



**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
FACULTAD DE CONSTRUCCIONES
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**



TRABAJO DE DIPLOMA

EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO HIDRÁULICO.

***Factibilidad de un biodigestor. Caso de estudio
"Comunidad Dos Palmas"***

Diplomante:

Luis Alberto Cruz Alfonso

Tutores:

Dr. C. Segundo Pereda Hernández

Dr. C. Pavel Vargas Rodríguez

Santiago de Cuba, Junio 2020

"Año 62 de la Revolución"

Diplomante. Luis Alberto Cruz Alfonso.

PENSAMIENTO

Utilícese toda la ciencia necesaria para un desarrollo sostenido sin contaminación.

**Fidel Castro Ruz
(Cumbre de Río, 1992)**



DEDICATORIA

Esto está dedicado a todas las personas que forman parte de mi vida, a todos lo que creen que soy alguien importante en su vida. A lo que me consideran como un amigo o como un hermano. También a lo que pensaron que no llegaría a esto y a lo que creyeron en mí, a todo aquel que me apoyo y me ayudo sin esperar nada a cambio. A mi madre, a mi padre, a mi querida hermana, a mi abuelita, a mis amigos, a mis compañeros de aula. También a Dios por todas las cosas buenas y porque no a las malas que nos sirven de experiencia.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas personas que de una forma u otra colaboraron para que yo terminara mi carrera. Le agradezco a los compañeros de mi grupo en especial y especialmente a los que compartimos el mismo cuarto. También le agradezco al gran amor de mi vida que me ha ayudado en todos estos años de la universidad siendo mi amiga, compañera y amante. A los profesores, que estuvieron pendiente a que se realizara de manera correcta este trabajo los cuales son DrC. Pavel Vargas Rodríguez y DrC. Segundo Pereda Hernández. En especial a mi familia, mis hermanos; a mi papá, a mi padrastro; a mi abuela y mi mamá que no solo le agradezco por esto sino por ser la única que me quiere sea lo que sea y sobre todo por ser mi Madre.

Gracias a todos.

RESUMEN

El biogás se forma naturalmente a partir de la descomposición de la materia orgánica bajo condiciones anaeróbicas. La digestión anaeróbica ha sido ampliamente aplicada a nivel mundial por casi 200 años, tanto a nivel doméstico como industrial, para la producción de energía, la estabilización de desechos orgánicos contaminantes y la producción de fertilizante orgánico. Alessandro Volta, ya en el año 1776, era el primero en descubrir el origen biológico del metano al observar la formación de un gas combustible sobre lagos y aguas estancadas, relacionando esta formación con la cantidad de materia orgánica en descomposición depositada en el fondo (*Tauseef, Premalatha, Abbasi, & Abbasi, 2013*).

En el presente trabajo encontraremos las definiciones correspondientes a un número determinado de los biodigestores más usados hasta la actualidad y en particular los más usados en nuestro país. En Cuba desde la generalización de granjas porcinas se han fabricado un número considerable de estas instalaciones lo que ha permitido aprovechar los desechos orgánicos y de esa manera a la vez que evitar una carga contaminante importante, obtener el beneficio que significa emplear el biogás para diferentes usos tanto doméstico como industrial.

ABSTRACT

The biogas is formed naturally starting from the decomposition of the organic matter under anaerobic condition. The anaerobic digestion has been broadly applied at world level for almost 200 years, so much at domestic level as industrial, for the energy production, the stabilization of waste organic pollutants and the production of organic fertilizer. Alessandro Volta, already in the year 1776, it was the first one in discovering the biological origin from the methane when observing the formation of a combustible gas on lakes and stagnated waters, relating this formation with the quantity of organic matter in decomposition deposited in the bottom (*Tauseef, Premalatha, Abbasi, & Abbasi, 2013*).

In the present work we will find the definitions corresponding to a certain number of the biodigestors more used until the present time and in particular those more used in our country. In Cuba from the generalization of swinish farms have been manufactured a considerable number of these facilities what has allowed to take advantage of the organic waste and in that way at the same time that to avoid an important polluting load to obtain the benefit that means to use the biogas for different uses so much domestic as industrial.

Índice

Introducción	9
Capítulo 1 Revisión bibliográfica	13
1.1 Biodigestor. Definición	14
1.2 Biodigestores en el tratamiento de excreta porcina	14
1.3 Biodigestores como componentes de sistemas agropecuarios integrado.....	15
1.3.1 Tratamiento de excretas por técnicas anaeróbicas	15
1.3.2 pH del medio	16
1.3.3 Temperatura	17
1.3.4 Nutrientes	17
1.3.5 Problemas de toxicidad.....	18
1.3.6 Ritmo de carga	19
1.3.7 Tiempo de retención.....	20
1.4 Tipos de biodigestores	20
1.4.1 Biodigestores industriales	21
1.4.1.1 Digestor discontinuo	22
1.4.1.2 Digestor de mezcla completa	22
1.4.1.3 Digestor de flujo pistón	24
1.4.2 Biodigestores domésticos. Ventajas y desventajas	25
1.4.2.1 Tipo hindú o campana flotante	25
1.4.2.2 Tipo chino o cúpula fija	26
1.4.2.3 Tipo tubular plástico	28
1.4.2.4 Tipo laguna anaeróbica cubierta con polietileno de alta densidad	29
Capítulo 2 Materiales y métodos	31
2.1 Biodigestor tubular plástico. Criterios para su elección	32
2.2 Cálculo y diseño de digestores de biogás (metodología vietnamita)	33
2.2.1 Procedimiento para la colecta de datos	34
2.2.1.1 Cantidad de residual por día.....	34
2.2.1.2 Tasa de disolución de la mezcla de alimentación.....	35

Factibilidad de un biodigestor. Caso de estudio "Comunidad Dos Palmas".

2.2.1.3 Productividad de biogás	35
2.2.1.4 Tiempo de retención	36
2.2.1.5 Coeficiente de contención de gas.....	37
2.3 Cálculo de los datos para dimensionar del digestor	37
2.3.1 Cantidad de material de entrada.....	37
2.3.2 Capacidad de planta	38
2.3.3 Volumen de contención del gas	38
2.4 Ajuste del volumen calculado a las mangas del material	39
Capítulo 3 Resultados	41
3.1 Caracterización y ubicación de la zona de estudio	42
3.2 Datos de los beneficios que reporta un biodigestor	42
3.3 Materiales y métodos para su construcción	43
2.3.1 Construcción de un biodigestor tubular plástico	44
Conclusiones	48
Recomendaciones	49
Referencias	50
Anexos	51

INTRODUCCIÓN:

Introducción:

La tecnología de producción de biogás mediante la fermentación anaerobia es ampliamente conocida. Existen muchos sistemas de tratamiento de residuales que permiten capturar los gases que emanan. Su importancia radica no solo en la capacidad de estos como combustible, sino en que dichos sistemas evitan la liberación a la atmósfera de gases como el metano, que generan veintitrés veces más efecto invernadero que el CO₂.

Desde la década de 1930, la producción de biogás en países desarrollados ha sido un proceso estandarizado para la estabilización de efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales (lodos de depuradora), pero lo que ha cambiado en los últimos 40 años es que dicha producción ha alcanzado una escala más industrializada, con una mayor eficiencia, grado de complejidad y especificación, particularmente en Europa y Norteamérica (*Agencia Internacional de la Energía, 2013*). En estos países, la aplicación de la digestión anaeróbica se ha realizado más por motivos medioambientales que por puramente energéticos. Así, por ejemplo, al finalizar el año 2011 existían más de 4000 biodigestores en Alemania, 350 en Austria, 55 en Dinamarca, entre otros; y en el 2010 se registraron en funcionamiento más de 160 en Estados Unidos y 17 en Canadá (*Rajendran, Aslanzadeh y Taherzadeh, 2012*).

En los países en vías de desarrollo, sin embargo; se ha impulsado la producción de biogás a pequeña escala, principalmente a partir de estiércol bovino, con el propósito de obtener energía y fertilizante orgánico. Se calcula que existen más de 30 millones de digestores domésticos en China, seguida por India con 3.8 millones, 0.2 millones en Nepal, 60000 en Bangladesh, y en países africanos como Kenia y Etiopía más de 1000 en cada uno (*Rajendran, Aslanzadeh y Taherzadeh, 2012*). En Latinoamérica también se han llevado a cabo investigaciones con estiércol animal en países como México, Costa Rica y Colombia, y en nuestro país existen más de cuatro mil; en la provincia de Villa Clara se encuentran casi mil estanques en funcionamiento, Santiago de Cuba cuenta con alrededor de 600, y en Pinar del Río más de un centenar, (*Congreso Internacional de Información 2017*).

Factibilidad de un biodigestor. Caso de estudio "Comunidad Dos Palmas".

La contaminación del medio ambiente sugiere la necesidad de asumir una nueva actitud de administración y desarrollo sostenible, para conservar y al mismo tiempo mantener la sostenibilidad de los recursos. La mitigación de estos impactos ambientales impone mejorar las prácticas actuales de gestión para lograr un tratamiento adecuado de los residuos que se generan, con el consecuente aprovechamiento ecológico de los mismos. El tratamiento y depuración del estiércol y otros desechos orgánicos producidos por los animales en las instalaciones agropecuarias forma parte de estas mejoras.

Una de las formas en que se puede tratar el estiércol para reducir la contaminación, atribuible a explotaciones pecuarias, es mediante el proceso de biodigestión anaeróbica. La creación de un sistema de este tipo que permita captar la producción de biogás proveniente de las excretas de animales descompuestas en biodigestores, permite contar con una fuente alternativa de energía y a la vez disminuir la liberación al ambiente de gases de efecto invernadero. La producción de biogás mediante la fermentación anaeróbica es una tecnología ampliamente usada en múltiples países como un medio eficaz de descontaminación y como fuente de energía renovable. El uso de la digestión anaeróbica para el tratamiento de los residuos pecuarios es una práctica difundida por las ventajas que ofrece como fuente alternativa de energía, como generadora de abonos orgánicos y por su bajo costo de inversión, lo que hace que haya sido implementada de forma generalizada por países desarrollados y subdesarrollados. Esta tecnología resuelve tres dificultades actuales: la reducción de la elevada carga orgánica de estos residuos, la producción de biocombustible y la obtención de bioabono como fertilizante agrícola (*Agencia Andaluza de la Energía. Consejería de economía, innovación y ciencia. Junta de Andalucía, 2011*).

