, utilizan hidrógeno molecular para reducir el Ion sulfato (SO_4^{2-}) a sulfuro de hidrógeno (H_2S, HS^-) c) Las bacterias acetogénicas, utilizan hidrógeno molecular para reducir el carbono inorgánico y producir compuestos acéticos.

La formación de metano a partir de algunas de las vías anteriores, se puede desarrollar basándose en las siguientes ecuaciones degradativas.



Los ácidos orgánicos y alcoholes son oxidados vía deshidrogenación.



4.1.4 Niveles tróficos en la digestión anaeróbica:

Según Hashimoto y otros (1982) citado por Taylhardat, L (1992), dice: " la población bacteriana que vive en el digestor se ubica en diversos niveles tróficos combinándose y coordinándose en sus actividades metabólicas". Para ejercer diversas funciones catabolizadoras sobre los compuestos carbonados hasta producir metano, según esto se han caracterizado los siguientes:

1. **Bacterias hidrolíticas - grupo I:** Catabolizan sacáridos, Proteínas, Lípidos y otros constituyentes menores de la biomasa, generando ácidos grasos, H₂ y CO₂.
2. **Bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno - Grupo II:** Catabolizan ciertos ácidos orgánicos y productos finales neutro, produciéndose acetato, CO₂ y H₂ a partir de los ácidos grasos producidos en la etapa anterior.

3. **Bacterias alomacetogénicas - Grupo III:** Este grupo es de reconocimiento reciente y su metabolismo se basa en catabolizar compuestos uní carbonados (H_2 , CO_2 ó $HCOOH$) o hidrolizan compuestos poli carbonados hacia ácido acético.
4. **Bacterias metanogénicas - Grupo IV:** Estas Catabolizan el acetato o compuesto monocarbonado a metano.

4.1.5 Factores qué afectan el proceso

“El proceso de digestión y su eficiencia está determinado por la temperatura ” (I.C.A, 1992, p.10)

La velocidad de producción de biogás es una función de la temperatura de operación del digestor. Por lo tanto se distinguen tres rangos de temperatura, en los cuales las bacterias anaeróbicas pueden operar:

1. Termofílico: Comprende temperatura superiores a los 35 °C
2. Mesofílico: Comprende temperaturas entre 15 °C y 35 °C.
3. Psicofílico: Entre 0 °C y 15 °C

Según el I.C.A (1.992), “ La experiencia le ha demostrado que el intervalo termofílico presenta mayor velocidad de fermentación que el mesofílico y mayor aún que el psicofílico”. Por lo tanto el tiempo de retención aumenta en el digestor con el descenso de la temperatura.

A mayor tiempo de retención de las partículas orgánicas, la velocidad de digestión disminuye ocasionando reducción de la eficiencia o rendimiento del digestor. En el nivel termofílico, el máximo rendimiento se obtiene a una temperatura cercana a los 54 °C y en el nivel mesofílico, a los 35 °C.

4.1.5.1 Tiempo de retención

El tiempo de retención corresponde al número de días que una cantidad dada de desechos debe permanecer dentro del reactor de digestión. Este factor depende de la temperatura ambiente del sector o sitio de ubicación del digestor. De está manera se tiene a mayor temperatura, un tiempo de retención, corto y cuando es baja se figuran tiempos de retención más prolongados.

Según el I.C.A (1.992), “ la cantidad dada de desechos debe haber liberado todo el biogás que potencialmente puede liberar en el tiempo de retención, de tal forma que termina totalmente digerida ”.

Según esto en la tabla 1, se indica los tiempos de retención en función de la temperatura ambiente, solo cuando se emplean desechos orgánicos de tipo animal (o en gran proporción).

Es importante acotar que a medida que se aumenta la temperatura interna del reactor, el tiempo de retención disminuye proporcionalmente. Por ejemplo si la temperatura interna a elevar es de 15°C, el tiempo de retención según la tabla 1 disminuye de 90 días hasta los 60 días, si la temperatura inicial es de 10°C. El rendimiento se cuantifica de acuerdo a la velocidad de digestión. Para este caso el rendimiento de mejorar dicha temperatura sería de 33.33%.

Tabla 1
Tiempos de Retención para distintas temperaturas

Temperatura (°C)	Tiempo de Retención (días)
10	90
15	60
20	45
25	37
30	32
35	28

Fuente: Instituto Colombiano Agropecuario (I.C.A) 1.992

4.1.6 Substratos utilizados

4.1.6.1 Generalidades

El sustrato corresponde al material orgánico que se procesa en el interior del reactor de digestión anaeróbica. Los sustratos se ubican en dos grupos principales de origen animal y vegetal, los cuales se mezclan con el agua diluyéndose para producir la composición apropiada, con la que se carga el digestor.

Entre los sustratos de origen animal más usados figuran los siguientes estiércoles: de origen bovino es el sustrato de mayor utilidad, adicionalmente las excretas humanas también pueden emplearse como sustrato, considerando la excreta libre de detergentes o jabones, ya que los mismos neutralizan a las bacterias anaeróbicas de tipo metanogénica.

Según el I.C.A (1.992), " Es posible hacer una combinación de desechos animales y vegetales, siempre y cuando se mantenga un balance apropiado de pH y de la relación Carbono – nitrógeno (C / N) ".

Se debe tener la precaución de no cargar el digestor con estiércol de animales enfermos, pues esta situación puede ocasionar una contaminación bacteriana del medio interno del reactor.

En el apéndice 1, se puede apreciar la relación entre la producción de desechos y la de biogás para distintas clases de animales.

4.1.6.2 Concentración de sólidos: Normalmente se admiten concentraciones de hasta un 25 % de sólidos totales (en volumen). Cuando se utiliza estiércol de bovino de proporción de agua y sustrato es 1/1, es decir 1 Kilogramo de estiércol por 1 litro de agua.

4.1.6.3 Agitación de la mezcla: Se recomienda agitar la mezcla para distribuir uniformemente la temperatura en el interior del digestor, también se puede favorecer el contacto directo entre el sustrato y las bacterias.

4.1.6.4 PH en el digestor: El pH es función del porcentaje de CO₂ en el gas, de la concentración de ácidos volátiles y de la propia alcalinidad o acidez de la materia prima. Las bacterias anaeróbicas son altamente sensibles a cambios de pH, su operación correcta se ubica entre 6,5 y 8, teniendo como punto óptimo un pH de 7 unidades. La acidez detiene el proceso de fermentación de la materia orgánica.

4.1.6.5 Relación carbono - nitrógeno: La relación C/N recomendada en el substrato está comprendida entre 9 y 25 (Ver apéndice 2).

4.2 Plantas de biogás.

4.2.1 Generalidades

Una planta de biogás corresponde al reactor de digestión del material orgánico, con sus distintas configuraciones geométricas, los cuales se clasifican en cuatro tipos.

4.2.2 Clasificación de las plantas

4.2.2.1 Tipo Batch: El digestor tipo Batch "Olade Guatemala", trabaja a presión constante, lo que permite el buen funcionamiento de los aparatos que trabajan con el biogás como combustible. Esta condición se logra al utilizar un elemento denominado campana, el cual es un recipiente colocado sobre la boca del digestor (ver figura en apéndice 3).

La campana se fabrica con lámina metálica, en plástico o en fibra de vidrio, preferiblemente se construye en metal por la condición de su propio peso.

La capacidad de la planta la determina el tamaño del digestor, determinado mediante cálculos analíticos. Se compone de 2 elementos importantes: La cúpula metálica o gasómetro y la estructura en concreto armado o cámara de digestión.

Los desechos sólidos de tipo orgánico son depositados en el fondo de la estructura en concreto armado, el gas producido se almacena en la campana, de modo que cuando éste se genera, la campana sube quedando atrapado el gas entre la cúpula y la zona de digestión; un sello de agua inhibe el escape del gas hacia el exterior de la planta. Cuando el gas se consume la campana desciende. La presión del gas está determinada por el peso y el área de dicha cúpula.

Los desechos agrícolas deben ser picados muy bien y agitados con cierta frecuencia, para evitar el bloqueo de la planta.

Ventajas de la planta:

1. Fácil manejo y operación
2. Presión del gas constante e independiente del volumen almacenado
3. Se puede conocer el volumen del gas almacenado a través del nivel de elevación de la campana
4. Facilita la transferencia de calor del medio externo
5. Su construcción es relativamente económica

Desventajas:

- Alto costo de la campana debido a su fabricación y mantenimiento
- La presión oscila entre 0,15 m.c.a (metros de columna de agua) y 0,08 m.c.a, siendo relativamente baja.

4.2.2.2 Modelo Chino: Es uno de los biodigestores más usados en el medio rural por su capacidad de degradar materiales orgánicos, consta de tres partes fundamentales, y son: Tanque de mezclado, digestor y tanque de compensación (ver apéndice 4)

En este tipo de planta, el gas generado es almacenado en un pequeño volumen libre en la parte superior del digestor, pero cuando se ocupa este volumen y continúa generándose biogás, el substrato es desplazado hacia una cámara adyacente denominado tanque de compensación. Cuando el biogás es consumido, el substrato retorna nuevamente al digestor.

Ventajas de la planta:

- No posee parte móvil
- No posee partes metálicas, lo cual implica poco mantenimiento
- Tiene una vida útil larga
- Por ser subterráneo, reduce las pérdidas de calor al exterior

Desventajas:

- Presión variable
- Construcción perfecta para evitar fugas de gas
- Es muy costoso

2.2.2.3 Modelo Xochicalli: Es un biodigestor de tipo horizontal debido a su poca profundidad con respecto al suelo, presenta 3 partes fundamentales: Cámara de carga, cámara de fermentación y cámara de descarga. La cámara de fermentación tiene forma trapezoidal. (Ver apéndice 5)

Existen otros modelos de biodigestores considerados de menor importancia por su efectividad para producir gas metano, entre estos se encuentra: el modelo hindú o Indio, de plástico, entre otros.

