



Grupo eumed.net / Universidad de Málaga y
Red Académica Iberoamericana Local-Global
Indexada en IN-Recs (95 de 136), en LATINDEX (33 DE 36), reconocida por el DICE, incorporada a la
base de datos bibliográfica ISOC, en RePec, resumida en DIALNET y encuadrada en el Grupo C de la
Clasificación Integrada de Revistas Científicas de España.

Vol 11. N° 31
Febrero 2018
www.eumed.net/rev/delos/

DISEÑO DE BIODIGESTOR A ESCALA DE LABORATORIO PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA E INDUSTRIALIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS DESECHOS SÓLIDOS MUNICIPALES

Leandro L. Lorente Leyva¹
llorente@utn.edu.ec

Gerardo Collaguazo Galeano¹
gicollaguazo@utn.edu.ec

Israel D. Herrera Granda¹
idherrer@utn.edu.ec

Ramiro V. Saraguro Piarpuezan¹
rvsaraguro@utn.edu.ec

Arllys M. Lastre Aleaga²
arllys.lastre@ute.edu.ec

Alexis Cordovés García²
alexis.cordoves@ute.edu.ec

Ecuador

CONTENIDO

Resumen	2
Abstract	2
1 Introducción.....	4
1.1 Antecedentes	4
1.2 Justificación	5
2 Marco teórico	5
2.1 Digestión Anaerobia.....	5
2.2 Parámetros Ambientales y de Control	8
2.3 Tipos de Biodigestores	9
2.4 Tipos de Diseños de Digestión Anaerobia para los Residuos Sólidos Orgánicos	10
2.5 Reactores de digestión anaeróbica	12
2.6 Potencial de Producción de Metano de los Residuos Sólidos Orgánicos	14
2.7 Función Utilitaria	15
3 Biodigestor a escala de laboratorio.....	16
3.1 Estructura de un Biodigestor	16
3.2 Factores de Construcción	16
4 Conclusiones.....	21
5 Recomendaciones	22
6 Bibliografía	22

¹ Profesores Investigadores de la Universidad Técnica del Norte - UTN, Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, Ingeniería Industrial, Ecuador.

² Profesores Investigadores de Universidad Tecnológica Equinoccial - UTE, Sede Santo Domingo, Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador.

RESUMEN

El sector energético está en búsqueda constante de nuevas fuentes limpias de energía, tanto para suplementar la producción de esta, como también para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y su reemplazo gradual basado en métodos de desarrollo sostenible. En este contexto, los desechos municipales son considerados como fuente de energía renovable, por cuanto tienen un contenido elevado de biomasa (papel, cartón, residuos de alimentos, madera, paja, hojas). Una alternativa de fuente renovable con grandes perspectivas de futuro es la utilización y valoración energética de los desechos sólidos municipales. La presente investigación persigue como objetivo el diseño de un biodigestor a escala de laboratorio para la industrialización energética de los desechos sólidos municipales, sirviendo como base para la construcción de un prototipo a escala piloto o de una planta para el tratamiento anaerobio de estos desechos generados. De esta manera, se podrá recuperar la energía contenida en los mismos, con el fin de reducir el flujo de los desechos destinados a los vertederos y proporcionar una tasa de producción para la obtención de biogás, tomándose como base fundamental para los cálculos de diseño y la mejora de la producción a nivel de laboratorio, por medio de la co-digestión con otros tipos de desechos orgánicos y utilización de sustancias inoculantes alcalinas y la determinación de la tecnología de digestión anaerobia más adecuada para el tratamiento de desechos sólidos municipales.

Palabras claves: Diseño; Biodigestor; Digestión Anaerobia; Residuos Sólidos Municipales; Biogás

ABSTRACT

The energy sector is in constant search of new clean sources of energy, both to supplement its production, as well as to reduce dependence on fossil fuels and its gradual replacement based on sustainable development methods. In this context, municipal waste is considered as a renewable energy source, since they have a high biomass content (paper, cardboard, food waste, wood, straw, leaves). A renewable source alternative with great prospects for the future is the use and energetic valuation of municipal solid waste. This research aims at the design of a laboratory-scale biodigester for the energetic industrialization of municipal solid waste, serving as a basis for the construction of a prototype on a pilot scale or a plant for the Anaerobic treatment of these generated wastes. In this way, it will be possible to recover the energy contained in them, in order to reduce the flow of the waste destined to the landfills and to provide a production rate for the obtaining of biogas, taking as fundamental basis for the calculations of design and the Improvement of laboratory-level production, through co-digestion with other types of organic waste and use of alkaline inoculating substances and determination of the most appropriate anaerobic digestion technology for waste treatment Municipal solids.