El aprovechamiento y diversificación del uso del biogás puede mejorar los indicadores económicos de una granja, al convertirse en una fuente de energía, ya sea para la cocción de alimentos, para la generación de la electricidad utilizada y como fuente segura de ingresos financieros.

En Cuba los biodigestores constituyen una valiosa alternativa para la producción de energía renovable, pues debido a la situación económica que

Factibilidad de un biodigestor. Caso de estudio "Comunidad Dos Palmas".

nos encontramos atravesando por causa del bloqueo, impuesto por el gobierno de los Estados Unidos nos ayuda a disminuir las necesidades de hacer empleo de combustible fósil. En tal sentido consideramos oportuno la ejecución de un trabajo de diploma que prepare las condiciones para llevar a cabo el diseño en un futuro cercano en el tiempo de un biodigestor en el poblado de Dos Palmas.

Situación problémica:

En las comunidades rurales, mayormente alejadas de los núcleos urbanos de soporte, es conveniente disponer de medios que permita la autosuficiencia de sobrevivencia, de tal manera que debe existir una cultura de auto abastecimiento. En la comunidad Dos Palmas del municipio de Palma Soriano, existen las condiciones socio-económicas para mejorar la base de la autosuficiencia alimentaria.

Problema de investigación:

Ausencia en la comunidad Dos Palmas de un biodigestor a partir de las excretas porcinas.

Objeto de investigación:

Biodigestor a partir de excretas porcinas.

Campo de acción:

Comunidad Dos Palmas.

Objetivo General:

A partir de los requisitos para la construcción de un biodigestor con las excretas porcinas, recolectar el conjunto de datos necesarios para su construcción.

Objetivos específicos:

- Estudio de la literatura internacional y nacional referida al tema.
- Sobre la base de un biodigestor específico recoger en la comunidad de Dos Palmas los datos necesarios para su futura construcción.

Factibilidad de un biodigestor. Caso de estudio "Comunidad Dos Palmas".

- Hacer el presupuesto de los materiales e insumos que se emplearán en la construcción del biodigestor de acuerdo con las decisiones tomadas.

Hipótesis:

Si teniendo el modelo de biodigestor, se reúnen todos los datos reales de la comunidad, entonces se podría diseñar un biodigestor con características particulares para la misma.

Aportes:

- Censo poblacional con características especiales.
- Recomendación sobre bases reales de la formación de una granja porcina de acuerdo con el interés de construir un biodigestor adaptado a las condiciones de la comunidad.
- Sugerir de acuerdo con los dos aspectos anteriores el diseño y construcción de un biodigestor para la comunidad "Dos Palmas".

CAPÍTULO 1.

Revisión bibliográfica.

1.1 Biodigestor.

Un biodigestor, digestor de desechos orgánicos o simplemente digestor, consiste básicamente en un contenedor o recipiente herméticamente cerrado donde se deposita el material orgánico o sustrato mezclado con agua, el cual experimentará un proceso de digestión o degradación bajo condiciones anaeróbicas, es decir con ausencia de oxígeno. El digestor puede ser de distintos materiales como: plástico, metal, ladrillo, etc. o de la combinación de ellos. También puede adoptar distintas formas como: cilíndrica, rectangular u ovoide. Un biodigestor es el principal componente de una planta de biogás porque es donde se obtiene tal biocombustible y permite su posterior aprovechamiento energético (*Agencia Andaluza de la Energía. Consejería de economía, innovación y ciencia. Junta de Andalucía, 2011*).

1.2 Biodigestores en el tratamiento de excreta porcina:

Las excretas porcinas, vistas por muchos como un contaminante ambiental de importancia, pueden generar recursos muy valiosos mediante su procesamiento, de forma tal que al reciclarse parte de la energía y de sus nutrientes contribuyen a hacer sostenible en el trópico la producción porcina y de otras especies animales integradas. Desde el siglo pasado se conocía en la India y China el uso de procesos fermentativos para producir el biogás y tratar ecológicamente las excretas de animales de forma artesanal. En los biodigestores, que son las instalaciones donde ocurren estos procesos, se obtiene además un efluente líquido cuyo valor económico como fertilizante es equivalente al del biogás. Si tenemos en cuenta que los primeros biodigestores que se construyeron en China y en la India fueron de Cúpula fija y Campana flotante respectivamente, mas tarde se han desarrollaron otros más sencillos, rápidos de hacer y con materiales más baratos como goma, poli-vinil-cloruro (PVC), red-mud-plastic (RMP) y polietileno. Además, ya en los últimos años en varios países subdesarrollados se están utilizando digestores tubulares de polietileno con el objetivo de reducir los costos de producción mediante el uso de materiales locales y la simplificación de las instalaciones, operación y mantenimiento. (*Grupo Medio Ambiente IIP,20007*).

1.3 Biodigestores como componentes de sistemas agropecuarios integrados:

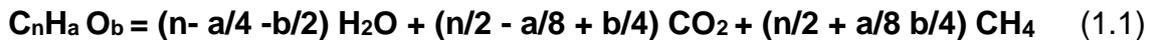
Existen serios problemas ambientales asociados con la producción porcina en condiciones de explotación intensiva estabulada, debido al problema de disposición de los residuales o excretas, entendiéndose por las mismas, las heces fecales y la orina, que generalmente se mezcla también con el agua de limpieza y con residuos de comida. El principal procedimiento que se ha utilizado corrientemente para la eliminación de las excretas en este tipo de instalaciones, ha sido el de diseminar estos materiales sobre la tierra. Sin embargo, esta costumbre ha determinado la contaminación directa o indirecta de los cursos de agua adyacentes.

Las excretas porcinas tienen una gran cantidad de materia orgánica, nitrógeno amoniacal, compuestos malolientes y elementos potencialmente patógenos para los animales y para el hombre, de naturaleza viral, bacteriana o parasitaria. En la actualidad se emplea mucho el tratamiento por descomposición anaeróbica (*Instituto de Investigaciones Porcinas, 2007*).

1.3.1 Tratamiento de excretas por técnicas anaeróbicas:

En el proceso de digestión anaerobia, la materia orgánica se degrada para producir metano, mediante un conjunto de interacciones complejas entre distintos grupos de bacterias. Hay tres fases básicas en este proceso, y hay tres grupos de bacterias esencialmente diferentes que intervienen en cada una de estas fases. El primer grupo consiste en una mezcla de bacterias llamadas a veces formadoras de ácidos, que hidrolizan las moléculas complejas de materia orgánica para originar ácidos grasos de cadena corta y alcohol. El segundo grupo es el de las bacterias acetogénicas, que producen acetato e hidrógeno. El tercer grupo de microorganismos se suele denominar metanogénico, y convierte los productos ya degradados a metano y dióxido de carbono. La operación estable de los biodigestores requiere que todos estos grupos bacterianos estén en un equilibrio dinámico armónico. Cualquier cambio en las condiciones ambientales puede influir en este equilibrio, y resultar en la formación desproporcionada de compuestos intermedios que pueden inhibir

todo el proceso. Las ecuaciones estequiométricas de Buswell son aplicables a la fermentación a metano de todos los sustratos:



Donde n, a y b son la cantidad de átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno contenidos en las moléculas de materia orgánica degradadas. Como ejemplo, para la molécula de almidón ($C_6H_{10}O_5$), la fórmula es como sigue:



Esto quiere decir que la fermentación anaerobia de almidón resulta en un 50% de metano. Existen varios factores ambientales que influyen en el proceso de degradación anaerobia de la materia orgánica, como el pH, la temperatura, disponibilidad de nutrientes, presencia de sustancias tóxicas, tiempo de retención y ritmo de carga (*Julio Ly, Instituto de Investigaciones Porcinas, 2007*).

1.3.2 pH del medio.

El valor óptimo de pH está en el rango de 6.6 a 7.6. Los ácidos grasos de cadena corta (AGCC) que se producen durante el proceso de digestión reducen el pH en la fase líquida del digestor. Si las bacterias metanogénicas no pueden convertir los AGCC tan rápidamente como son formados por las bacterias acetogénicas, los AGCC se acumularán y causarán un descenso en el pH del medio. Sin embargo, el equilibrio CO_2/HCO_3^- en el digestor ejerce una resistencia sustancial a los cambios de pH.

Hay dos modos operacionales principales para corregir una condición desbalanceada de bajos pH en el biodigestor. La primera forma es detener la carga del biodigestor y permitir durante cierto tiempo que la población metanogénica reduzca la concentración acídica y que entonces el pH se eleve a un valor razonable, pero esta operación a su vez enlentece la actividad bacteriana, reduciendo de esta forma la formación de AGCC. Un segundo método involucra la adición de sustancias tampones para elevar el pH sin cambiar el ritmo de carga del digestor. Una ventaja de la adición de tampones es que el pH puede rectificarse más rápidamente. Se suele usar para ello la cal. El carbonato de sodio, aunque, es más caro, puede prevenir la

precipitación de carbonato de calcio (*Julio Ly, Instituto de Investigaciones Porcinas,2007*).

1.3.3 Temperatura:

La velocidad de las reacciones químicas y bioquímicas se incrementa normalmente cuando se eleva la temperatura. Una temperatura muy alta puede causar una declinación en el ritmo metabólico del proceso, debido a la degradación de las enzimas que son esenciales para la vida celular. Los microorganismos tienen un crecimiento y ritmo metabólico óptimos dentro de un rango de temperatura muy bien definido, y que es específico para cada especie bacteriana. Particularmente, el límite superior depende de la termoestabilidad de las moléculas de proteína sintetizadas por cada tipo particular de organismo. Se han detectado dos regiones de temperatura para la digestión de las excretas. El primer rango es apropiado para la vida de las bacterias mesofílicas (de 20° a 45°C) y el segundo rango es característico de bacterias termofílicas (de 35 ° a 55°C). Una ventaja de una digestión termofílica es que el ritmo de producción de metano es aproximadamente el doble de una digestión mesofílica. Por consiguiente, los biodigestores termofílicos pueden tener la mitad del volumen de uno mesofílico, y aún mantener así la misma eficiencia en el proceso. Se han llevado a cabo muchos estudios de procesos termofílicos en países de la zona templada del mundo. Sin embargo, con excretas y residuos fecales que están a temperatura ambiente, se necesita considerable energía para elevar la temperatura de este material hasta 55°C. Por lo tanto, los estudios sobre la digestión termofílica pueden ser de menor interés en países tropicales, especialmente en áreas rurales, donde la disponibilidad de energía es escasa o un factor limitante para cualquier actividad (*Cubasolar,2008*).