4.3 Diseño de una planta de biogás tipo Batch

Se selecciona el digestor tipo Batch por ser un modelo muy utilizado para producir biogás a mediana escala, facilitar la transferencia de calor y por estar ubicado superficialmente, entre otras ventajas anteriormente citadas.

4.3.1 Diseño hidráulico del digestor: "El diseño hidráulico se refiere en su expresión constructiva, a las cotas que el material fermentante alcanzará, en operación plena" (Taylhardat,

1990, Pág. 10). El diseño de una planta de biogás puede realizarse dependiendo de las características específicas de cada situación problema. (Ver más adelante)

4.4 Uso del biogás

4.4.1 Datos energéticos

El biogás arde con una llama de color azul pálido con un poder calorífico que varía entre 4.700 y 6.000 K cal /m³.

Según el ICA (1992), "En términos comparativos, y para una idea mas clara de las características físicas del biogás, se tiene varias relaciones energéticas". Las cuales son:

1 m ³ de biogás =	4,7 kW.
1 m ³ de biogás =	3,6 Kg de leña seca.
1 m ³ de biogás =	1,5 Kg de Carbón
1 m ³ de biogás =	0,46 litros de Gasolina

El biogás no se licua o comprime a temperatura ambiente, solo se puede almacenar en cantidades pequeñas. Esta restricción obliga a consumirlo una vez producido.

De acuerdo a las características del biogás puede usarse en: Cocción de alimentos, iluminación, refrigeración, motores de combustión interna, entre otros.

4.4.2 Principales usos del biogás

4.4.2.1 Cocción de alimentos: Es el uso más frecuente que se le da al biogás. Según investigaciones adelantadas por ICA (1992), " se requiere 400 litros de biogás por persona por día, lo cual significa que una familia de 6 personas requiera 2400 litros de biogás por día para la cocción de sus propios alimentos.

Para usar el biogás en la cocina, se presentan 2 opciones:

- a) Aprovechar la estufa convencional de gas propano
- b) Construir quemadores especiales para biogás

Descripción:

a) Estufa de propano: Es necesario ampliar el diámetro de la boquilla 2 ó 3 veces, porque si se usará la misma boquilla ocurrirán pérdidas de presión tan grande que el biogás no llegará al quemador.

b) Quemadores especiales: Se requieren cuando se usan estufas distintas a las de propano, según la Deutsche Besellschaft Technische Zus Ammenarbeit (1987), citado por ICA, 1992 "propone un modelo en arcilla". El Instituto Centroamericano de Investigaciones y Tecnología Industrial

(1983), citado por ICA, 1992 " propone 2 clases de quemadores: quemador estrella y el quemador campana " .

4.4.2.2 Iluminación: Se puede adaptar lámparas comerciales o fabricadas para este combustible. Tipos de lámparas usadas:

a) Lámparas comerciales: Corresponden a las lámparas coleman de caperuza incandescente, se adaptan con facilidad, aumentándoles el diámetro al cambiarle el inyector tradicional por uno semejante al de las estufas.

b) Lámparas especiales: El Instituto Centro Americano de investigación Tecnológica, en 1983 diseñó una lámpara de bajo costo, usando accesorios de tubería galvanizada.

La luz equivalente a la de 1 bombillo de 100 W puede producirla una lámpara incandescente bien diseñada, con un consumo de (60 - 100) litros / hora y con una presión de biogás de 75 a 100 mm.c.a

4.4.2.3 Motores de combustión interna:

El biogás se puede usar como combustible para motores diesel y de gasolina, con rendimiento aceptable, pero no igual a la eficiencia obtenida con dichos combustibles respectivamente. Para ello es necesario hacer algunas modificaciones o adaptaciones muy sencillas en los motores mencionados.

a) Motor a gasolina (Mech): En este caso se debe reemplazar el carburador por un mezclador tipo venturi, especialmente diseñado para biogás. Esta condición garantiza una eficiencia más o menos similar a la obtenida con gasolina.

b) Motores diesel (Mec): La adaptación consiste en colocar una derivación en el conducto que une el filtro del aire con el múltiple de admisión. En ésta derivación se conecta la entrada del biogás. Solo es posible reemplazar parcialmente el combustible diesel (50 a 85%) por el biogás.

En general " el consumo de biogás en un motor de combustión interna está entre 450 – 550 litros /hora por cada caballo de potencia " (ICA, 1992, Pág. 27)

4.4.2.4 Refrigeración: El biogás se puede usar en aquellos equipos que trabajan en un ciclo de refrigeración por absorción. La adaptación consiste en sustituir el quemador original por uno diseñado para biogás, similar a los utilizados en las estufas. "El consumo de biogás para una nevera de 0,35 m³ (12 pies cúbicos) es de 120 litros / hora " (ICA, 1992, Pág. 27)

5.- FORMULACIÓN DE ECUACIONES PARA EL DISEÑO DE UNA PLANTA DE BIOGÁS

5.1 Planteamiento del problema para diseñar la Planta de Biogás y el sistema de aprovechamiento de la energía solar

Es importante acotar que la planta de biogás se propone principalmente como fuente de suministro energético para abastecer el combustible requerido por la vivienda, al mismo tiempo que contribuye

a reducir desechos sólidos (saneamiento ambiental). Sin embargo se propone cumplir ambas funciones simultáneamente para darle mayor utilidad a la planta en diseño. Partiendo de esta aceptación es indispensable conocer inicialmente cuanto biogás se requiere para alimentar los aparatos, equipos y accesorios de la vivienda. Partiendo de esta definición, el método inicia su procedimiento. A continuación se presenta un ejemplo de la vida real para plantear el problema y formular las ecuaciones que regirán al método numérico y al gráfico (Método Venesol, el cual no será descrito en esta presentación).

Se requiere conocer el consumo de biogás en $\text{m}^3 / \text{día}$, para suministrarle energía en forma de combustible a un conjunto de aparatos, accesorios y equipos; tales como: Lámparas tipo coleman de caperuza incandescente, neveras de 10 a 12 pies³ y cocinas con quemador convencional, para lograr su respectivo funcionamiento.

Conocido el consumo de biogás requerido, es posible determinar la masa de estiércol de ganado bovino exclusivamente, el número de reses y la carga total. Este método sólo incluye al ganado bovino por considerarlo un animal común y presente en grandes cantidades, en cualquier finca del país.

Si se conoce la temperatura externa promedio de la localidad, es posible asumir que es igual a la temperatura interna del reactor en condiciones normales de operación. Mediante la tabla 1, se determina el tiempo de retención que requiere el substrato para ser degradado totalmente. Con estos parámetros determinados se puede calcular el volumen del digestor para el consumo de biogás requerido. Así mismo, conociendo el volumen se puede determinar la geometría del mismo y la superficie para la transferencia del calor.

Aplicando la primera ley de la termodinámica se puede conocer el calor requerido para incrementar la temperatura interna del reactor, partiendo desde la temperatura ambiente. Esta diferencia de temperatura, trae como consecuencia una pérdida de calor hacia el ambiente, según Rojas (2000)

Conocida la cantidad de calor requerida para elevar la temperatura interna del reactor, es necesario diseñar un intercambiador que permita transferir un flujo de calor, mediante agua de la red calentada por colectores térmicos de placa plana. De acuerdo a la situación planteada, es posible lograr el equilibrio térmico, mientras se disponga de luz solar, es decir, en horas diurnas

En relación a las pérdidas de calor por convección a través de las paredes, techo y base del reactor en horas nocturnas, es posible compensarlas y mantener la temperatura interna constante, mediante la utilización de paneles fotovoltaicos ó celdas solares, alimentando a un conjunto de resistencias eléctricas con corriente continua, producto de la conversión solar.

Finalmente, se debe tener una planta de digestión anaeróbica totalmente diseñada con un sistema térmico y eléctrico, que aprovecha la energía solar para producir el biogás requerido, ubicada en cualquier localidad geográfica donde no se disponga del uso de corriente eléctrica de la red.

5.2 Análisis general de la propuesta

Para resolver el problema, se plantea una opción basada en el aprovechamiento de la energía solar: en forma térmica y eléctrica. Mediante un sistema mixto, recomendado por Rojas (2000). El

autor sugiere combinar ambas formas de aprovechamiento de la energía solar, en función de reducir costos de inversión por la instalación del sistema de transferencia de calor.

La alternativa corresponde específicamente a lo siguiente:

Diseño de sistema de aprovechamiento energético, mediante el uso de colectores térmicos de placa plana y la utilización de celdas fotovoltaicas para la conversión de energía solar en energía eléctrica (sistema mixto).

El ciclo térmico consiste en transferir calor mediante un serpentín al interior del reactor para equilibrar la temperatura de la mezcla, utilizando colectores para el calentamiento del agua de tipo placa plana, a una temperatura de diseño. El ciclo fotovoltaico o eléctrico, consiste en compensar las pérdidas de calor en horas nocturnas y diurnas de alta nubosidad.

5.2.1 Ciclo mixto:

5.2.1.1 Generalidades del colector térmico de placa plana (Energía Solar):

El diseño del sistema energético requerido, mediante esta alternativa, se basa en la captación de la energía solar a través de un colector de placa plana, en la cual el fluido caloportador (agua) del colector circulará hasta un intercambiador de calor de tubería de cobre tipo serpentín, ubicado en la base del reactor, transfiriéndose el calor a la mezcla presente en el interior del digestor. Se requiere incrementar la temperatura interna del reactor desde la temperatura ambiente, hasta una temperatura mayor a la anterior, para lograr así disminuir el tiempo de retención del sustrato.

De acuerdo a este planteamiento se puede incrementar el rendimiento del digestor, elevándole la temperatura interna de la cámara de digestión, reduciéndose así el tiempo de retención. Así mismo es posible pasar del nivel psicrófilo al nivel mesófilo ó termófilo. Con esta parte del ciclo mixto se espera lograr el equilibrio termodinámico, suministrando el calor requerido para elevar la temperatura de la mezcla hasta la temperatura de diseño y para vencer las pérdidas de calor al medio exterior; en horas diurnas.