Keywords: Design; Biodigester; Anaerobic digestion; Municipal Solid Waste; Biogas

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad la demanda de energía ha producido un desequilibrio ambiental, teniendo en cuenta que los recursos naturales son solo potencialmente renovables, a causa de la intervención del hombre y el crecimiento poblacional hace que estos recursos pierdan su potencial renovación por la creciente y desmedida demanda de combustibles fósiles. El uso de los combustibles fósiles trae problemas, los cuales se derivan en contaminación atmosférica, contaminación al agua y suelo, y el fenómeno del calentamiento global teniendo en cuenta que las reservas de combustibles fósiles son limitadas y a corto o mediano plazo se necesitan fuentes alternativas de combustible entre ellos los combustibles producidos biológicamente o biocombustibles.

Considerando el beneficio que se puede obtener a partir de la producción de energía por medio de biodigestores, es de importancia aprender el diseño, ya que se dispone de la materia prima para su funcionamiento. (Balasubramanya, 1988).

El diseño se ha orientado hacia el aprovechamiento de residuos orgánicos sólidos provenientes de residuos de frutas, verduras y comida; de este modo, el proyecto podrá servir como guía para el diseño de biodigestores similares, posteriores usos y aplicaciones de este, con recomendaciones y consejos prácticos.

Aplicar este tipo de tecnología daría un cambio radical en medio ambiente, ya que con solo una familia el impacto puede ser enorme si se analiza anualmente. Ya existen algunos países que quieren optar por esta opción energética y son muchas las empresas que han apostado por un cambio tan grande. En Ecuador existen innumerables implementaciones de estos biodigestores en diferentes provincias de nuestro país, Cotopaxi, Tungurahua, Carchi, y más concretamente Imbabura que es un lugar en donde el uso un biodigestor no suena descabellado pues los desechos sólidos es una materia nada difícil de conseguir.

Actualmente ya se usa biodigestores anaerobios a escala piloto, estos se encuentran en la zona de Intag y ha tenido grandes resultados. (Appels, 2008).

1.1 Antecedentes

Siendo el Ecuador un país agrícola y ganadero, existe gran potencial para la explotación de este recurso de energía. Del análisis bibliográfico realizado para esta investigación, se ha llegado a la conclusión de la existencia de varios proyectos de emprendimiento para la generación de biogás a partir de la caña de azúcar y la cascarilla de arroz, entre otros, que ya han demostrado la viabilidad del desarrollo de este trabajo.

La necesidad de diseñar este prototipo nace con el objetivo de colaborar con la reducción de contaminación y aprovechar los recursos que se generan del proceso de la biodegradación obteniéndose de biogás y biol o biocarbono. (Balasubramanya, 1988)

La aplicación de sistemas biodegradables y usos de energías alternativas renovables contribuye con la conservación del medio ambiente, así; la perspectiva que presente la investigación del sistema biodigestor es contribuir a un desarrollo técnico en beneficio a la sociedad e impulsar al sector industrial. Los beneficios que se obtienen con el sistema biogás se presentan en las mismas condiciones que le GLP, pudiendo a futuro remplazarlo con esta tecnología más limpia y económica. (Bolzonella, 2003)

1.2 Justificación

El biogás radica especialmente en dos aspectos fundamentales: la fácil obtención de la materia prima (desechos generados de papel, cartón, residuos de alimentos, entre otros) y el bajo costo del biodigestor, incluso muchos de los biodigestores se componen de materiales reciclados, en especial los que son realizados para fines menores como experimentos en familias o hasta haciendas ya para aquellos biodigestores industriales los materiales pueden cambiar pero no por ello se vuelve algo extremadamente costoso. (Bolzonella, 2003)

Tomando en cuenta que de este modo protegería el medio ambiente, para o que se puede destacar otros beneficios como:

- Mejorar las condiciones higiénicas.
- Utilización del gas metano como fuente alternativa.
- Empleo del bioabono como fertilizante natural.

Con el uso del biodigestor se resolverán una serie de problemas que enfrentan en el país tanto en el sector rural como urbano para lo que se necesita una tecnología amiga del medio ambiente, este tipo de tecnología es una muestra clara de que nada en el mundo puede considerarse como desecho inutilizable (Appels, 2008).