1.3.4 Nutrientes:

Junto con una fuerte de energía en forma de carbono orgánico, los microbios requieren nitrógeno, fósforo y otros factores de crecimiento que originan efectos complejos. El nivel de nutrientes para la microflora debiera ser por lo menos superior al valor óptimo, desde el punto de vista de las concentraciones requeridas para las bacterias metanogénicas, puesto que este grupo de

microorganismos se inhibe severamente con una deficiencia ligera de nutrientes. Sin embargo, la deficiencia nutritiva no debiera ser un problema cuando se suministran alimentos combinados a los animales, puesto que estos sustratos proveen usualmente más que suficiente desde el punto de vista de cualquier requerimiento. Puesto que los distintos materiales que se fermentan en el biodigestor tienen diferentes composiciones químicas, la producción de biogás se producirá a distintos ritmos. Se ha informado que el gas producido por distintos tipos de cargas, los materiales con alto contenido de nitrógeno, tales como las excretas de animales, se descomponen fácilmente y producen biogás de una forma rápida; por lo tanto, el período fermentativo es corto. La descomposición de materiales con un alto contenido de carbono es más lenta, pero el período fermentativo es más largo. Los materiales con diferentes proporciones de carbono/nitrógeno (C/N) difieren ampliamente en sus rendimientos en biogás. El valor C/N para la excreta porcina es bajo, mientras que en la paja de arroz es alto. Aunque las condiciones de fermentación y el monto de sólidos totales en ambos tipos de materiales era el mismo, se halló una diferencia de 58-105% en la producción de biogás (*Inv. Ramón Chao, Grupo Medio Ambiente IIP, 2007*).

1.3.5 Problemas de toxicidad:

Los compuestos tóxicos, aún en concentraciones bajas, influyen negativamente en el proceso de digestión al disminuir la velocidad del metabolismo de la microflora. Las bacterias metanogénicas son generalmente las más sensibles, aunque en general todos los grupos de microorganismos que participan en el proceso son afectados. Debido a su lento crecimiento, la inhibición de las metanobacterias puede llevar a un fallo completo en el proceso en sistemas mixtos, debido a un desbalance en la población bacteriana. Los dos principales indicadores de que hay algún tipo de inhibición en el proceso son la disminución en la producción de metano y un incremento en la concentración de AGCC en el medio. Un nutriente esencial puede devenir tóxico para los microbios si su concentración se vuelve muy alta. En el caso del nitrógeno, es muy importante mantener un nivel óptimo en su concentración para que el biodigestor opere satisfactoriamente. Un desbalance consistente en un contenido alto de nitrógeno y una baja disponibilidad de energía causa una

toxicidad por una indebida generación de amoníaco. Usualmente, los niveles de amoníaco deben mantenerse por debajo de 80 ppm, pero a concentraciones excesivamente altas, como entre 1500 y 3000 ppm, el amonio aún puede tolerarse en el medio. También se ha informado que los primeros síntomas de inhibición en el proceso se han detectado con concentraciones de amoníaco de 8000 ppm. Deben tomarse precauciones para evitar la entrada en el biodigestor de ciertos iones metálicos, sales, sustancias bactericidas o sintéticas (*Inv. Ramón Chao, Grupo Medio Ambiente IIP, 2007*).

1.3.6 Ritmo de carga:

Se calcula el ritmo de carga como el total de materia seca (MS) o materia orgánica (MO) que se introduce diariamente en el biodigestor, en términos del volumen de su fase líquida, expresada en metros cúbicos. La MO o sólidos volátiles (SV) se refieren a la parte de la MD o sólidos totales (ST) que se volatilizan durante la incineración o reducción a cenizas de toda la materia orgánica. En teoría, la MO contiene todos los compuestos orgánicos que pueden convertirse en metano. Normalmente, las excretas animales suelen tener una concentración de MS por encima del 10%. Puesto que los requerimientos de operación de un digestor anaerobio establecen que el contenido total de MS en la carga no puede exceder este valor de 10%, en muchos casos, los desperdicios de la granja deben diluirse antes de cargar el biodigestor.

El ritmo de producción de biogás se refiere al rendimiento de biogás producido por unidad de masa de MS o MO. La fermentación en el biogás requiere de un cierto rango de concentración de MS, que en la práctica es ancho, generalmente desde 1 hasta 30%. La concentración óptima depende de la temperatura. Se ha encontrado que en el verano de algunos países (25 a 27°C), la concentración óptima es de 6%, mientras que a temperaturas algo más bajas en primavera (18 a 23°C), la temperatura óptima es de 12%.

Para determinar el contenido de MO en las excretas animales, se suele a menudo determinar la demanda química de oxígeno (DQO) o la demanda biológica de oxígeno (DBO). La DQO es la cantidad, en miligramos, de oxígeno consumido para la oxidación, mediante un oxidante fuerte, de las sustancias

reductoras presentes en un litro de muestra de material de desperdicio o excreta. Se usa la DQO para mostrar el grado en que el agua está contaminada. Hasta cierto punto, la DQO muestra la cantidad de sustancias oxidables contenidas en el agua o líquido en cuestión. El cambio de valores de la DQO antes y después del proceso fermentativo puede indicar la eficiencia del proceso. La DBO representa la cantidad demandada de oxígeno, igualmente en miligramos, para la descomposición de sustancias orgánicas contenidas también en un litro, por medio de microbios aeróbicos. El valor de la DBO también puede sugerir cuál método puede ser el más conveniente para el tratamiento de un residual dado (*Julio Ly, Instituto de Investigaciones Porcinas, 2007*).

1.3.7 Tiempo de retención:

Debido a que el proceso de producción de gas es lento, mientras más tiempo estén las sustancias descargadas en el biodigestor, mayor será la producción de gas en términos absolutos por unidad de sustrato. Hay dos índices para identificar la retención de las sustancias en el digestor. El tiempo de retención de los sólidos biológicos (TRS) se determina al dividir el monto de MO o SV cargados en el digestor, entre la cantidad de MO que sale del sistema diariamente. Se asume que el TRS representa el tiempo de retención promedio de los microorganismos en el digestor. El tiempo de retención hidráulico (TRH) es la proporción entre el volumen del reactor o digestor, dividido por la carga diaria (*Julio Ly, Instituto de Investigaciones Porcinas, 2007*). Estos índices son importantes en los digestores de última generación. Por otra parte, en condiciones de granja es más práctico medir el TRH que el TRS por razones obvias.

1.4 Tipos de biodigestores.

Existe una gran variedad de biodigestores, por lo que se puede hacer una clasificación de acuerdo a diferentes criterios como: modo de operación, llenado y vaciado, volumen, número de tanques de proceso, orientación de los mismos o los sistemas de movilización de biomasa (*Agencia Andaluza de la Energía. Consejería de economía, innovación y ciencia. Junta de Andalucía, 2011*).

El primer biodigestor lo implementó Imhoff en Alemania en 1920, y a partir de ese momento se han probado diversas configuraciones y construcciones, buscando una mayor eficiencia en la producción de biogás y menor costo de inversión (*Agencia Andaluza de la Energía. Consejería de economía, innovación y ciencia. Junta de Andalucía, 2011*).

Pueden existir biodigestores con diferente intensidad de mezclado biodigestores con retención de biomasa o recuperación del efluente, de una o dos etapas, etc. Sin embargo, se puede hacer una división en dos grandes grupos, de acuerdo a su tamaño y nivel de sofisticación. Existen plantas de biogás a pequeña escala, esto es a nivel de hogares o pequeñas comunidades agrícolas, y plantas de biogás a escala industrial.

1.4.1 Biodigestores industriales

Los tipos de digestores existentes a gran escala es enorme, con diferenciaciones en parámetros como el volumen, régimen de alimentación, intensidad de mezcla, número de tanques de proceso y orientación de los mismos, sistema de retención de la biomasa, nivel de sólidos totales en el alimento, etc. Todos los tipos de reactores industriales existentes se pueden dividir según dispongan o no de mecanismos para la retención de biomasa. Aquellos que sí lo hacen son denominados de segunda generación, por la mayor tecnología desarrollada para aumentar el rendimiento del digestor, reduciéndose así los tiempos de retención de varios días a incluso solo unas cuantas horas.

Estos tipos de digestores son aplicados mayormente en países desarrollados para hacer un uso energético del biogás o simplemente para la estabilización de grandes cantidades de desechos como estiércoles de ganado vacuno, de cerdos y gallinas, o aguas residuales provenientes de distintas industrias. Esto último se hace cuando las ganancias de energía no son una prioridad, por lo que éstos digestores son consumidores netos de energía (sistemas de bombeo, agitación, etc.).

1.4.1.1 Digestor discontinuo

Es el más simple ya que consiste básicamente en un tanque de proceso (véase figura 2.1), en el que una vez que se añade la mezcla de residuos se espera el tiempo de retención para que, luego de finalizada la reacción cuando se ha degradado la totalidad de la materia orgánica y ya no se produce biogás, se retira el efluente (se vacía completamente) y se procede a añadir material nuevamente. De acuerdo con (*Flotats, Campos, & Bonmatí, 1997*) en este tipo de digestores el concepto de tiempo de retención no tiene sentido, sino que se habla de tiempo de digestión. Se pueden cargar una vez en forma total o por intervalos durante varios días. Para conseguir una producción de biogás cercana a la continuidad deben combinarse varios reactores discontinuos con puestas en marcha intercaladas, de esta manera cuando se acaba la producción de biogás en un reactor se puede conectar a otro. Este modelo es adecuado cuando existen limitaciones operativas como la falta de personal, o cuando la materia orgánica no existe en forma continua. Su ventaja es que puede procesar gran variedad de sustratos que, aunque tengan tierra u otro inerte mezclado, no entorpecerán la operación del biodigestor, además de no requerir prácticamente ninguna atención diaria. Estos reactores han sido aplicados para la digestión anaeróbica de residuos con una alta concentración de sólidos. Sin embargo, su desventaja es que su carga y descarga requiere de un considerable y paciente trabajo (*Moncayo Romero, 2013*). Además, la ausencia de sistemas de agitación y mezclado disminuye la completa digestión anaerobia de los sustratos introducidos.