5.2.1.2 Conversión de energía solar a eléctrica mediante la utilización de paneles fotovoltaicos

Se desea conocer cual resistencia es la más útil para la instalación y cuanta de estas son necesarias para mantener constante la temperatura interna del biodigestor. La resistencia debe conectarse a una toma de corriente continua (CC) y una diferencia de potencial de 12 voltios, cuya corriente proviene de un conjunto de paneles solares interconectados entre si. La resistencia va a estar sumergida en una corriente de aire de velocidad despreciable, con temperaturas ambiente promedios superior a 10 °C.

5.3 Formulación de ecuaciones y procedimiento de cálculo

La formulación de ecuaciones consiste en plantear un conjunto de formulas matemáticas que representan el comportamiento físico de la planta de biogás y del sistema de transferencia de calor, mediante el uso de la energía solar.

5.3.1 Ecuaciones para el diseño de la planta de biogás (tipo Batch)

Usando las recomendaciones de la sección 4.4.2, referidas a los principales usos del biogás, se tiene:

Consumo de Biogás para Lámparas Coleman.

$$\text{CBLC} = 70 \text{ l/día} \times \text{Nro. Lámparas.} \quad (1)$$

Consumo de Biogás para Nevera:

$$\text{CBN} = 2800 \text{ l/día} \times \text{Nro. Pies} / 12 \text{ pies} \quad (2)$$

Consumo de Biogás para Cocina:

$$\text{CBC} = 400 \text{ l/persona} \times \text{Nro. Personas} \quad (3)$$

Consumo Total De Biogás Requerido:

$$\text{CTB} = \text{CBLC} + \text{CBN} + \text{CBC} \quad (4)$$

Cantidad de Estiércol Requerido para Ganado Bovino:

$$\text{CER} = \text{Consumo de biogás en litros} / (\text{l de gas} / \text{Kg MSO}) = \text{CTB} / 250$$

$$\text{CER} = \text{CTB} / 250 \text{ (l/ Kg MSO)} \quad (5)$$

Como el MSO (Materia Sólida Orgánica) equivale al 13 % según I.C.A, del estiércol producido por los animales (tomado de apéndice 1), se requiere un total de:

$$\text{E} = \text{Total (Kg MSO)} / (0.13 \times \text{Kg MSO} / \text{Kg estiércol}) = \text{CER} / 0.13 \quad (6)$$

$$\text{E} = (\text{Kg de estiércol})$$

Cálculo del Número de Reses:

(En el caso que se quiera determinar el numero de reses necesaria para obtener la cantidad de estiércol requerida)

La producción diaria de estiércol equivale al 5% del peso vivo del animal.

$$\text{PV} = \text{Kg estiércol} / (0,05 \text{ Kg estiércol} / \text{Kg peso vivo}) = \text{E} / 0,05 \quad (7)$$

Debido a que los animales permanecen acorralados un promedio de 17 horas por día, el peso real requerido es:

$$\text{Peso Vivo} \times 24 \text{ horas} / 17 \text{ horas} = \text{PV} \times 24 / 17 \text{ (Kg de peso vivo real)} \quad (8)$$

$$\text{Número de Reses} = \text{Kg Peso Vivo real} / (400 \text{ Kg} / \text{res}) \quad (9)$$

Cálculo del Volumen del Digestor:

La determinación del volumen del digestor dependerá principalmente de la temperatura externa de la localidad en estudio y de la temperatura interna de diseño. Por su puesto, dichas temperaturas son las que modifican el tiempo de retención.

$$\text{Volumen del Digestor} = \text{Tiempo de retención} \times \text{carga diaria}$$

$$V = Tr \times Cd \quad (10)$$

Donde:

Tr: es una función de la temperatura ambiente o interna del digestor, determinado según tabla 1.

Cd: Carga diaria

$$Cd = (\text{Total Kg estiércol} / \rho \text{ estiércol}) + \text{Total litros de agua} = E / \rho_e + L \quad (11)$$

ρ_e estiércol (densidad del estiércol). Según Mirchi, (1981) $\rho = 1153,48 \text{ Kg/ m}^3$

Según el I.C.A, (1992) "Para lograr la mezcla, se requiere adicionar 1 litro de agua por cada Kg de estiércol"

$$Cd = ((E / 1153,48) + (L / 1000)) \quad (\text{m}^3) \quad (12)$$

Cálculo de la Cámara de Digestión:

$$V = \pi / 4 \times Di^2 \times H \quad (13)$$

Según Rojas (2000) $H = 1/4 \times Di$ Sustituyendo H en ecuación, se tiene:

$$V = \pi / 16 \times Di^3 \text{ donde } Di = (16 \times V / \pi)^{1/3} \quad (14)$$

Si se conoce Di, entonces es posible determinar H, donde:

Di: diámetro interno del reactor.

H: altura de la cámara de digestión.

V: volumen del reactor.

π : constante (PI)

Cálculo del Gasómetro:

Las dimensiones del gasómetro o campana metálica, se consideran fija para todos los volúmenes del reactor. Rojas (2000)

Producción de Biogás = Volumen del reactor (m^3) / tiempo (horas)

$$\text{Producción del biogás} = V / 24 \quad (15)$$

$$\text{Volumen de Almacenamiento (Va)} = ((Fs \times \text{Mayor Consumo}) + \text{Mayor Consumo}) \quad (16)$$

$$\text{Mayor consumo} = \text{Producción de Biogás} - \text{Consumo} \quad (17)$$

Factor de Seguridad (Fs) = 0,22

En general, según Rojas (2000) "se puede estimar un consumo mayor promedio de unos 1246 litros ". Por lo tanto el volumen de almacenamiento será:

$$V_a = (0,22 \times 1246) + 1246 = 1520,12 \text{ litros}$$

Cálculo de la Altura del Cilindro o Gasómetro:

$$V_a = \pi / 4 \times D_c^2 \times h \quad (18) \quad \text{donde:}$$

$$h = 4 V_a / (\pi \times D_c^2) \quad (19) \quad D_c = 1.3\text{m} \text{ valor constante.}$$

Sustituyendo:

$$H = 4 \times 1.52012 \text{ m}^3 / (\pi \times 1.3^2 \text{ m}^2) = 1,145 \text{ m} = 1,15 \text{ m}$$

Donde:

Va: Volumen de almacenamiento.

Dc: Diámetro del Cilindro.

H: Altura del cilindro.

• **Cálculo del Peso del Gasómetro:**

$$\text{- Peso de la tapa} = \frac{\pi D_c^2}{4} \times e \times P_e =$$

P_e (densidad del material) = 7500 Kg / m³ Acero
 e (espesor del material) = 3,5 mm

$$\text{-Peso de la tapa} = 34,84 \text{ Kg}$$

$$\text{- Peso del Cilindro} = \pi \times D_c \times h \times e \times P_e$$

$$\text{Peso del Cilindro} = 123,29 \text{ Kg.}$$

$$\text{- Peso del Gasómetro} = \text{Peso Cilindro} + \text{Peso Tapa}$$

$$\text{Peso del Gasómetro} = 158,13 \text{ Kg}$$

$$\text{- Peso total del gasómetro} = \text{Peso del gasómetro} + \text{Peso soldadura (6\% Peso gasómetro)}$$

$$P.T.G = 167,62 \text{ Kg.}$$

• **Cálculo de la Presión del Sistema:**

$$\text{Presión del sistema} = \frac{\text{Peso (kg)}}{\text{Superficie Tapa (m}^2\text{)}}$$

$$P = \frac{167,62}{\pi \times 1,30^2} \times 4 = 126,28 \text{ Kg /m}^2$$

$$P = 126,28 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} \times \frac{1\text{cm.c.a}}{10\text{Kg/m}^2} = 12,62 \text{ cm c.a}$$

$$P = 12,62 \text{ cm c.a.}$$

Donde:

c.a: columna de agua

Esta presión se supone constante para cualquier volumen de la cámara de digestión seleccionada.

Cálculo de la Masa Total de la Mezcla:

ρ_m (densidad de la mezcla) = masa de la mezcla / Volumen del digestor.

$$\rho_m = m / V \quad (20)$$

$$m = \rho_m \times V \quad (21)$$

Determinación del Área Perimetral, Basal y Techo del Digestor.

$$A_1 = \pi / 4 D_i^2 \quad (m^2) \quad \text{Área del piso.} \quad (22)$$

$$A_2 = \pi \times D_i \times H \quad (m^2) \quad \text{Área de pared.} \quad (23)$$

$$A_3 = A_1 - (\pi / 4 \times D_c^2) \quad (m^2) \quad \text{Área de pared} \quad (24).$$

Donde:

$$A_3 = A_1 - (\pi / 4 \times 1,3^2) = A_1 - 1,3273 \quad (25)$$

5.3.2 Ecuaciones Representativas para la Transferencia de Calor:

Cálculo del Calor Requerido para Incrementar la Temperatura Interna del Digestor Hasta la Temperatura de Funcionamiento o Diseño:

Aplicando la Primera ley de la termodinámica, tenemos:

$$Q - W = \Delta U \quad \text{donde} \quad W = 0 \quad Q = \Delta U$$

$$Q = m \times C (T_i - T_e) = m \times C_p \times \Delta T \quad (MJ) \quad (26)$$

Donde:

C: Calor Específico Promedio

m: Masa (Kg).