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia, también conocida como biometanización, es un proceso natural que sucede en condiciones de ausencia de oxígeno. En este proceso microbiológico se fermenta la materia orgánica transformándola por la acción bacteriana en biogás (compuesto por CH₄ y CO₂ principalmente) y produciendo un fertilizante rico en nutrientes mineralizados y por tanto en disposición inmediata para las plantas. Los digestores, también conocidos como biodigestores, son reactores cerrados que facilitan la digestión anaerobia proporcionando una atmósfera anaeróbica para los organismos responsables de dicho proceso. (Balasubramanya, 1988)

La fermentación anaeróbica es un proceso biológico en el cual la materia orgánica se degrada sin la presencia de oxígeno atmosférico para producir agua, dióxido de carbono y metano. Luis Pasteur definió este proceso como la vida sin aire (Romero, 2000). Este fenómeno ocurre

naturalmente, sin la intervención humana, cuando la materia orgánica permanece en ausencia de oxígeno. Existen condiciones específicas que son suministradas para permitir el crecimiento de bacterias anaeróbicas (Melosi, 2008). Estas condiciones pueden ocurrir en ambientes naturales como en sedimentos de lagos y en tractos gastrointestinales de animales o pueden ser creadas en procesos industriales, semi-industriales y rurales (Hiler et al., 1985). La principal condición para la existencia de estas bacterias es la ausencia de oxígeno. Las especies de bacterias que crecen en condiciones anaeróbicas y producen metano son conocidas como metanogénicas y las principales son: *Methanobacterium*, *Methanobacillus*, *Methanococcus* y *Methanosarcinas*. Estas bacterias pueden crecer en un amplio rango de temperatura y se desarrollan fácilmente en ambientes de pH neutro (Monroy, 1990).

2.1.1 Proceso Biológico

La digestión anaerobia es un proceso multi-etapa y de reacciones paralelas donde diferentes tipos de bacterias degradan la materia orgánica sucesivamente. Se identifican grandes poblaciones bacterianas, las cuales se desarrollan catalizando tres procesos consecutivos: hidrólisis, acidogénesis (formación de ácidos) y metanogénesis (formación de metano), constituyendo cuatro etapas (Elías et al., 2012). A continuación, se describen cada una de las etapas. (Botero, 1987). Se lleva a cabo en tres pasos: el primero es la hidrólisis de carbohidratos, lípidos y proteínas. El segundo paso, que ocurre inmediatamente después, es la acetogénesis de los productos de la hidrólisis que son convertidos en ácidos grasos, hidrógeno y dióxido de carbono. Por último, el tercer paso es la metanogénesis donde intervienen las bacterias metanogénicas que utilizan el ión acetato y el hidrógeno para formar metano y dióxido de carbono (Hiler et al., 1985).

2.1.1.1 Hidrólisis

En la etapa inicial los compuestos orgánicos complejos, como lípidos, hidratos de carbono y proteínas son transformados en productos solubles y degradables, como azúcares, alcoholes, etc. El grupo de bacterias que actúa en esta primera etapa son las bacterias hidrolíticas acidogénicas (1 en figura 1). La actividad hidrolítica tiene una importancia significativa en residuos de alto contenido orgánico y puede convertirse en la fase limitante del proceso. Algunos métodos industriales mejoran la hidrólisis con el uso de agentes químicos. (Botero, 1987) (Verma, 2002).

2.1.1.2 Acidogénesis.

Las mismas bacterias degradan los productos obtenidos en la hidrólisis, produciendo ácidos grasos volátiles (AGV) (ácidos propiónicos, butírico y valérico), ácido acético (CH_3COOH ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$)), hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2). (Botero, 1987)

2.1.1.3 Acetogénesis

En esta etapa los compuestos intermedios se convierten en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono gracias a la actividad de las bacterias acetogénicas (2 en figura 1). La descomposición anaerobia de los ácidos propiónico y butírico no es termodinámicamente posible para presiones parciales del hidrógeno relativamente elevadas (Elías et al., 2012), y por consiguiente, es necesaria la presencia de poblaciones de bacterias capaces de eliminar el hidrógeno generado en esta etapa. El hidrógeno puede ser consumido por bacterias metanogénicas hidrogenofilas (4 en figura 1) y también por bacterias homoacetogénicas (3 en figura 1), capaces de producir CH_3COOH a partir de H_2 y CO_2 . (Bouallagui, 2003)