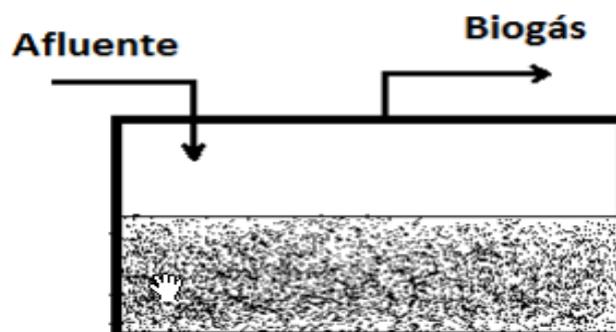


Figura 1.1. Esquema de un digestor discontinuo

Fuente: (Dieron Blanco Betancourt, 2012).

1.4.1.2 Digestores completamente mezclados

Conocidos como reactores de mezcla completa (RMC) o reactores de tanque continuamente agitado (CSTR por sus siglas en inglés), tienen un dispositivo para la mezcla del contenido del digestor. La mezcla se puede realizar de manera mecánica mediante hélice o palas de eje vertical u horizontal, o neumática mediante la recirculación de biogás a presión. Se construyen en acero u hormigón, y trabajan en rangos de temperaturas mesofílicas y termofílicas. Los tanques para los digestores se construyen bajo o sobre el nivel del suelo. La losa y las paredes del tanque se construyen de hormigón. La cubierta superior puede ser también de hormigón armado o de una membrana flexible de caucho. Mediante el uso de agitadores como hélices o palas, de eje vertical u horizontal, se busca mantener una distribución homogénea de la mezcla, lo que permite un adecuado contacto de la población bacteriana con ésta y evita problemas de decantación, que afectarían la capacidad de producción de biogás. En la figura 2.2 se muestra un esquema de un digestor CSTR típico.

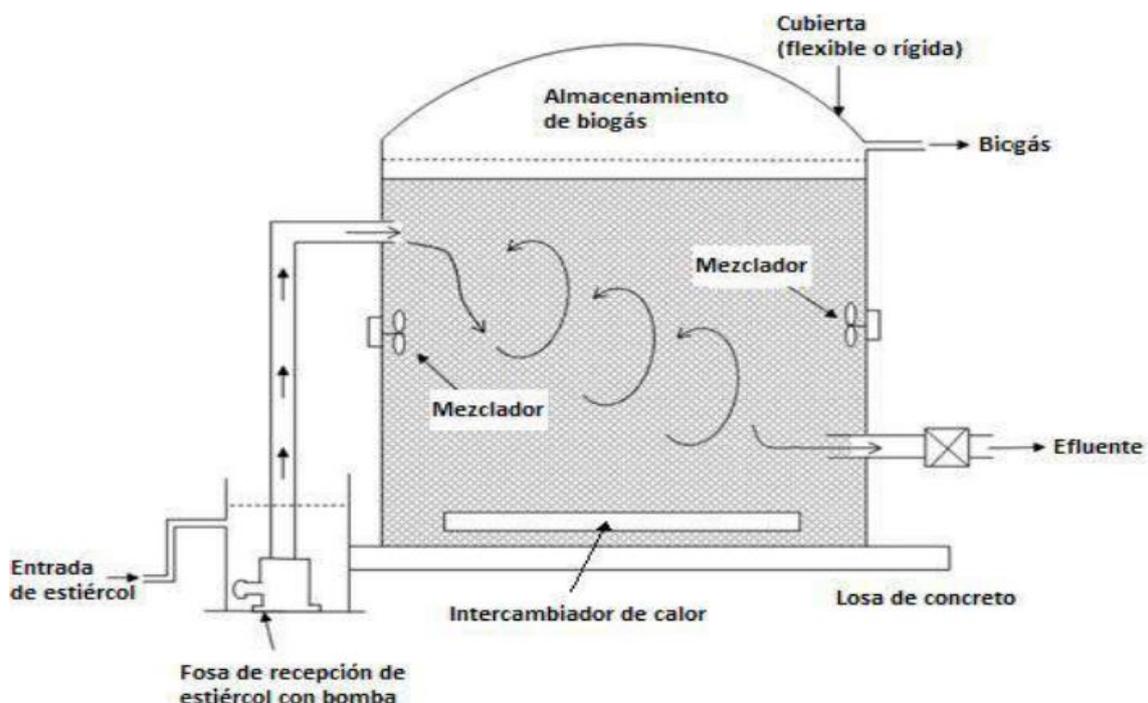


Figura 1.2 Esquema de un digestor CSTR típico

Fuente: (Tauseef, S. M., Premalatha, M., Abbasi, T., & Abbasi, S. A., 2013).

Factibilidad de un biodigestor. Caso de estudio "Comunidad Dos Palmas".

Estos digestores son operados con contenido en sólidos de 5-14%, con un TRH de 10 a 30 días (Tauseef, Premalatha, Abbasi, & Abbasi, 2013). Pueden ser alimentados continua o intermitentemente. Son digestores de gran tamaño en los que se emplean equipos comerciales para su alimentación, agitación, vaciado y control; y pueden tener un volumen que va desde unos cientos a unos pocos miles de m³, dependiendo del tamaño de la industria. El TRS es idéntico al TRH y el "lavado" microbiano ocurre de manera similar a como ocurre en los digestores domésticos (de baja velocidad). Pero, debido al intenso mezclado y al control de la temperatura en los CSTRS, la digestión anaeróbica ocurre mucho más rápido en comparación con los primeros (Tauseef, Premalatha, Abbasi, & Abbasi, 2013).

1.4.1.3 Digestor de flujo pistón

Este tipo de reactor es el más sencillo de todas las tecnologías de digestión anaerobias, por lo que su coste de construcción y operación es notablemente menor. Tienen una geometría alargada donde la mezcla circula en "flujo pistón o tapón" (véase figura 2.3). Básicamente consiste en un túnel largo o cámara rectangular en mampostería u hormigón armado donde la mezcla fluye de un extremo al otro, con una cubierta estanca al aire. A veces este digestor tiene forma de U, con la entrada y la salida en el mismo extremo. La cubierta superior puede ser fija, construida mediante una bóveda de ladrillos, o mediante una losa en hormigón armado. También se puede colocar una cubierta flexible, utilizando alguna geomembrana (por ejemplo, polietileno de alta densidad PEAD), lo suficientemente durable y que no presente fugas figura

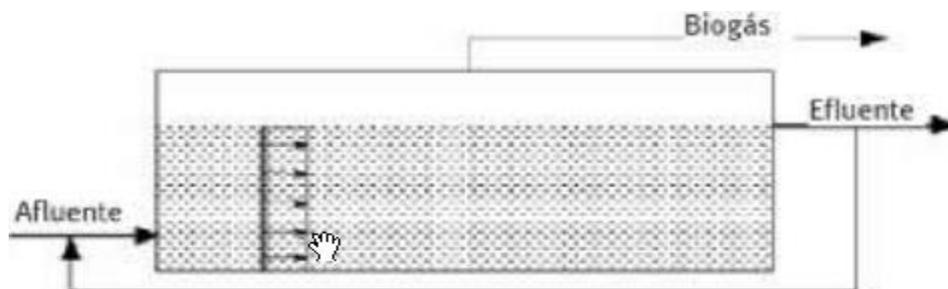


Figura 1.3. Esquema de digestor de flujo pistón

Fuente: (Tauseef, Premalatha, Abbasi, & Abbasi, 2013).

Factibilidad de un biodigestor. Caso de estudio "Comunidad Dos Palmas".

La materia a digerir entra por un lado del reactor y sale por el otro después de transcurrido el tiempo de retención, completándose el proceso a medida que se avanza por el sistema, con el consiguiente arrastre de bacterias, lo que repercute en una menor eficiencia respecto a digestores con retención de biomasa. Existen en disposición vertical u horizontal, siendo esta última la más utilizada.

1.4.2 Biodigestores domésticos. Ventajas y desventajas:

Son biodigestores relativamente pequeños y de "baja velocidad", por lo general utilizados en zonas rurales y son típicamente diseñados para manejar estiércol animal (*Tauseef, Premalatha, Abbasi, & Abbasi, 2013; Kaiser, Bas, & Gronauer, 2002*). Pero también pueden usarse desechos humanos, hojas, pastos y residuos agrícolas. Son especialmente adecuados para su uso en el entorno rural porque requieren pocos conocimientos técnicos en su operación y mantenimiento. No hay un suministro continuo de contenido del digestor, sino que se hace por gravedad y normalmente de manera intermitente (una vez al día), por lo que la digestión avanza lentamente con tiempos de retención que van de 40 a 45 días (*Tauseef, Premalatha, Abbasi, & Abbasi, 2013*).

1.4.2.1 Tipo hindú o campana flotante:

Es el más popular en ese país donde varias instituciones hasta 1985 han construido diferentes tipos de estas plantas resultando la instalación de más de 460 000 unidades. Aunque una parte fueron construidas con ladrillos, cemento y acero para la campana que flota sobre el residual del digestor que es donde se almacena el biogás, más tarde se desarrolló la tecnología KVIC con campana de diversos materiales como: ferro cemento, fibra de vidrio, de polietileno de alta densidad, de PVC, de láminas rígidas de PVC y hasta de cemento y bambú. Esta variante se construye de forma vertical u horizontal y en cuanto a su uso social y volumen pueden ser individuales o comunales.

Está compuesto principalmente por una campana de acero que flota sobre el digestor, a medida que el biogás ejerce presión la misma sube almacenando el gas producido, además dispone de depósito para la recepción de los residuales

Factibilidad de un biodigestor. Caso de estudio "Comunidad Dos Palmas".

y tuberías de entrada y salida. A diferencia de la campana, el resto de los materiales que se utilizan en su construcción son materiales convencionales.