T_i: Temperatura interna de diseño del reactor (°C)

T_e: Temperatura externa o ambiental (°C)

Cálculo de las Pérdidas de Calor en el Digestor:

Las pérdidas en el digestor se presentan principalmente en las paredes perimetrales del reactor, techo y base.

a) Pérdida de Calor a través de las paredes:

Las paredes del reactor se componen de la siguiente manera: bloque de 15 cm de espesor, friso interior de 2 cm de espesor, friso exterior de 2 cm de espesor, acabado interior con cemento blanco de 1 cm de espesor.

$$Q_{c1} = U \times A (T_i - T_e) \quad (27) \quad \text{donde:}$$

U: Coeficiente global de transferencia de calor

$$1 / U = 1/h_1 + 1/h_2 + e_1/K_1 + e_2/K_2 + e_3/K_3 + e_4/k_4 \quad (28)$$

h₁: coeficiente de convección interno para mezcla con agua

h₂: coeficiente de convección externo (ver apéndice 6)

k: constante de conductividad térmica para distintos materiales (ver apéndice 7)

h₁ = 9,3692 w / m² °C para aire tranquilo

h₁ = 350 w / m² °C para agua mezclada con estiércol

h₂ = 34,0698 w / m² °C Aire en movimiento moderado

e₁ = 2 cm de capa de friso

e₂ = 15 cm de pared

e₃ = 2 cm de capa de friso

e₄ = 1cm de capa de acabado con cemento blanco.

K₁ = 1,1593 w / m °C (capa de friso con cemento gris)

K₂ = 0,69212 w / m °C (pared)

K₃ = K₁

K₄ = 0,2942 w / m °C (para capa de cemento blanco).

$$1 / U = 1/34,0698 + 0,02/1,1593 + 0,15/0,69212 + 0,02/1,1593 + 0,01/0,29 + 1/ 350$$

Donde:

$$1 / U = 0,317428 \quad \text{por lo tanto:} \quad U = 3,1503 \quad \text{w / m}^2 \text{ °C}$$

$$A = 1 \text{ m}^2 \quad Q_{c1} = 3,1503 \times 1 \times (T_i - 10)$$

$$Q_{c1} / \text{m}^2 = 3,1503 T_i - 31,503 \quad \text{w / m}^2$$

b) Pérdida de Calor por el Techo del Digestor:

Constituido por: Bloque de fachada o ladrillo de 6 cm de espesor, friso interior de 2 cm, acabado interior de cemento blanco de 1 cm, concreto con acabado fino de 5 cm de espesor con malla Trucson de 0,38 pulgadas de diámetro.

$$Q_{c2} = U \times A \times (T_i - T_e) \quad (29)$$

e₁ = 5 cm (espesor del concreto)

e₂ = 6 cm (espesor del ladrillo)

e₃ = 2 cm (espesor de la capa de friso)

e₄ = 1cm (espesor de la capa de cemento blanco)

$$K1 = 1,36694 \text{ w / m } ^\circ\text{C}$$

$$\mathbf{K2 = 1,31503 \text{ w / m } ^\circ\text{C}}$$

$$K3 = 1,1593 \text{ w / m } ^\circ\text{C}$$

$$K4 = 0,2942 \text{ w / m } ^\circ\text{C}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación:

$$U = 6,0366 \text{ w / m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Q_{c2} / \text{m}^2 = 6,0366 \times (T - 10)$$

$$\mathbf{Q_{c2} / \text{m}^2 = 6,0366 \text{ Ti} - 60,366 \text{ w / m}^2}$$

C) Calor Cedido al Exterior por Conducción y Convección a Través del Piso:

Constituido por: Tierra de 100 cm de espesor, concreto con acabado fino de 5 cm de espesor con malla Trucson de 0,38 pulgadas de diámetro.

$$\mathbf{Q_{c3} = U \times A \times (T_i - T_e) \quad (30)}$$

$$e1 = 5 \text{ cm (espesor de la capa de concreto)}$$

$$e2 = 1 \text{ m (espesor del piso de tierra)}$$

$$K1 = 1,3669 \text{ w / m } ^\circ\text{C}$$

$$K2 = 0,34606 \text{ w / m } ^\circ\text{C}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación se tiene:

$$U = 0,3414 \text{ w / m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\mathbf{Q_{c3} = 0,3414 * Ti - 3,4140 \text{ W / m}^2}$$

Cálculo del Calor Requerido Total:

$$\mathbf{Q_{rt} = Q + (\sum Q_{ci} \times A_i) \times 3600 \times t \quad (31)}$$

Donde:

Q: calor requerido para incrementar la temperatura (MJ)

Q_{ci}: calor cedido 1, 2 o 3 (W / m²)

t: Tiempo para alcanzar el equilibrio térmico (horas) = 8 (este número puede modificarse)

Q_{rt}: Calor requerido total (MJ)

Determinación de la longitud del intercambiador de calor, para elevar la temperatura interna de la mezcla, mediante la circulación de agua caliente por termosifón:

Metodología de cálculo para determinar la longitud de la tubería requerida y la temperatura en la superficie de la tubería.

- Suponer T_s
- Hallar propiedades de la mezcla (ρ, β, ν, Pr, C)
- Calcular $Gr = g \times \beta \times (T_s - T_e) \times D^3 / \nu^2$, $Gr \times Pr, a, c$
- Calcular $Nu = c (Gr \times Pr)^a$, $h_e = Nu \times K / D$
- Determinar L donde $Q = \pi \times D \times L \times h_e \times (T_s - T_e)$

$$L = Q_{rt} / (\pi \times D \times h_e \times (T_s - T_e))$$

- Calcular $R_{ce} = 1 / (h_e \times D \times \pi)$, $q = (T_s - T_e) / R_{ce}$

$$T_{si} = T_s + (R_k \times q), R_k = \ln(D_e / D_i) / (2 \times \pi \times K)$$

- Hallar $T = (T_{si} + T_e) / 2$, propiedades del agua a esa temperatura (ρ, C_p)

Calcular $\Delta T_b = Q / (m \times C_p)$, $T_b = T_e - (\Delta T_b / 2)$, hallar propiedades a esa temperatura (ρ, ν, K, Pr, C_p)

- Hallar T_b^* , calcular $R = D \times \nu / v$, $Nu = 0,023 \times Re \times (Pr)$
 $h_i = Nu \times K / D$ (interior de la tubería de cobre), $R_i = 1 / (h_i \times \pi \times D)$
- Hallar $\Sigma R = R_{ce} + R_k + R_{ci}$, $q^* = (T_b^* - T_e) / \Sigma R$, $T_s^* = T_e + q \times R_{ce}$
- Comparar $T_s = T_s^*$ (Fin del problema)
- Entonces $L = L^*$

Nomenclatura:

- a: Constante para determinar Gr
- c: Constante para determinar Gr
- C: Capacidad calorífica
- D_e : Diámetro externo de la tubería
- D_i : Diámetro interno de la tubería
- g: Gravedad
- G: Número de Grassof
- h_i : Coeficiente de convección interno
- h_e : Coeficiente de convección externo
- L: Longitud de la tubería
- \ln : Logaritmo neperiano
- K: Constante de conductividad

Nu: Número de Nusselt
 Pr: Número de Prandalt
 Q: Calor
 q: Calor por unidad de metro
 Qrt: Calor requerido total
 Re: Número de Reynols
 Rce: Resistencia de convección externa
 Rci: resistencia de convección interna
 Rk: Resistencia por conducción en tubos huecos
 R: Sumatoria de resistencias
 Te: temperatura del medio externo
 Te': temperatura de entrada del agua proveniente de los colectores solares
 Ts: temperatura en la superficie del intercambiador de calor del reactor
 Tsi: Temperatura interna del intercambiador de calor.
 T: temperatura promedio del fluido
 Tb: Temperatura promedio interna de la tubería
 ΔT = Salto Térmico
 ρ : Densidad
 β : coeficiente inverso de temperatura para el agua
 ν : Viscosidad cinemática
 n: Número constante

El intercambiador de calor se distribuye en forma de serpentín, teniéndose la siguiente restricción geométrica:

0,7854 m² de área basal del digestor =4,4 m lineal de tubo de cobre. (33)

(La distancia entre espiras es de 15 cm – condición mínima), según Rojas (2000)

5.3.3 Ecuaciones representativas para el diseño del sistema de aprovechamiento de la energía solar:

Cálculo del Número de Colectores de Placa Plana, para Calentamiento de Agua de la Red de Distribución Local; Requerido para Transferir el Calor Q:

Número de Colectores = $[(Q_{rt} \text{ (MJ)} \times 31 \text{ días} \times 7 \text{ veces} / \text{año}) + (Q_{rt} \text{ (MJ)} \times 30 \text{ días} \times 4 \text{ veces} / \text{año}) + (Q_{rt} \text{ (MJ)} \times 28 \text{ días} \times 1 \text{ vez} / \text{año})] / (\Sigma \text{ Energía Solar} \times \text{Área del Colector})$

Número de Colectores = $(Q_{rt} \times 365 \text{ días} / \text{año}) / (\Sigma ES \times A)$ (34)

Donde:

Q: calor requerido Total (MJ)

ΣES : Sumatoria de Energía Aportada por el Sol en MJ por Año

A: Área del Colector en (m²) = 3 Por razones de diseño

Procedimiento de cálculo de la superficie colectora y energía aportada por el sol:

El procedimiento de cálculo que se utiliza es el recomendado por el Centro de Estudios de la Energía Solar, Sevilla España, 1997.

Procedimiento de Cálculo para la Superficie Colectora:

Fila 1: El porcentaje de ocupación es el tanto por ciento de ocupantes que coinciden con la instalación, ó él % de uso de la instalación.

Fila 2: Corresponde al consumo mensual de la instalación en m³.

Fila 3: Dato correspondiente a la temperatura del agua de la red. Tomado de las estación meteorológica más cercana.

Fila 4: Diferencia entre la temperatura de uso y la red de distribución de agua local.

Fila 5: Se calcula $Q = m \times C_e \times \Delta t^{\circ}$. Donde m es el valor de agua calentada, C_e es el calor específico del agua y Δt corresponde al salto térmico (fila 4).

Fila 6: Se realiza la conversión de térmias a mega julios (MJ), donde: 1 termia = 4,18 MJ

Fila 7: Se divide la fila 6 por el número de días de cada mes.