2.1.1.4 Metanogénesis.

La cuarta y última etapa conlleva la transformación bacteriana del hidrógeno y el ácido acético producidos en las etapas anteriores en metano y dióxido de carbono. Se distinguen dos tipos de bacterias, las metanogénicas acetoclásticas (5 en figura 1) que transforman el acetato en metano, y las metanogénicas hidrogenófilas que convierten el hidrógeno y el dióxido de carbono en metano. Aproximadamente el 70 % del metano producido en esta etapa se genera por medio de las bacterias acetoclásticas, y el 30 % restante gracias a las hidrogenófilas. Normalmente, las bacterias metanogénicas tienen un crecimiento más lento que las bacterias de las etapas anteriores, por lo que su crecimiento tiende a ser la etapa limitante del proceso (Rittmann y McCarty, 2001), sin embargo, para residuos en los que la materia orgánica esté en forma de partículas, la fase limitante es la hidrólisis, proceso enzimático cuya velocidad depende de la superficie de las partículas. (Bouallagui, 2003) (Díaz de Basurto, 2013).

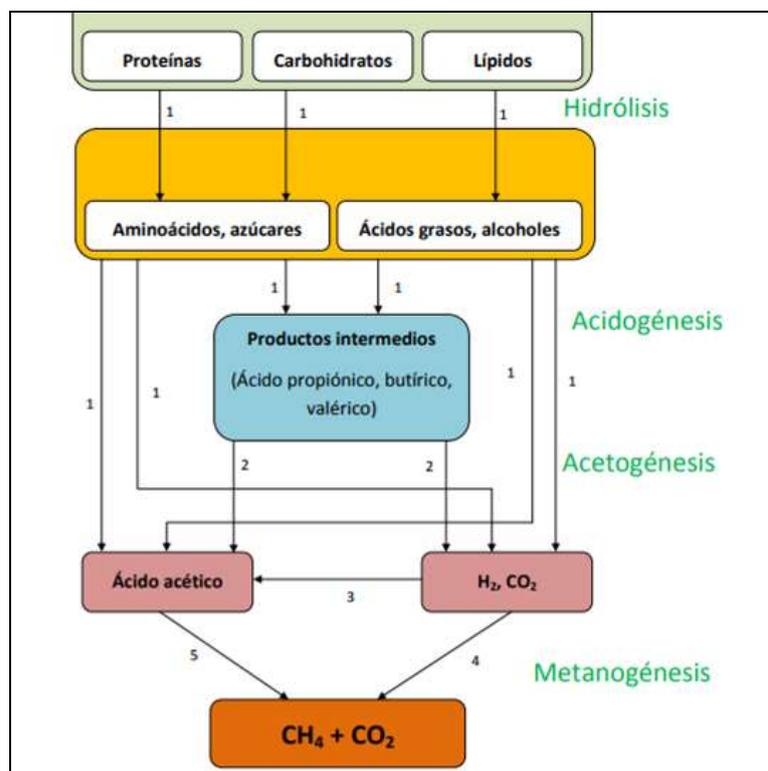


Figura 1. Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones de microorganismos (Díaz de Basurto, 2013):

- 1) Bacterias hidrolíticas acidogénicas; 2) Bacterias acetogénicas;
- 3) Bacterias homoacetogénicas; 4) Bacterias metanogénicas hidrogenófilas;
- 5) Bacterias metanogénicas acetoclásticas (adaptado de Nayono, 2009).

2.2 Parámetros Ambientales y de Control

Existen varios factores que pueden afectar, mejorando o inhibiendo, el funcionamiento del proceso de digestión anaerobia. Estos factores, que se describen a continuación, son el pH, la temperatura, los nutrientes, carga orgánica, concentración de sólidos en el afluente, nutrientes disponibles, el tiempo de retención y velocidad de carga orgánica, la agitación y las sustancias inhibidoras. (Botero, 1987)

2.2.1. pH

El valor del pH es un importante indicador del funcionamiento del proceso dentro del biodigestor. Según Elías et al. (2012), en cada fase los microorganismos muestran actividad máxima en un rango de pH diferenciado (Tabla 1). El mayor problema generalmente es mantener el pH por encima de 6,6, ya que los ácidos orgánicos producidos como intermediarios en las primeras etapas debido a una sobrecarga o cualquier otro desequilibrio pueden provocar un rápido descenso del pH y el consiguiente cese de la producción de metano (Rittmann y McCarty, 2001). La alcalinidad y el pH en la digestión anaerobia pueden ajustarse añadiendo a la mezcla diferentes productos químicos (bicarbonato de sodio y potasio, carbonato de calcio, etc.) y también mezclando diferentes residuos a tratar en el reactor (codigestión). (Díaz de Basurto, 2013).