Figura. 1.4. Biodigestores de campana flotante

Fuente: (Ramón Chao, 2007)

Ventajas:

- Relativa facilidad en su construcción.
- La presión del gas almacenado es constante ya que es regulado por el peso del gasómetro.
- El volumen del gas almacenado es visible directamente.

Desventajas:

- La cúpula de acero implica un costo sustancial.
- La parte de acero es susceptible de corrosión por lo que estas plantas tienen un menor tiempo de vida (poco más de 5 años) que las de cúpula fija.
- La pintura del tambor implica mayores costos de mantenimiento.
- Si el alimento contiene material flotante (como fibras o paja) el gasómetro puede atascarse en la escoria resultante.

1.4.2.2 Tipo chino o cúpula fija (Figura 2.5)

La forma de este tipo de biodigestor se asemeja a una esfera; el gas se almacena dentro de la campana fija a presión variable, la cual se obtiene al desplazar el líquido en digestión hacia una cámara llamada de hidropresión; los materiales de construcción son bloques y/o ladrillos, cemento y acero. Estos digestores se cargan en forma semicontinua: se realiza una primera carga con

Factibilidad de un biodigestor. Caso de estudio "Comunidad Dos Palmas".

material celulósico y estiércol, además del inóculo correspondiente, hasta un 70% de la capacidad (Hilbert, 2003); luego se sigue cargando como un digestor continuo; a los 120-180 días se descarga en forma total y se reinicia el ciclo. Fuera de China, generalmente, se manejan estos digestores en forma continua.

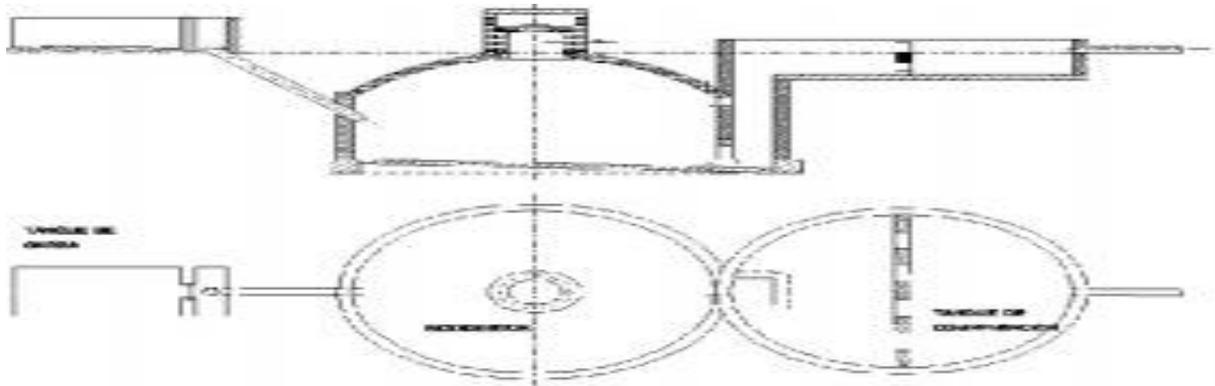


Figura 1.5. Esquema de un biodigestor de cúpula fija.

Fuente: (Ramón Chao, 2007)

Para la construcción se necesita de albañiles capacitados en este tipo de obra con el asesoramiento de personal especializado.



Figura.1.6. Biodigestor de cúpula fija en construcción

Fuente: (Julio Ly, 2007)

Ventajas:

- Tiempo de vida muy largo (con una buena construcción).
- Menores costos de construcción que uno de cúpula flotante.
- Por su construcción debajo del suelo no ocupa espacio en la superficie, y está protegido de los cambios de temperatura.

Factibilidad de un biodigestor. Caso de estudio "Comunidad Dos Palmas".

- Relación de mezcla estiércol/agua aproximada de 1 a 1, por lo que requiere menos agua en comparación con el modelo hindú.

Desventajas:

- Debido a la presión del gas, incluso una pequeña grieta en la mampostería del domo puede causar grandes pérdidas de biogás.
- Mayor complejidad en construcción y mantenimiento (vaciarlo cada cierto tiempo para identificar las posibles fisuras en la cúpula).
- La presión del gas varía enormemente dependiendo del volumen de éste almacenado.
- Necesidad de personal experto en su construcción.
- A pesar de que la construcción bajo el suelo amortigua las temperaturas extremas, la temperatura de fermentación al interior del biodigestor es baja.

1.4.2.3 Tipo tubular plástico (Figura 2.7)

El biodigestor tubular plástico consiste en una especie de bolsa alargada de polietileno, con una relación longitud-ancho de aproximadamente 5:1, aunque por razones de construcción eficiente las dimensiones pueden diferir (Frederick, 2011); dicha bolsa se coloca en un foso. Este biodigestor tiene un costo mucho menor que el anterior, pero posee una vida útil inferior (menos de un 25% de la vida del biodigestor de cúpula fija).

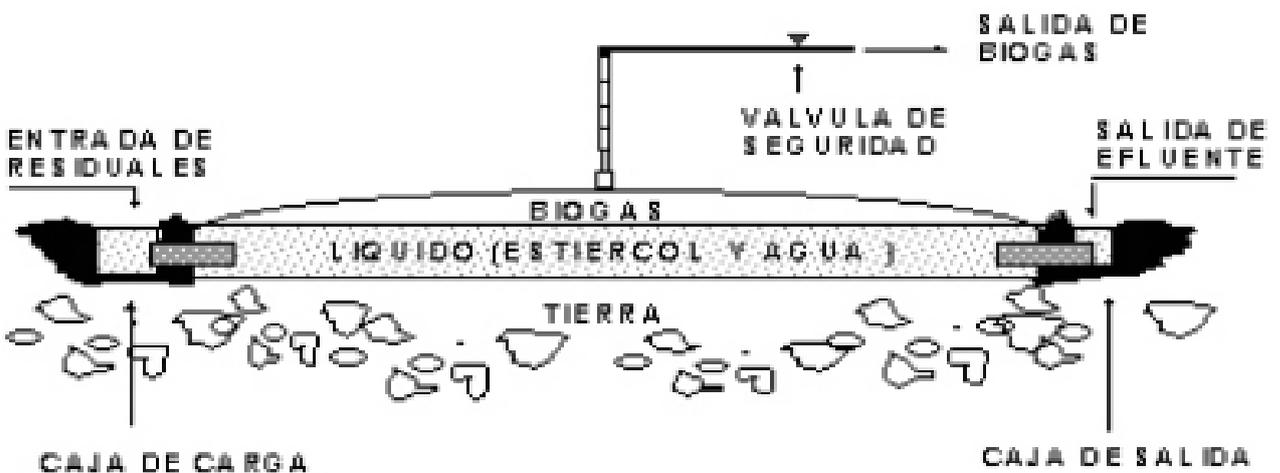


Figura.1.7 Esquema de un biodigestor tubular

Fuente: (R. Sosa, 2007)

Factibilidad de un biodigestor. Caso de estudio "Comunidad Dos Palmas".

En el país se han diseñados y desarrollados biodigestores de este tipo, construyéndose unos pocos en algunos convenios porcinos, financiado por una ONG canadiense, se creó un proyecto para construir 200 biodigestores tubulares de polietileno en las provincias occidentales.

Ventajas:

- Considerable menor costo, facilidad de manejo, transporte e instalación, rápida instalación.
- La reparación puede ser rápida y accesible.
- Se puede construir con materiales locales.
- Facilidad para alcanzar mayores temperaturas de digestión (puede ser calefaccionado utilizando energía solar)
- Limpieza, vaciado y mantenimiento sencillos.

Desventajas:

- Alta sensibilidad del material (mayor en el polietileno que en la geomembrana), por lo que requiere protección externa para evitar daños ocasionados por animales u otros objetos y los rayos solares. Esto hace que su tiempo de vida sea en promedio de 5, pudiendo dañarse antes.
- Dependiendo del daño (tamaño de la ruptura del digestor) se puede tener una baja posibilidad de efectuar una reparación eficaz.
- Ocupa espacio en la superficie porque no está completamente enterrado.
- Requiere de una cantidad de agua mayor que el modelo chino.

1.4.2.4 Tipo laguna anaeróbica cubierta con polietileno de alta densidad:

La laguna anaeróbica cubierta con polietileno de alta densidad es una tecnología desarrollada por el Centro de Tecnología de Biogás de Hanoi (CTBH, 2011) para grandes volúmenes de residuales y una cantidad de sólidos de alrededor del 3%, con bajos costos de construcción y operación. Esta resuelve las limitaciones de las lagunas anaeróbicas descubiertas, las cuales emiten metano a la atmósfera y olores desagradables, e impiden recuperar el biogás. Su fondo y paredes pueden ser de arcilla impermeable, de bloques,

Factibilidad de un biodigestor. Caso de estudio "Comunidad Dos Palmas".

ladrillos u hormigón armado; mientras que la cubierta de PAD flota en la superficie de la laguna y es resistente a los rayos ultravioletas.

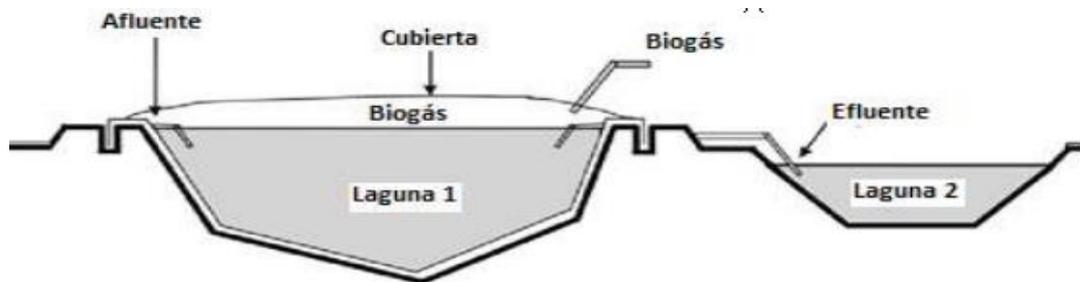


Figura 1.8. Esquema de una laguna anaeróbica cubierta con polietileno de alta densidad.

Fuente: (Tauseef, Premalatha, Abbasi, & Abbasi, 2013)

CAPÍTULO 2.