Fila 8: Dato de radiación solar tomado de la estación meteorológica mas cercana.

Fila 9: Se multiplica la energía H por un factor de corrección igual a 1, dependiendo del tipo de atmósfera.

Fila 10: Valor que se obtiene de tabla del coeficiente de corrección por inclinación para una latitud de 8,6 y una inclinación de 18,6.

Fila 11: $E = 0,94 \times K \times H$.

Fila 12: Cantidad de horas sol. Dato tomado de tablas de Censolar.

Fila 13: Se obtiene dividiendo la fila 11 entre la 12 pero habiendo pasado previamente E a Julios y el número de horas a segundo S.

Fila 14: Temperatura ambiente durante las horas de sol.

Fila 15: Parte de la ecuación del rendimiento del colector $= 100 \times 6,65 \times (T^{\circ} - T_a^{\circ}) / I$

Fila 16: Rendimiento real del colector, calculado del rendimiento teórico.
 $R = 81 - (665 (T^{\circ} - t_a^{\circ}) / I)$

Fila 17: Corresponde a la energía que aporta un m² de colector (multiplicar fila 11 y 16, esta última previamente dividida entre 100).

Fila 18: Producto de la fila 17 X 0,85 a fin de incluir pérdidas por acumulación.

Fila 19: Producto de la fila 18 por el número de días del mes. Llegados a este punto se puede calcular la superficie colectora necesaria, dividiendo la suma de la fila 6 entre la suma de la fila 19.

Fila 20: Se obtiene multiplicando el número de metros reales de superficie colectora por la energía neta disponible para el consumo que suministra cada m^2 .

Fila 21: Cociente porcentual entre la fila 20 y la 6.

Fila 22: Diferencia entre la fila 6 y la 20. Esta representa la energía auxiliar que hay que aportar en los meses de déficit energético solar.

- **Cálculo del número de celdas solares o paneles fotovoltaicos, para compensar las pérdidas de calor en el interior del digestor:**

Según la metodología propuesta por Censolar, se tiene.

$$E_t = Q_{ct} (w) \times 13 (h / \text{día}) \quad (35)$$

$$HSP = 0.2778 \times H \times K \times 1.05 (h / \text{día}) \quad (36)$$

$$R = 1 - ((1 - K_b - K_c - K_v) K_a \times N / P_d) - K_b - K_v - K_c \quad (37)$$

$$C_u = E \times N (w.h) \quad (38)$$

$$E = E_t / R (w.h / \text{día}) \quad (39)$$

$$C = C_u / P_d (w.h) \quad (40)$$

$$E_p = E / 0,9 (w.h / \text{día}) \quad (41)$$

$$\text{Nro. Paneles Fotovoltaicos} = E_p / (1 \times P \times HSP) \quad (42)$$

Potencia Instalada = Nro Paneles x Potencia de la Celda.

Por criterio de diseño, el panel solar recomendado es el modelo Siemens de 46 vatios (SM – 46). Con unas dimensiones de 1,083 x 0,329 m.

- **Cálculo del número de baterías para almacenar la corriente eléctrica:**

Se recomienda utilizar una batería tipo Storage Trojan T- 105 de 12 Voltios y 220 Ah Por su funcionamiento y disponibilidad de compra en el mercado.

$$\text{Nro Baterías} = C / Ah = C / 220 Ah$$

Donde:

E_t : Energía eléctrica requerida por la instalación (W.h / día)

Q_{ct} : Calor cedido total (w)

HSP: Hora solar pico (h / día)

R: factor acumulado por perdidas eléctricas

H: Energía media por día (MJ / m^2 día) para el mes más desfavorable en el año.

K: Factor de Corrección para el mes desfavorable, según la latitud geográfica. Ver anexo
N: Número de días de autonomía de la batería = 10días
E: Energía necesaria
Cu: Capacidad útil de la batería
C: capacidad nominal de la batería
Ep: potencia que deben producir los paneles.
Kb: Coeficientes de perdidas = 5 % / día
Kc: Factor de perdida por corriente alterna =20 % / día
Kv: Factor de perdida = 10 %
Ka: Factor de auto descarga = 0.5 %
Pd: Profundidad de descarga batería plomo – antimonio = 80 %

6.- ESTUDIO ECONÓMICO DE LA PROPUESTA

6.1 Generalidades

El estudio económico tiene por finalidad hacer uso de la ingeniería económica para evaluar proyectos de inversión en términos de economía concreta y financiera.

Mediante una evaluación económica a un conjunto de alternativas independientes o dependiente, es posible determinar cuál de estas, reproduce mejor el capital invertido y que equivalencia representa en el año cero (0). Adicionalmente nos puede aportar información correspondiente al costo anual de las propuestas en estudio.

6.2 Método de evaluación

El método de evaluación consiste en la aplicación de un indicador económico que aportará información acerca de la equivalencia de una propuesta en periodos de tiempo distintos. Principalmente se utilizará un indicador conocido como Costo Anual, que representa los flujos de caja uniforme a lo largo de la vida útil del proyecto. Así mismo se presentan tres opciones metodológicas numéricas para calcular el Costo anual (CA), tales como: Costo Anual por fondo de amortización, costo anual por valor de salvamento y finalmente se tiene el costo anual por recuperación de capital.

6.3 Cálculo de la inversión (P)

Para calcular la inversión se propone una ecuación que involucre los costos del digestor, sistema de aprovechamiento energético, mano de obra, materiales y otros gastos indirectos.

Dicha función, se construye consultando precios en el mercado local correspondiente a la ciudad o localidad de aplicación del proyecto.

Se pretende con esta metodología numérica, calcular rápidamente y para cualquier entorno geográfico, el costo respectivo de la propuesta o conjunto de estas, a su inversión. Sin embargo, para otras regiones es importante revisar los costos de los elementos, de acuerdo a su mercado local (Preferiblemente).

$P = (\text{costo total de los colectores térmico}) + (\text{costo total de la tubería}) + (\text{Costo total de los paneles fotovoltaicos}) + (\text{costo del cuarto de control}) + (\text{costo del sistema de regulación térmica y eléctrica}) + (\text{costo total del cableado eléctrico}) + (\text{Costo total de las resistencias eléctricas}) + (\text{costo total del sistema de soporte de los colectores térmicos}) + (\text{costo total del sistema de aislamiento térmico}) + (\text{costo total del sistema de protección metálica o cercado}) + (\text{costo de accesorios}) + (\text{costo del digestor sin incluir la campana metálica}) + (\text{costo de la campana metálica del digestor}) + (\text{costo de instalación de colectores térmicos y eléctricos}) + (\text{costo de instalación del intercambiador de calor}) + (\text{costo de reacondicionamiento del terreno}) + (\text{costo de tramites y permisos}) + (\text{otros costos})$

6.4 Costo Operativo Anual (A)

El costo operativo incluye todos los gastos asociados al funcionamiento del proyecto, durante su vida útil, tales como: mantenibilidad del sistema en general, mano de obra indirecta, más otros gastos imprevistos.

Así mismo, se propone una ecuación para calcular el costo operativo anual.

$A = (\text{Costo anual del mantenimiento preventivo de la instalación solar térmica y eléctrica}) + (\text{costo anual del mantenimiento correctivo}) + (\text{costo anual de mantenimiento al Digestor}) + (\text{otros costos anuales})$

6.5 Cálculo del Costo Anual Uniforme (CAUE)

Por recuperación de capital:

$$CA = CAUE = (P - V_s) \times (A/P, i, n) + (V_s \times i) + A$$

$$A/P, i, n = P \times (i \times (i + 1)) / ((1+i)^n - 1) \quad \text{Factor de recuperación de capital}$$

$P =$ Inversión calculada anteriormente (Bs, \$ USA, Moneda local)

$A =$ Costo operativo anual (Bs, \$ USA, Moneda local)

$i =$ tasa de interés nominal promedio = 20% (Venezuela)

$n =$ Vida útil del proyecto = 20 años

Valor de salvamento = 20% x P

Sustituyendo:

$$V_s = 0,20 \times P$$

$i =$ Constante.

$$CA = (0,80 P \times 0,205356) + (0,04 \times P) + A = (0,204285224 \times P) + A$$

Se asume una tasa de interés promedio de 20%, como una tasa conservadora, ante la incertidumbre de la variación de la misma. Sin embargo el diseñador puede colocar la tasa exacta del mercado para el momento de cuantificar la reproducción del capital. El hecho de asumir una tasa de interés constante de 20 %, es por la finalidad de simplificar cálculos y presentar una expresión matemática más sencilla.

6.6 Recuperación del Capital (costo oportunidad del gas)

P gas = 2,02 g / l según ICAITI

Una (1) bombona de gas comercial de 18 Kg de propano y 43 litros de capacidad. Cuesta en el mercado venezolano, según VENGAS C.A, para el 12 de marzo de 2007, la cantidad de 6700,00 Bs (3, 11 \$ USA).

Para cuantificar el costo del gas generado por la bombona de uso comercial citado anteriormente y así comparar el costo que representa el gas producido por la planta de biogás, tenemos:

$$P_g = 2,02 \text{ gramos / litros} \quad V = m / \rho = 18 \text{ Kg} / (2,02 \text{ g / l})$$

$$V = 18000 \text{ g} / (2,02 \text{ g/l}) = 8910,89 \text{ litros} = 8,91 \text{ m}^3 \text{ de gas}$$

$$\text{Costo del gas comercial} = \text{Precio en Bs} / \text{Volumen} = 6700 \text{ Bs} / 8,91 \text{ m}^3$$

$$\text{Costo del gas comercial} = 751,96 \text{ Bs} / \text{m}^3 = \text{CGC} \quad \text{ó}$$

$$\text{Costo de gas comercial} = 0,3498 \text{ \$ USA} / \text{m}^3 = \text{CGC}$$

$$\text{Duración aproximada del gas (bombona residencial)} = 8,91 \text{ m}^3 / 14 \text{ días} = 0,6364 \text{ m}^3 / \text{día}$$

Para determinar la rentabilidad del proyecto, es necesario considerar al biogás como; el producto principal obtenido de la planta de digestión anaeróbica. Como producto secundario consideramos al substrato residual, desecho sólido remanente con amplias propiedades de abono orgánico.

Como ejemplo, para el año 1997, según Taylhardat Leonardo, el bioabono tenía un precio de "4000 Bs / ton (5 \$ USA/ton)". Actualmente su precio de venta oscila entre uno 15000 Bs / ton y 25000 Bs / ton (6,98 \$ USA/ ton – 11,62 \$ USA). Por su puesto estos precios no incluyen la colocación del producto en la localidad requerida. Este costo indirecto, hace encarecer el precio total y final del abono orgánico, aproximadamente en un 30 % sobre el costo en la puerta de la planta.

6.6.1 Determinación de los ingresos del proyecto:

6.6.1.1 Producción de gas:

$$\text{Producción de gas} = \text{Consumo en m}^3 / \text{día} \times \text{tr (días)} \times \text{K (ciclos)}$$

$$PG = C \times \text{tr} \times K \quad (\text{m}^3 / \text{día})$$

$$\text{Costo de Producción de biogás} = \text{CAUE} / PG$$

$$\text{Ingreso por venta aparente del gas} = \text{CGC} \times PG$$

$$\text{IVG} = \text{CGC} \times PG$$

6.6.1.2 Ingresos por venta del substrato o bioabono:

$$\text{Ingreso por venta del substrato} = \text{masa residual} \times \text{Costo promedio}$$

$$\text{IVS} = \text{mr (ton)} \times \text{precio (moneda local/ton)}$$

6.6.1.3 Ingreso total del proyecto:

$$\text{Ingreso} = \text{IVG} + \text{IVS} \quad (\text{Moneda local} / \text{año})$$

6.6.2 Cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR)

La tasa interna de retorno es un indicador de evaluación económica, que representa la tasa de desempeño o rendimiento con que reproduce capital del proyecto; recuperando la inversión más ganancia aportada.

Condiciones:

$\text{TIR} > \text{TMAR}$ (tasa mínima atractiva de rendimiento): se reproduce capital recuperándose la inversión y aportando ganancias. Aconsejándose seleccionar la alternativa con este indicador característico.

$\text{TIR} < \text{TMAR}$: El proyecto no es atractivo y se tiene alta incertidumbre para reproducir capital, recomendándose para este caso, no invertir en una alternativa con este indicador característico.

$\text{TMAR} = \text{interés nominal} + \text{riesgo} + \text{expectativas}$.

Riesgo = 5% (depende del país)

Expectativas = 5%

$i = 20\%$ (depende del país)

$\text{TMAR} = 30\%$

TIR Por recuperación de capital:

$$\text{Ingreso neto} = P - V_s (A/P, i, n) + V_s \times i = I - A$$

$$i = \text{TIR}$$

6.6.3 Periodo de Recuperación de Capital

El periodo de recuperación de capital, es aquella unidad de tiempo, donde los ingresos netos acumulados son iguales a la inversión, de acuerdo a la tasa de desempeño del proyecto.

$$P = \sum A_i / (1 + P_k) \quad \text{donde:}$$

$$P_k = \text{TIR}$$

$A_i = \text{Flujos de caja}$

7.- MANTENIBILIDAD DEL SISTEMA

7.1 Generalidades

La mantenibilidad es un conjunto global de estrategias de actividades de mantenimiento en sus distintas modalidades, requeridas por el sistema en general. Que busca mantener principalmente la capacidad de producción de biogás máxima, igual o muy cercana a la capacidad de diseño. Esta estrategia se basa fundamentalmente en un mantenimiento preventivo.

7.2 Mantenimiento del sistema térmico de placa plana

Un mantenimiento adecuado es tan importante como un montaje correcto para la duración de una instalación solar y para obtener un adecuado servicio. Sin embargo, en una instalación bien diseñada son pocos los aspectos que tienen una influencia vital en las actuaciones o la vida del sistema. Por el contrario, las instalaciones mal diseñada o mal instaladas, o con componentes defectuosos, serán una fuente continua de problemas.

La correcta actuación de una instalación bien diseñada, depende fundamentalmente de que esté bien llena de agua. Si la instalación está en un lugar frío, con posibles heladas, es recomendable usar y vigilar cuidadosamente el estado del anticongelante. Otro aspecto es la duración del sistema y la previsión anticipada de averías a largo plazo, que un mantenimiento preventivo y sobre todo una inspección visual periódica pueden aumentar y evitar, según sea el caso.

Por estas razones, el mantenimiento del sistema se puede dividir en dos niveles:

- Mantenimiento u operaciones a realizar por el usuario
- Mantenimiento a realizar anualmente por el instalador

Finalmente y a modo de tercer nivel, podrían comentarse determinadas operaciones de mantenimiento o control, que un usuario interesado podría hacer con beneficio para la instalación.

El problema de la corrosión es atendido con especial atención y cuidado para mantener la vida útil de la instalación.

Mantenimiento u operaciones a realizar por el usuario:

El usuario debe, imprescindiblemente realizar una operación de control y mantenimiento periódico.

a) Comprobar periódicamente la presión del circuito, indicada por un manómetro situado en la parte baja del circuito. (Si se usa bomba centrífuga)

Mantenimiento a realizar por personal especializado:

a) Operaciones Imprescindibles de Mantenimiento.

a.1) Control anual del anticongelante: Este mantenimiento implica las operaciones de control de la proporción de anticongelante residual en el sistema y la sustitución en el caso de ser necesario. El control de la proporción de anticongelante puede efectuarse por dos procedimientos:

- Control de la densidad.

El sistema se basa en medir la densidad de una muestra de anticongelante. Se debe comprobar que no exista una variación superior al 20%, respecto a la medida tomada con una muestra de la mezcla anticongelante en las proporciones correctas.

- Control visual.

Se basa en la comparación entre el color de la mezcla correcta de anticongelantes y agua y el color de la mezcla tomada en el momento en que se desea controlar el estado del anticongelante. Lógicamente el procedimiento se confía en la apreciación del observador y está sujeto a mayores errores.

a.2) Comprobación de la presión y el llenado del circuito: La operación, ya descrita, se realizará al término del llenado con anticongelante, o como una operación independiente y de gran importancia en los sistemas sin anticongelantes.

b. Inspecciones visuales y comprobaciones: El mantenimiento preventivo debe incluir los siguientes aspectos:

b.1) Comprobación del aislamiento; especialmente de las tuberías y accesorios situados a la intemperie.

Debe repararse cualquier rotura de aislamiento o su protección que deje al descubierto la tubería o permita la entrada de agua de lluvia. La pintura protectora de los aislamientos, tipo espuma de foan, debe cubrir correctamente el material.

b.2) Inspección visual detallada de los colectores, siendo especialmente importantes los siguientes aspectos:

Comprobación de la estanquidad del colector de agua de lluvia. La presencia de agua de lluvia debe ser controlada y evitada, ya que constituye el mayor peligro para la vida útil del colector.

Rotura de la junta del cristal del colector.

Juntas de las salidas de las conexiones del colector y el cofre en mal estado.

Deformación del aislamiento interior: Normalmente implica la entrada de agua en el colector.

b.3) Se efectuará sobre todas las válvulas manuales, de corte, llenado y vaciado comprobando su funcionamiento.

b.4) Se comprobarán los filtros de la instalación.

Operaciones de limpieza o mantenimiento no regulares.

Determinados aspectos, como el polvo o suciedad sobre el colector, pueden tener una importancia relativa según el lugar. En el caso de la suciedad no debe afectar al rendimiento en más de un 5%, y basta con las lluvias para reducir su efecto, pero puede ser aconsejable su limpieza periódica.

Como lista de operaciones de este tipo, puede incluirse la proporcionada por la norma práctica Australiana para agua caliente solar AS - 2002 - 1979:

El propietario se asegurará que el colector este siempre correctamente lleno de agua.

Cubrir el colector en periodos, de no-funcionamiento, con el fin de minimizar la corrosión y la formación de sales en los tubos del absorbedor.

La cubierta transparente debe lavarse cada 3 meses para liberar la acumulación de polvo.

Las sombras producidas por arbustos y árboles deberán ser comprobadas anualmente, y si fuese preciso se recomienda una acción correcta (podar el árbol o arbusto)

Es aconseja una inspección ocular del absorbedor. En el caso de avería se debe acordar con el instalador su reparación o total sustitución

Asegurar los colectores contra daños y contra ciclones o heladas.

Limpiar el intercambiador de calor anualmente para reducir la acumulación de una capa de polvo.

C. La corrosión y su prevención.

En cualquier instalación, y en particular en una energía solar, la corrosión puede, si no se toman precauciones, suponer un grave problema acortando la vida de la misma, conduciendo a pérdidas de eficiencia y causando averías que promulguen su inutilización.

Existen tres tipos de corrosión: mecánica, química y electrolítica. Un cuarto tipo, la corrosión biológica, puede considerarse en realidad como un caso particular de la química.

En los sistemas solares la corrosión puede presentarse en forma particular o combinada.

Corrosión Mecánica: Es el desgaste por abrasión o rozamiento prolongado de las superficies en contacto con la corriente fluida debido a las partículas sólidas que pueden arrastrar ésta, las cuales pueden ser incluso restos metálicos de las propias superficies. Para evitarla, además de usar filtros y líquidos lo más limpios posible, se debe proceder periódicamente a una limpieza de la instalación, mediante agua a presión.

Corrosión Química: Es la que se produce al reaccionar los componentes disueltos en el fluido transportado, o el propio fluido, con los recipientes y tuberías que lo contienen. Este tipo de corrosión puede evitarse, eligiendo materiales compatibles con los fluidos que se utilicen, o bien recubrir las partes en contacto con éstos mediante alguna pintura o barniz especial.