Materiales y métodos.

2.1 Biodigestor tubular plástico. Criterios para su elección.

En el anterior capítulo se mencionaron como principales ventajas su bajo costo y facilidad en su manejo e instalación, además de poderse transportar a otro lugar luego de determinado tiempo de funcionamiento; a diferencia de otros modelos de biodigestores utilizados a escala doméstica construidos con mampostería. Su instalación no presenta dificultades técnicas y puede ser realizada autónomamente por dos personas en dos o tres días, sin necesidad de un asesoramiento técnico directo y con la utilización de herramientas comunes; lo que además permite la difusión de este modelo mediante la capacitación de campesino a campesino. Aunque su principal desventaja radica en su vida útil relativamente corta, los problemas técnicos en biodigestores de plástico se pueden resolver más fácilmente que en biodigestores construidos con otros materiales como concreto o acero. Para un volumen líquido determinado, un digestor no horizontal (como el modelo chino o hindú), debido a la cercanía entre la entrada y la salida, el desecho agregado puede salir fácilmente del digestor sin ser completamente degradado por las bacterias. En cambio, en un digestor horizontal, debido al movimiento en flujo pistón, el sustrato pasa a través de una zona de máxima digestión en su camino desde la entrada hasta la salida, sin que alguna parte de la mezcla experimente grandes diferencias en su tiempo de retención con respecto a otra. Esto evita el denominado cortocircuito del residuo entre la entrada y la salida. Además, en el caso de que la alimentación contenga alguna sustancia tóxica, la difusión de ésta será menor y por tanto también su efecto inhibitorio en la totalidad de la mezcla.

- La capa superficial, que generalmente se forma en el interior de un digestor, al hacerse más gruesa y compacta constituye un obstáculo a la salida del biogás. El espesor de esta capa es siempre menor en los digestores horizontales porque éstos tienen una mayor relación superficie/volumen para su fase líquida. Además, esta mayor superficie es una ventaja en regiones soleadas donde se puede aumentar la temperatura interna del digestor mediante la utilización de invernaderos.

Factibilidad de un biodigestor. Caso de estudio "Comunidad Dos Palmas".

- Aunque es más fácil reparar y limpiar un digestor instalado sobre el suelo (no enterrado), un digestor horizontal no necesita ser reparado y limpiado con frecuencia como uno vertical. Por otra parte, la ventaja de un digestor enterrado es que puede ser alimentado por gravedad, sin necesidad que el usuario realice esfuerzos adicionales; además de que se protege la fase líquida de cambios bruscos de temperatura debido a la gran inercia térmica del suelo. Finalmente, un digestor horizontal es más adecuado cuando no es posible escarbar en profundidad en el terreno, ya sea por la presencia de una capa rocosa o por el alto nivel freático.

2.2 Cálculo y Diseño de digestores de biogás tubular plástico. (Metodología Vietnamita).

Para el diseño de digestores de biogás hay algunos datos necesarios que pueden ser obtenidos en el lugar donde se va a montar la planta, y otros que deberán ser calculados por los especialistas los datos que deben ser colectados son:

- ◆ Cantidad de material de entrada diario, M_d (kg/día)
- ◆ Tasa de disolución del residual, N (L/día)

A partir de estos se pueden inferir otros datos necesarios:

- ◆ Productividad de biogás, Y (litro/día)
- ◆ Tiempo de retención, RT (día)
- ◆ Coeficiente de contención de gas (K)

Los datos que tendrán que ser calculados son:

- ◆ Cantidad de mezcla (estiércol y agua) de entrada por día, S_d (L/día)
- ◆ Volumen descompuesto, V_d (m^3)
- ◆ Capacidad de equipo, G (m^3 /día)
- ◆ Volumen de contención, V_g (m^3)

Factibilidad de un biodigestor. Caso de estudio "Comunidad Dos Palmas".

- ◆ Volumen del contenedor de gas, V_c (m³)
- ◆ Volumen del espacio muerto, V_c (m³)
- ◆ Volumen real del digestor

2.2.1 Procedimiento para la colecta de datos.

2.2.1.1 Cantidad de residual por día (Md).

La cantidad de estiércol diario depende de la especie animal que esté presente en la explotación. Para estimar el volumen de material que se producirá se debe considerar la cantidad máxima a obtener y también el posible desarrollo del sistema de crianza y la familia en el futuro. La cantidad de estiércol por especie que se genera diariamente podrá ser estimada a partir de los datos de la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Cantidad de estiércol y productividad de biogás, por día, de diferentes sustratos.

Origen del estiércol	Cantidad diaria (kg/cabeza)	Productividad diaria de gas (L/kg estiércol)
Vacuno	15-20	15-32
Búfalo	18-25	15-32
Cerdo	1,2-4,0	40-60
Gallinera	0,02-0,05	50-60
Humano	0,18-0,34	60-70

Fuente: (Luis Cepero Casas, 2012)

2.2.1.2 Tasa de disolución de la mezcla de alimentación, N (L/kg).

En el caso del estiércol de cerdo y el vacuno, normalmente se aplica la tasa de 2 litros por kilogramo de estiércol, aunque la decisión está determinada por el porcentaje de sólidos que tiene el residual a tratar. La cantidad de elemento sólido (CK) óptimo en el estanque de descomposición es de 7 a 9%. En el momento de calcular el volumen de agua para preparar la mezcla, se puede determinar la cantidad de agua a adicionar por cada uno de los tipos de excreta (tabla 2.2).

Tabla 2.2 Porcentaje de sólidos por tipo de residual:

Tipo de estiércol	Elementos solidos (%)
Cerdo	18
Vacuno	16
Búfalo	14
Cabra	30
Avícola	25
Humano	20

Fuente: (Luis Cepero Casas, 2012)

2.2.1.3 Productividad de biogás, Y (L/día).

Para determinar la productividad de biogás en los diferentes sustratos se pueden emplear fórmulas teóricas que calculan, a partir de la composición del sustrato en cuanto a proteínas, carbohidratos y grasas, la productividad teórica de biogás; o utilizar la diferencia entre la entrada y la salida de la demanda química de oxígeno (DQO) del digestor. A partir de estos conocimientos teóricos se han creado tablas tipo para facilitar el trabajo de los técnicos y especialistas. En la tabla 2.3 se muestran los rangos de productividad de

Factibilidad de un biodigestor. Caso de estudio "Comunidad Dos Palmas".

biogás que tienen algunos de los residuales más comunes en los sistemas productivos.

Tabla 2.3 Productividad de biogás por tipo de sustrato.

Tipo de estiércol	Y (L/kg/día)
Vacuno	30
Búfalo	30
Cabra	30
Avícola	30
Humano	60
Cerdo	50

Fuente: (Luis Cepero Casas, 2012)

2.2.1.4 Tiempo de retención, RT (día).

El tiempo de retención es el período que se debe mantener un residual en un ambiente de digestión anaerobia para lograr una disminución de no menos del 80% de la DQO; es decir, es el tiempo que se debe dejar el residual en el interior del digestor para disminuir su carga contaminante y extraer todo su potencial en producción de biogás. Depende del clima de cada zona; con la temperatura baja, el tiempo de retención es mayor, ya que disminuye la actividad metabólica de las bacterias (tabla 2.4).

Tabla 2.4 Tiempo de retención según la temperatura ambiente:

Temperatura ambiente (°C)	Tiempo de retención (días)
12-15	60

15-20	50
>20	40

Fuente: (Luis Cepero Casas, 2012)

2.2.1.5 Coeficiente de contención de gas, K.

El coeficiente de contención de gas se selecciona de acuerdo con la necesidad de uso de gas y se calcula según el propósito de utilización: cuando el gas se utiliza para la cocina e iluminación diaria de la vivienda, solo es necesario almacenarlo por la noche para el uso en 12 horas de día, por ello, $K=12/24=0,5$.

Cuando el uso es para generar electricidad e iluminación en la noche, el máximo tiempo para almacenar el gas es 20 horas/día, o sea, $K = 20/24 =$ casi 0,8.

2.3 Cálculo de los datos para dimensionar el digestor.

2.3.1 Cantidad de mezcla de entrada (estiércol y agua) por día, Sd (L/día).

Al tener el estiércol, con una densidad aproximada a uno, su volumen se puede estimar igual que su peso, es decir, 1 L de estiércol =1 kg. La cantidad de material de entrada por día (suma del estiércol y el agua) se puede calcular mediante la fórmula 1.

$$Sd = (1 + N) * Md \quad (1)$$

N: Tasa de disolución de la mezcla de alimentación.

Md: Cantidad de material de entrada diario.

Por ejemplo, para el estiércol de cerdo y de ganado se aplica la tasa de disolución de $N = 2$, ya que por cada litro de excreta se deben adicionar dos litros de agua, para garantizar menos del 8% de sólidos. La fórmula 2 quedaría entonces de la forma siguiente:

$$Sd = (1 + 2) * Md \quad (2)$$

Volumen descompuesto, Vd (m³)

El volumen descompuesto se calcula considerando el tiempo de retención y la cantidad de material de entrada por día.

$$Vd = \frac{Sd * RT}{1000} \quad (3)$$

En la fórmula anterior, hay una división entre 1 000 ya que la *Sd* se valora por litros y el *Vd*, usualmente, se muestra en metros cúbicos.

2.3.2 Capacidad de planta, G (m³/día).

La capacidad de planta se calcula a partir de la cantidad de material de entrada por día (*Md*) y la productividad de gas de equipo (*Y*):

$$G = \frac{Md * Y}{1000} \quad (4)$$

2.3.3 Volumen de contención del gas, Vg (m³).

Se calcula con la capacidad (*G*) de equipo y el coeficiente de contención de gas (*K*), para lo cual se utiliza la fórmula 5.

$$Vg = K * G \quad (5)$$

Volumen del digestor o planta de biogás.

Con todos estos datos se puede proceder a dimensionar el digestor. Para ello, el volumen real de equipo será:

$$V = Vd + Vg + Vc \quad (m^3) \quad (6)$$

V: volumen real del digestor.

Vd: volumen de contenedor de material y agua.

Vg: volumen de contención del gas.

Factibilidad de un biodigestor. Caso de estudio "Comunidad Dos Palmas".