La oxidación es el caso particular más frecuente de corrosión química. En algunas ocasiones, si la película de óxido formado en la superficie del metal resulta impermeable, actúa ella misma de capa protectora, impidiendo que la corrosión penetre hacia zonas más profundas.

Corrosión Biológica: Es causada por la actuación de bacterias, hongos o microorganismos, que dan lugar a la formación de moléculas que se combinan con los metales y por lo tanto, producen una descomposición de los materiales metálicos.

En cuanto a su disposición o forma de actuar en el material corroído, la corrosión puede ser puntual o localizada, causada por diferencias de descomposición en las distintas partes de las piezas, recocido por soldadura, etc.

En las instalaciones solares de circuito cerrado (diseño propuesto) diseñadas y realizadas correctamente no deben presentarse problemas de corrosión. No obstante, se producen diferencias de presión entre los periodos de calentamiento y enfriamiento que pueden ser causa de corrosión.

7.3 Mantenimiento del sistema eléctrico solar

7.3.1 Generalidades

El planteamiento del servicio de mantenimiento de las instalaciones. Debe considerar los siguientes puntos:

Las operaciones necesarias de mantenimiento

Las operaciones a realizar por el usuario y las que debe realizar el instalador.

La periodicidad de las operaciones de mantenimiento.

El contrato de mantenimiento y la garantía de la instalación.

En esta dirección conviene hacer algunas puntualizaciones de carácter general.

Las operaciones de mantenimiento: Pueden ser de dos tipos. Por un lado, tenemos la revisión del estado de operatividad de los equipos, conexiones y cableado, incluyendo aspectos mecánicos, eléctricos y de limpieza, y por otro, el control de la calibración de los equipos, particularmente del sistema de regulación y control.

El mantenimiento de las instalaciones fotovoltaicas, sin partes móviles, no es especialmente conflictivo. Los acumuladores, como consecuencia de la degradación debida a los procesos químicos internos, son los elementos de la instalación que requieren mayor atención. Por otro lado, su elevado costo de inversión obliga a un mantenimiento preventivo que evite la posibilidad del fallo total del acumulador.

Las instalaciones fotovoltaicas están situadas frecuentemente en lugares apartados al digester y tienen presupuestos muy ajustados, por lo que los costos de reparación de averías, durante el periodo de garantía, pueden tener una importante repercusión económica. Considerando que la posibilidad de la instalación, este es, la posibilidad de averías, está directamente asociada con la calidad de los materiales, equipos y procesos de montaje, la primera norma es usar, en todo caso, componente de la calidad específica en el diseño del sistema en general y aplicar estrictamente las normas y controles de montaje.

Debe procurarse que el usuario tenga un suficiente conocimiento de la instalación, de forma que distinga perfectamente que incidencias del funcionamiento corresponden a situaciones normales.

Conviene distinguir con claridad entre el contrato de mantenimiento y la garantía. El primero debe establecerse desde el principio junto con la garantía, ya que ésta debe incluir únicamente la reposición de los equipos averiados durante el periodo de vigencia de la misma, pero no las operaciones usuales de mantenimiento que deben correr a largo del usuario.

Debe preocuparse que el tiempo entre dos visitas de mantenimiento preventivo sea, por razones económicas, lo más dilatado posible, coordinando los tiempos para cada componente.

Indudablemente, en las instalaciones fotovoltaicas los tiempos entre mantenimiento los marcan los acumuladores, que constituyen el componente que con gran diferencia, requiere más atención.

7.3.2 Mantenimiento del Panel Solar

El mantenimiento abarca los siguientes procesos:

Limpieza periódica del panel

Inspección visual de posibles degradaciones internas y de la estanquidad del panel.

Control del estado de las conexiones eléctricas y el cableado.

Control de las características eléctricas del panel.

a) Limpieza periódica del panel.

La suciedad acumulada sobre la cubierta transparente del panel reduce el rendimiento del mismo y puede producir efectos de inversión similares a los producidos por las sombras. El problema puede llegar a ser serio en el caso de residuos orgánicos de aves. Las capas de polvo que reducen la intensidad del sol de forma uniforme no son peligrosas y la reducción de la potencia no suele ser significativa. La periodicidad del proceso de limpieza depende, lógicamente de la intensidad del proceso de ensuciamiento. En el caso de los depósitos procedentes de las aves conviene evitarlos instalando pequeñas antenas elásticas en la parte alta del panel, que impida a estas que se posen.

La operación de limpieza debe ser realizada en general por el propio usuario y consiste simplemente en el lavado de los paneles con agua y algún detergente no abrasivo, procurando evitar que el agua no se acumule sobre el panel.

b) Inspección visual del panel.

La inspección visual tiene por objeto detectar posibles fallos, concretamente:

Posible rotura del cristal

Oxidaciones de los circuitos y soldaduras de las células fotovoltaicas.

c) Control de conexiones eléctricas y el cableado de los paneles:

Se debe proceder en cada visita de mantenimiento, a efectuar las siguientes operaciones:

Comprobación del apriete y estado de los terminales de los cables de conexionado de los paneles.

Comprobación de la estanquidad de la caja de terminales o del estado de los capuchones de protección de los terminales.

d) Mantenimiento del sistema de regulación y control.

No defiere especialmente de las operaciones normales en equipos electrónicos. Las averías son poco frecuentes y la simplicidad de los equipos reduce el mantenimiento a las siguientes operaciones:

Observación visual general del estado y funcionamiento del regulador.

Comprobación del conexionado y cableado de los componentes.

Comprobación del tarado de la tensión de ajuste del regulador a la temperatura ambiente.

Registro de los amperios - hora generados y consumidos en la instalación entre revisiones, cuando existen estos contadores

Observación de las medidas instantáneas del voltímetro y amperímetro en las instalaciones que disponen de estos medidores.

7.3.3 Mantenimiento de los acumuladores

Actualmente el control de calidad en la fabricación de acumuladores es muy alto y, consecuentemente, son muy fiables, dándose un porcentaje muy bajo de averías debidas a defectos de fabricación. Sin embargo por su modo de trabajar, los acumuladores son los elementos que requieren mayor atención en una instalación fotovoltaica. Los acumuladores perecen por dos causas:

Uso de la instalación superior al previsto en el diseño. Esta situación conduce a descargas profundas y continuadas de la batería, que causan la destrucción anticipada

Falta de reposición periódica del electrolito en los acumuladores de plomo - antimonio. Si el nivel es bajo y las placas quedan al descubierto, se sulfatan y se destruyen en corto plazo.

Las situaciones anteriores determinan las necesidades de mantenimiento. En concreto las operaciones usuales son:

Comprobación del nivel del electrolito y sustitución en su caso

Comprobación y limpieza del estado de los bornes del acumulador

Comprobación de la tensión sin carga de los elementos del acumulador

Medida de la densidad del electrolito

Comprobación de la utilización del acumulador y en partículas la frecuencia de corte por baja tensión.

7.4 Mantenimiento del digestor

Esta actividad corresponde principalmente en prevenir la corrosión del gasómetro. Para tal caso, es conveniente a la hora de su instalación adicionar una sustancia química conocida como Sigatoga, al

agua que actúa como sello de la campana para prevenir fugas del biogás al medio exterior. Adicionalmente, cada año es conveniente desmontar el gasómetro para revisar las paredes y uniones del mismo, detectando mediante observación visual el tipo de corrosión y su respectivo avance. Así mismo, es recomendable practicar un tratamiento anticorrosivo.

7.5 Mantenimiento del intercambiador de calor del digestor

Este mantenimiento está orientado a preservar el estado operativo de los intercambiadores de calor del sistema. Así mismo, se divide en dos etapas, tales como:

7.5.1 Mantenimiento del serpentín:

Este serpentín corresponde a la tubería de cobre que transfiere calor al interior del reactor. Es aconsejable cada tres (3) ciclos de trabajo del digestor, realizar una parada del sistema para revisar el estado superficial de la tubería, muy probablemente se encontrará una superficie atascada totalmente con restos de estiércol degradado, con bastante adherencia sobre la misma.

La actividad preventiva consiste en limpiar con un cepillo de cerdas moderadamente rígidas, la superficie de la tubería para desprender los restos de desecho orgánico adheridos.

Mediante esta estrategia, es posible mantener el nivel de transferencia de calor requerido por el sistema.

7.5.2 Mantenimiento de las resistencias eléctricas:

Recordemos que las resistencias eléctricas operarán en horas nocturnas, para reducir las pérdidas de calor que se fugan al medio exterior. La actividad de mantenimiento consiste en revisar periódicamente, cada 3 ó 4 meses, el estado del alambre conductor, observando principalmente si uno de estos se encuentra roto, o desconectado de la fuente. En caso de rotura debe sustituirse inmediatamente.

8.- BIBLIOGRAFÍA

AVILA, MANUEL, Recopilación de Tablas de Transferencia de Calor, 1995

CENSOLAR, Sistema de Aprovechamiento Térmico I, Sevilla - España, 1.997

CENSOLAR, Sistema de Conversión Eléctrica, Sevilla- España, 1997

CENSOLAR, Física General, Sevilla España, diciembre de 1997.

CENSOLAR, Sistema de Aprovechamiento Térmico II, Sevilla España, 1.997

DE JUANA, JOSÉ. Energías Renovables para el Desarrollo. España, 2003.

INCROPERA, FRANK, Principios de la Transferencia de Calor, USA, 1996

INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO (I.C.A), El Biogás, Boletín Didáctico N° 32
Octubre 1992.

INSTITUTO CENTROAMERICANO DE INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA INDUSTRIAL (ICAITI)
Biogás y Bioabono, aplicaciones. Guatemala, 1983.

LAVADO, JOSE, Diseño de un Biodigestor Xochicalli, Facultad de Ingeniería ULA, 1998.

MORENO, LUIS, Estudio y Diseño de un Biodigestor para Obtener Gas Metano
Facultad de Ingeniería ULA, 1987.

ROJAS, JUAN, Diseño de un Sistema de Aprovechamiento de la Energía Solar, UNA, Mérida,
2000.

TARQUIN, ANTHONY, Ingeniería Económica, 1998.

TAYLHARDAT, LEONARDO, Diseño Hidráulico del Digestor. Facultad de Agronomía U.C.V (FAGRO), 1992.

TAYLHARDAT, LEONARDO Y ROMERO, JESÚS, Uso del Biogás. FAGRO - U.C.V, 1993.

TAYLHARDAT, LEONARDO, Tecnología e Ingeniería del Proceso Anaeróbico, FAGRO UCV, 1991

VENEZOLANA DE GASES (VENGAS). Factura de Gas Comercial. Mérida, 2001.

WOLFGANG, PALZ, Electricidad Solar, 1978

APÉNDICES

Apéndice 1: Producción de desechos y de biogás

Clase de animales	Producción diaria de estiércol (% P.V)	(% MST)	(% MSO)	Producción de biogás (litros /kg MSO)
Bovino	5	15 – 16	13	250
Porcino	2	16	12	350
Caprino	3	30	20	200
Equino	5	25	15	280
Aves	15	25	17	400
Humanos	1	20	15	300

Fuente: Difusión de la Tecnología del Biogás en Colombia, CVC – GTZ, citado por ICA, 1992

P.V: Porcentaje de peso vivo

MST: Masa de sólidos totales

MSO: Masa de sólidos orgánicos

Apéndice 2: Relación Carbono – Nitrógeno

Substrato	C/N
Estiércol de res	16 – 2
Estiércol de cerdo	15 – 2
Estiércol de gallina	6 – 7
Estiércol de caballo	25
Tallos de trigo	128
Aserrín	200 – 500
Desechos de maíz	53

Fuente: ICAITI, 1983

Apéndice 3: Digestor tipo Batch



SEMINARIO INTERNACIONAL SOBRE EL USO DE ENERGÍAS RENOVABLES
ECUADOR, CUENCA 2007

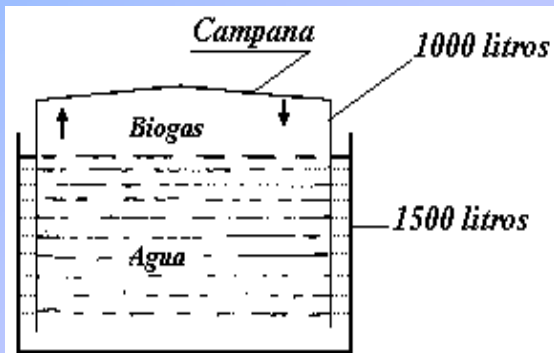
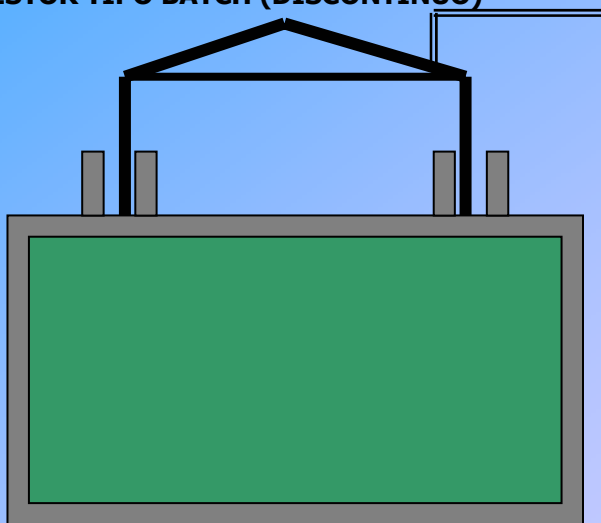
ENERGÍA DE LA BIOMASA

BIOGÁS:

Plantas de biogás.

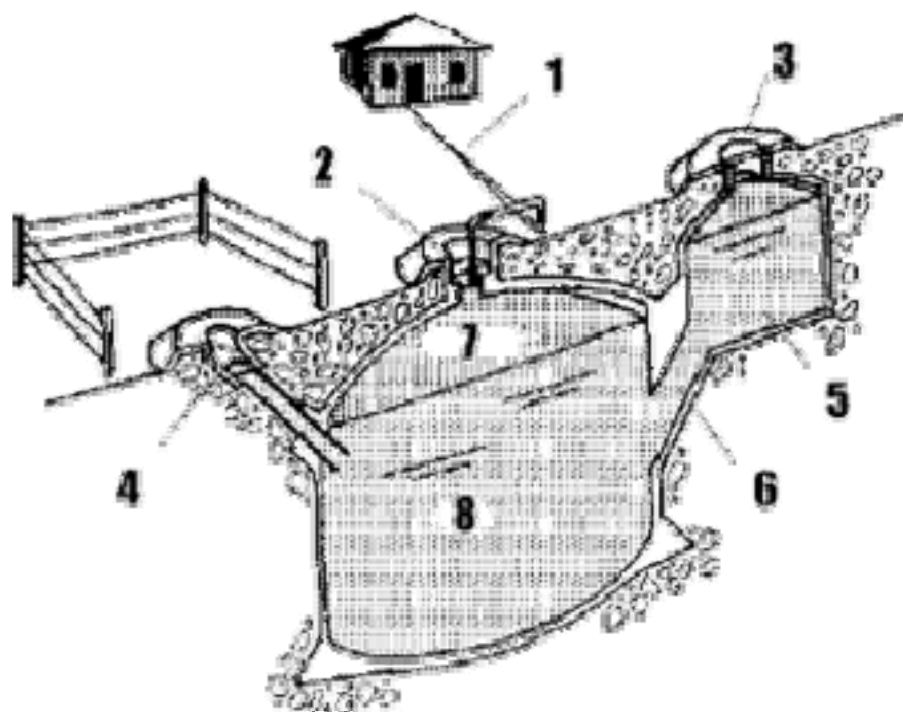
Una planta de biogás corresponde al reactor de digestión del material orgánico, con sus distintas configuraciones geométricas..

DIGESTOR TIPO BATCH (DISCONTINUO)

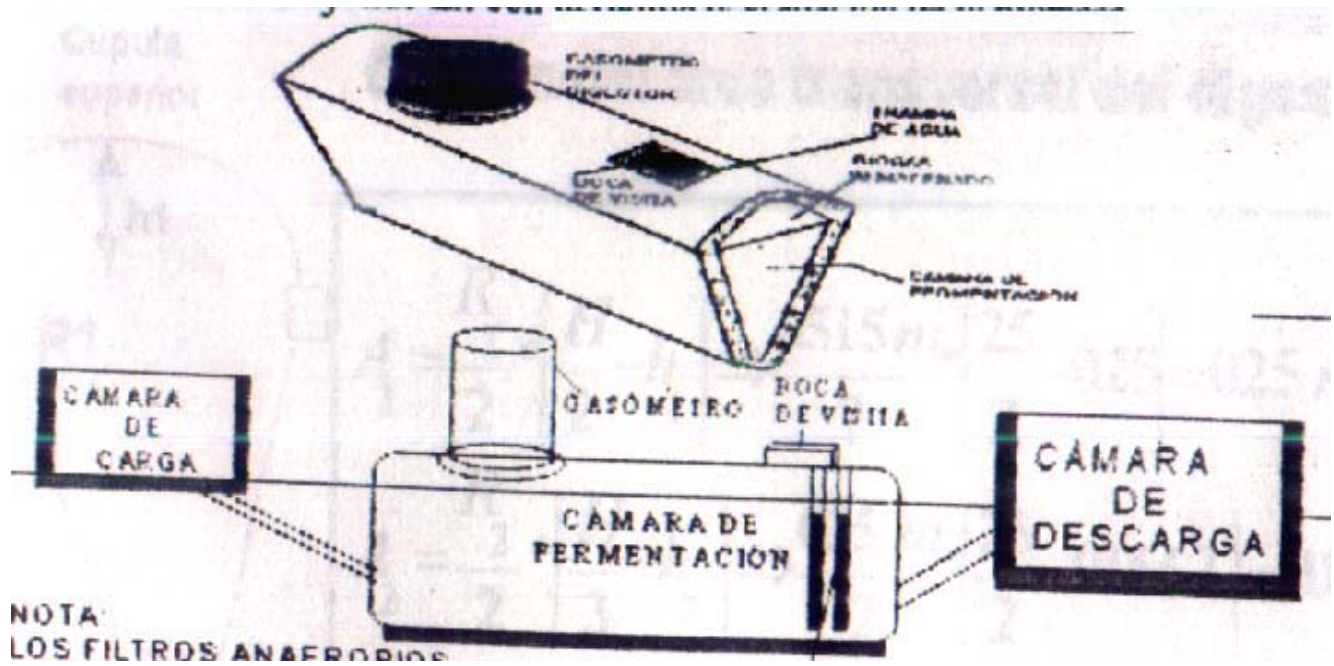


PRODUCCIÓN DE BIOGAS EN EL ÁMBITO DOMÉSTICO Y OTRAS APLICACIONES

Apéndice 4. Digestor tipo Chino



Apéndice 5: Digestor tipo Xochicalli



Fuente: Lavado José, 1998

Apéndice 6: Coeficiente de transferencia de Calor por convección

hi (para aire tranquilo interior del biodigestor) 9,3692

he (para aire en movimiento exterior) 34,0698

Fuente: Handbook of air conditioning system design. Carrier air conditioning company U.S.A, citado por Moreno Luis, 1987.

Apéndice 7. Conductividad Térmica de los materiales usados en la construcción del Biodigestor.

Material	K (w / m °C)
Bloque de construcción	0,692120
Bloque de fachada	1,315028
Cemento y arena	1,159301
Concreto	1,366937
Cemento blanco	0,294150
Tierra	0,346060

Según Pitts Donald R. y Sismo Leighton E. Transferencia de calor, McGraw Hill, 1ª. Edición 1.979. Citado por Moreno Luis, 1987.