V_c : volumen de espacio muerto ($V_c = 5-6\%$ de $V_d + V_g$).

Un ejemplo de este procedimiento se describe a continuación. Una familia cría 15 cerdos, con el peso medio de 60 kg/cada uno. Cada día se recogen 50 kg de estiércol (3,3 kg/animal). Esta familia debe construir un equipo de la dimensión siguiente:

$V_d = (50 \times 4) \text{ L/día (tasa de disolución)} \times 50 \text{ días (tiempo de retención)} = 10\,000 \text{ L}$
o 10 m^3

Cantidad de gas recogida al día $G = 50 \text{ L/kg} \times 50 \text{ kg} = 2\,500 \text{ L}$ o $2,5 \text{ m}^3$

$V_g = 0,5$ (coeficiente de contención del gas) $\times 2,5 \text{ m}^3 = 1,25 \text{ m}^3$

$V_c = (V_d + V_g) \times 5\% = 0,563 \text{ m}^3$

El volumen real de planta será: $V = 10 + 1,25 + 0,563 = 11,81 \text{ m}^3$

2.4 Ajuste del volumen calculado a las mangas del material.

El volumen de un digestor de biogás siempre está subordinado a la cantidad de residuales que se generan en el sistema productivo. En el acápite anterior se ilustra la forma de calcular esta variable, imprescindible para el diseño de una planta de biogás. En el caso de los digestores plásticos es similar, solo que se debe ajustar al material del que se disponga.

Las mangas de material usualmente vienen en rollos de 50-100 m, por lo que el especialista debe calcular a qué longitud debe dar el corte para obtener el volumen deseado. Para esto se utilizan fórmulas de geometría básica, en este caso el volumen del cilindro, ya que una manga –una vez inflada– se comporta como un cilindro.

Lo primero es medir el diámetro de la circunferencia que se forma cuando se abre la manga (figura 2.1). Con el diámetro se puede calcular el radio de dicha circunferencia (fórmula 7) y, a partir de este dato, se utiliza la fórmula 8 para el cálculo del volumen del cilindro del digestor, basado en el conocimiento del volumen que se necesita. Mediante el despeje de la fórmula es posible determinar el largo al que se debe cortar la manga.

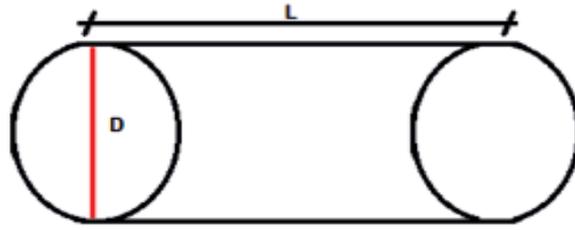


Fig. 2.1. Datos para el cálculo del cilindro.

Fuente: (Giraldo J. Martín, 2012)

-Cálculo del radio:

$$r = \frac{1}{2} * D \quad (7)$$

-Despeje para el cálculo del largo al que se corta la manga:

$$V = \pi * r^2 * L \quad (8)$$

$$L = \frac{V}{\pi * r^2} \quad (9)$$

CAPÍTULO 3.

Resultados y Discusión.

3.1 Caracterización y ubicación de la zona de estudio.

La comunidad de Dos Palmas se encuentra ubicada en la provincia de Santiago de Cuba en la cuenca principal del Rio Cauto, con las coordenadas *Latitud: 20° 7' 12.9" (20.1202°) Norte y *Longitud: 76° 4' 28.8" (76.0747°) Oeste. Cuenta con una población total de 5 162 habitantes. Dicha comunidad cuenta con un Policlínico y 6 Consultorios del Médico y la Enfermera de la Familia, 8 escuelas primarias que atienden a la población infantil del consejo, además, existe una Secundaria Básica y un centro mixto. Su actividad económica fundamental es la agricultura cafetalera que tiene 3 CCS y 1 UBPC y además 1 UBPC ganadera, las cuales producen también cultivos varios. Está conformado por 9 circunscripciones, 11 zonas de los CDR y 71 CDR, 9 bloques de la FMC y 55 delegaciones, 46 secciones sindicales, 18 núcleos del partido y 17 CB de la UJC. La temperatura predominante es de 26,6 °C.

3.2 Datos de los beneficios que reporta un digestor.

Según estudios estos son los beneficios y costo de los materiales de construcción (tabla 3.1) que ofrece un biodigestor a partir de cierta cantidad de cerdos. *fuentes: Fórum Ciencia y Técnica Biodigestores,2018.*

Tabla 3.1. Beneficios que reporta un biodigestor.

Total de cerdos	Volumen del biodigestor (m³)	Producción de biogás por día (m³)	Cocinar (horas)	Electricidad (Kwh/día)	Costo de los materiales
10	4	1.5	1-5	2.24	\$ 26664
20	4	2.9	1-10	4.64	\$ 26664
30	8	4.5	2-7	7.2	\$ 31500
40	12	5.9	2-9	9.44	\$ 40641

Factibilidad de un biodigestor. Caso de estudio "Comunidad Dos Palmas".

50	12	7.4	2-11	11.84	\$ 40641
70	22	10.4	4-8	16.64	\$ 53650
100	22	14.8	4-11	23.68	\$ 53650
200	48	29.5	2-8	47.2	\$ 86288
300	70	44.5	3-8	70.72	\$ 100850

2.3 Materiales y métodos para su construcción.

La información que a continuación aparece está basada en lo esencial, en recomendaciones vietnamitas que se han usado sistemáticamente en toda Indochina. Los materiales se muestran en la tabla 3.2. *fuentes: BTP número5.mayo 2007.*

Tabla 3.2. Materiales necesarios para la construcción de un biodigestor tubular plástico.

Descripción	Cantidad
Capa tubular de polietileno transparente de 280 cm de circunferencia (89 cm de diámetro y grosor de alrededor de 0.2 mm)	
Tubo de cerámica de 100 cm de longitud y 15 cm de diámetro interno	2
Manga plástica con 21 mm de diámetro interno	2 m
Adaptador de PVC de 21 mm de diámetro interno (macho/hembra)	2
Zapatilla de goma de 10 cm de diámetro y 1 mm de grosor y agujero central de 21 mm de diámetro	2

Factibilidad de un biodigestor. Caso de estudio "Comunidad Dos Palmas".

Zapatilla de PVC de 10 cm de diámetro y 1 mm de grosor y agujero central de 21 mm de diámetro	2
Tubería de PVC de 21 mm de diámetro interno	2 m
Tubo rígido de PVC con 21 mm de diámetro interno	5-20 m
Tiras de goma de 5 cm de ancho	4
Botella plástica transparente	1
Codo de PVC de 21 mm de diámetro interno	1
Piezas en T de PVC de 21 mm de diámetro interno	3
Cemento o cola para pegar piezas de PVC	1
Llave metálica de 21 mm	1
Codo metálico de 21 mm	1
Tubería de acero de 21 mm	

2.3.1 Construcción de un biodigestor tubular plástico.

Para la construcción del biodigestor se procede de la forma que se pormenoriza a continuación, **fuentes: Boletín técnico porcino número 5, mayo 2007.**

♦ Se construye una trinchera para acomodar el biodigestor. Las paredes deben ser firmes y el piso plano o solamente con un mínimo de pendiente. No debe haber piedras con filos cortantes o raíces exteriorizadas en las paredes o el piso. La sección transversal de la trinchera para un biodigestor con 80 cm de diámetro tiene unas dimensiones de 100 cm de ancho en la parte superior, 80

Factibilidad de un biodigestor. Caso de estudio "Comunidad Dos Palmas".

cm en la parte inferior, y 80 cm de profundidad. La longitud depende de la cantidad de excreta disponible. El promedio es de 10m por la excreta suministrada por dos vacas u ocho cerdos.

◆ Se cortan dos piezas del tubo de polietileno, cada uno de 11 m de longitud (para un biodigestor de 10 m de longitud), se deposita en un sitio plano, y se inserta una pieza dentro de la otra.

◆ Se practica un agujero pequeño en las dos capas del tubo plástico, aproximadamente a 1.5 m de uno de los extremos. Se coloca una zapatilla de PVC y otra de goma en el adaptador macho que a su vez es insertado a través del agujero, de dentro hacia afuera. Se coloca una segunda zapatilla de PVC y otra de goma en el adaptador macho, por la parte de afuera del tubo, y se asegura firmemente con el adaptador hembra. La salida del adaptador hembra se cierra temporalmente con un pequeño cuadrado de película de polietileno, o cualquier bolsa plástica, y se asegura con una liga de goma.

◆ La tubería de cerámica se inserta en dos tercios de su longitud dentro de uno de los extremos del tubo de polietileno. La capa plástica se dobla cuidadosamente alrededor de la tubería de cerámica y se asegura con las tiras de goma de 5 cm de ancho. Las bandas se enrollan cuidadosamente hasta cubrir completamente los bordes de la capa de plástico del tubo de polietileno, terminando en el tubo de cerámica. Esta tubería de entrada al biodigestor se cierra temporalmente también con un cuadrado de película de polietileno asegurado con la liga de goma.

◆ Desde el extremo abierto, se fuerza la entrada de aire dentro del tubo por oleadas, mediante agitación de este. Inmediatamente después, el tubo se cierra a unos tres m de su extremo de manera que el aire no pueda escapar. El procedimiento de insertar el tubo de cerámica de salida es similar al del otro de entrada, que es lo que se hace a continuación. Este conjunto ya ensamblado se traslada muy cuidadosamente a la trinchera previamente preparada y se deposita en ésta. Los tubos de cerámica se inclinan con un ángulo de 45° y se fijan provisionalmente.

Factibilidad de un biodigestor. Caso de estudio "Comunidad Dos Palmas".

- ◆ El biodigestor se llena con agua hasta ocupar dos tercios de su volumen, moviendo hacia arriba y hacia abajo la salida. El aire atrapado dentro del tubo de polietileno escapa a través de la válvula de seguridad a medida que aumenta del volumen de agua incorporada al sistema.
- ◆ Se prepara una válvula de seguridad mediante una botella plástica transparente, una pieza en T y tres tubos de PVC, uno de 6 cm y dos de 30 cm de longitud respectivamente. Se vierte agua dentro de la botella y se mantiene con una altura de 3-5 cm de distancia con respecto a la boca de la botella.
- ◆ En este momento se agrega al sistema la tubería que conduce a la cocina. Tener en cuenta que esta tubería no debe estar sobre el suelo y que la trampa de agua deberá colocarse en el punto más bajo de la línea de gas.
- ◆ Se puede hacer un reservorio de gas con otra pieza de polietileno de tres a cuatro metros y una pieza de PVC en T. Este reservorio puede colocarse horizontalmente o verticalmente, pero debe ser protegido de la luz solar y se le debe colocar una tira alrededor provista de un peso suspendido para incrementar la presión. El reservorio de gas se debe colocar dentro de la línea de salida del gas tan cerca de la cocina como sea posible, con el fin de maximizar la velocidad de flujo de gas en los quemadores, puesto que el sistema opera a muy baja presión (solamente 3-5 cm de columna de agua).
- ◆ Se deben tomar medidas para proteger el biodigestor, y esto se puede hacer fácilmente mediante la preparación de una cerca en derredor, que evita la incursión de los animales en esa área. Además, se recomienda proteger el biodigestor de la luz solar, colocando algún tipo de cobertura sobre el mismo. Todo esto puede facilitarse a veces mediante la siembra de algún tipo de plantas que den abundante follaje.

CONCLUSIONES

Y

RECOMENDACIONES

Conclusiones:

1-El biogás resulta un combustible barato y útil sobre todo en comunidades rurales que se encuentran alejadas de los grandes centros urbanos.

2-El uso de la biomasa aporta beneficios que no son solo energéticos:

a) Es un sistema idóneo de eliminación de residuos,

b) Puede ser un modo de equilibrar determinados excedentes agrícolas. En el sector rural, la principal forma de contaminación es el estiércol, que genera malos olores. La opción del uso del estiércol permite responder a una demanda de la sociedad,

3-La eficiencia de esta tecnología en la resolución de problemas en materia del medio ambiente, especialmente su funcionalidad, sería el medio de difusión más eficaz, para que, en el corto o mediano plazo, se generalice la implantación de esta tecnología.

4-El sector energético nacional ha sido y seguirá siendo pilar de nuestro desarrollo presente y futuro. Su expansión constante y modernización en algunas de sus partes, han permitido generar una oferta sólida y diversificada de energéticos que además aporta importantes recursos públicos para la satisfacción de apremiantes necesidades sociales.

5-Es evidente que la inversión que se tendrá que realizar para arrancar como una posibilidad real la tecnología del biogás en Cuba, es grande, sin embargo, los beneficios también son muy grandes e importantes, por lo tanto, se justifica.

Recomendaciones:

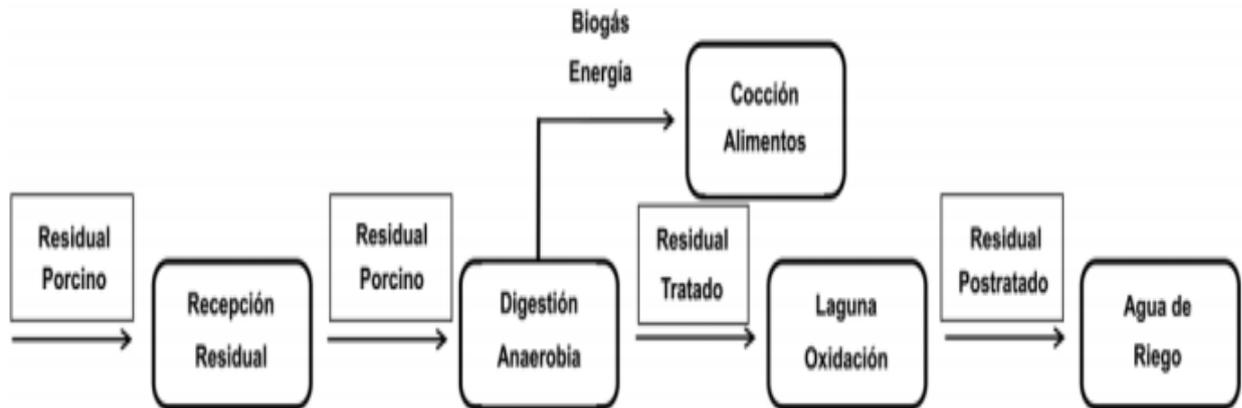
- - Es importante aprovechar el conocimiento de las experiencias que han tenido otros países en este sentido, para no cometer los mismos errores y, sobre todo, para consolidar la tecnología del biogás como un importante sector para la sociedad.
- Implementar el empleo y construcción de estas fuentes renovables de energía.
- Posibilitar el aprovechamiento del abono, resultado del proceso de degradación de la materia orgánica para uso agrícola.
- Investigar otras metodologías para el diseño y construcción de biodigestores.
- Incentivar entre los compañeros del gobierno local el empleo de técnicas como la analizada a fin de mejorar las condiciones higiénico-sanitarias de la comunidad y al mismo tiempo crear nuevas fuentes de trabajo.
- Las actividades agrícolas y ganaderas deben ser más respetuosas del medio ambiente, y en particular deben promover la reducción de posibles fuentes de contaminación

Referencias Bibliográficas:

- 1- SÁNCHEZ, E. J. V.: *Introducción a la producción de biogás*, Cárdenas, Matanzas, Cuba, 2005.
- 2- COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA: La Habana, Cuba, *Revista Energía*, (1), 1986.
- 3- COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA: La Habana, Cuba, *Revista Energía*, (1), 1990.
- 4- COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA: La Habana, Cuba, *Revista Energía*, (2) 1991.
- 5- Agencia Andaluza de la Energía. Consejería de economía, innovación y ciencia. Junta de Andalucía. (2011). *Estudio básico del biogás*. Andalucía: Junta de Andalucía.
- 6- Blanco, D. *et al.* 2011. Manual para el diseño, montaje y operación de digestores plásticos de bajo costo.
- 7- Díaz Piñón, M.R. 2009. Energía y fertilizantes a partir de los residuos orgánicos. Presentación en Taller Nacional de Biogás, febrero, GRUPOR, Santiago de Cuba.
- 8- Blanco, D. *et al.* 2012. Manual para el diseño, montaje y operación de digestores de cúpula fija. Una alternativa para Cuba. Estación Experimental "Indio Hatuey", Matanzas, Cuba.
- 9- DAMAS, M. R.: Plantas de biogás de pequeñas dimensiones para comunidades rurales, Ministerio de la Agricultura, La Habana, Cuba, (plegable), 2000.
- 10- <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energuía/Energia22/HTML/articulo04.htm>
- 11- Santos Abreu, I., Medina Morales, N., Machado Muro, Y. y Martín Santos, T. M. (2011). La Educación Agropecuaria en la Escuela Cubana Actual. Centro de Estudio de la Educación Ambiental. Villa Clara, Cuba: Editorial "Félix Valera Morales".
- 12- Omar, V. D. (2002). Planta de biogás de pequeñas dimensiones. Cuba: Sin Editorial.

Anexos:

Anexo 1. Diagrama de bloque del proceso para la obtención de Biogás



Fuente: (José A. Guardado, 2012)

Anexo 2. Tabla a.1. Ventajas y desventajas de los biodigestores domésticos más comunes.

Biodigestor	Ventajas	Desventajas
Modelo hindú	<ul style="list-style-type: none"> -Relativa facilidad en su construcción. La presión del gas almacenado es constante ya que es regulado por el peso del gasómetro. -El volumen del gas almacenado es visible directamente. 	<ul style="list-style-type: none"> -La parte de acero es susceptible de corrosión por lo que estas plantas tienen un menor tiempo de vida (poco más de 5 años) que las de domo fijo. -Si el alimento contiene material flotante (como fibras o paja) el gasómetro puede atascarse en la escoria resultante.
Modelo chino	<ul style="list-style-type: none"> -Tiempo de vida muy largo. -Menores costos de construcción que uno de cúpula flotante. -Por su construcción debajo del suelo no ocupa espacio en la superficie, y está protegido de los 	<ul style="list-style-type: none"> -Debido a la presión del gas, incluso una pequeña grieta en la mampostería del domo puede causar grandes pérdidas de biogás. -Necesita personal experto en su

Factibilidad de un biodigestor. Caso de estudio "Comunidad Dos Palmas".

	<p>cambios de temperatura.</p>	<p>construcción.</p> <ul style="list-style-type: none">-Mayor complejidad en construcción y mantenimiento (vaciarlo cada cierto tiempo para identificar las posibles fisuras en la cúpula).-La presión del gas varía enormemente dependiendo del volumen de éste almacenado.-A pesar de que la construcción bajo el suelo amortigua las temperaturas extremas, la temperatura de fermentación al interior del biodigestor es baja.
Modelo taiwanés	<ul style="list-style-type: none">-Considerable menor costo, facilidad de manejo, transporte e instalación, rápida instalación.-La reparación puede ser rápida y accesible.-Facilidad para alcanzar mayores temperaturas de digestión.-Limpieza, vaciado y mantenimiento sencillos.	<ul style="list-style-type: none">-Alta sensibilidad del material (mayor en el polietileno que en la geomembrana), por lo que requiere protección externa para evitar daños ocasionados por animales u otros objetos y los rayos solares. Esto hace que su tiempo de vida sea en promedio de 5, pudiendo dañarse antes.-Dependiendo del daño se puede tener una baja posibilidad de efectuar una reparación eficaz.-Ocupa espacio en la superficie porque no está completamente enterrado.-Requiere de una cantidad de agua mayor que el modelo chino.

Factibilidad de un biodigestor. Caso de estudio "Comunidad Dos Palmas".

Anexo3. Montaje del primer biodigestor del modelo biobolsa que se instaló en Cuba, como polígono de experimentación.



Fuente: (José A. Guardado, 2012)

Anexo 4. Reservorio de biogás instalado.



Fuente: (José A. Guardado, 2012)

Anexo 5. Tabla a.2 Diámetro de la tubería para el gas según el volumen del reactor.

No.	Volumen de fermentación del reactor (m ³)	Diámetro de la tubería principal (mm)
1	≤ 49	10
2	> 50	20
3	>75	20
4	> 100	25
5	> 150	32
6	> 200	32
7	> 250	42

Fuente: (José A. Guardado, 2012)