Etapas	Tipo de bacterias	Rango óptimo pH
Hidrólisis	Hidrolíticas acidogénicas	7,2 – 7,4
Acidogénesis	Hidrolíticas acidogénicas	7,2 – 7,4
Acetogénesis	Acetogénicas y homoacetogénicas	7,0 – 7,2
Metanogénesis	Metanogénesis y acetogénesis	6,5 – 7-5

Tabla 1. Rangos óptimos de pH para los diferentes microorganismos

Fuente: adaptado de Elías et al., 2012

2.2.2. Temperatura

La temperatura es uno de los parámetros más importantes en la digestión anaerobia, ya que determina la velocidad de degradación del proceso anaeróbico, principalmente las de las etapas de hidrólisis y metanogénesis. Existen tres rangos de temperatura en los que la digestión anaerobia puede llevarse a cabo:

- Psicrófilo: por debajo de 25 °C
- Mesófilo: entre 30 y 40 °C

- Termófilo: entre 50 y 60 °C

Con el aumento en el rango de temperaturas se aumenta la tasa de hidrólisis, la velocidad de crecimiento y con ello la velocidad en la producción de biogás. (Elías et al., 2012) (Fernández et al., 2008)

2.2.3. Tiempo de retención hidráulico y velocidad de carga orgánica

El tiempo de retención hidráulico (TRH) es la medida que describe el tiempo promedio que una sustancia reside en el reactor. Al aumentar el TRH, aumenta el grado de materia orgánica degradada, así como la producción de metano. La velocidad de carga orgánica (VCO) se define como la cantidad de materia orgánica alimentada por volumen de biodigestor en un determinado periodo de tiempo. En ausencia de inhibidores, altas cargas orgánicas proporcionan altas producciones de metano, aunque también aumenta el riesgo de sobrecargas puntuales que conllevan a la acidificación del reactor provocando un descenso del pH y el posible fallo del sistema. (Botero, 1987)

2.3 Tipos de Biodigestores

La biodigestión a escala familiar ha sido ampliamente difundida en países como China o India desde el último cuarto del siglo pasado y más recientemente en Nepal (Biogas Support Programme), típicamente en digestores de cúpula fija (tipo chino) o de cúpula flotante (tipo indio). Sin embargo, la complejidad de su construcción y un coste relativamente elevado pueden ser limitantes para su implementación. Los biodigestores tubulares de plástico, de construcción simple y económica, permiten una mayor expansión de esta tecnología (Preston, 2002). Posibles materiales para su construcción son el polietileno y el PVC (geomembrana), siendo el último más resistente pero también más costoso (Pedraza et al., 2002).

2.3.1 Biodigestores de flujo continuo

Un reactor de flujo continuo es aquel que tiene un afluente y un efluente continuos. En el reactor de flujo continuo se tiene un intercambio de masa a lo largo del tiempo de operación. Donde se busca llegar al estado estacionario mediante el control de las condiciones de operación que son la concentración de sustrato, el pH y la temperatura (Winkler, 1986).

2.3.2 Biodigestores de flujo discontinuo

La carga de la totalidad del material a fermentar se hace al inicio del proceso y la descarga del efluente se hace al finalizar el proceso; por lo general requieren de mayor mano de obra y de un espacio para almacenar la materia prima si esta se produce continuamente y de un depósito de gas (debido a la gran variación en la cantidad de gas producido durante el proceso, teniendo su pico en la fase media de este) o fuentes alternativas para suplirlo.

2.3.3 Biodigestores de flujo semicontinuo

La carga del material a fermentar y la descarga del efluente se realiza de manera continua o por pequeños baches (ej. una vez al día, cada 12 horas) durante el proceso, que se extiende indefinidamente a través del tiempo; por lo general requieren de menos mano de obra, pero de una mezcla más fluida o movilizada de manera mecánica y de un depósito de gas (si este no se utiliza en su totalidad de manera continua). Los biodigestores continuos sirven para purificar el agua contaminada por diferentes fosas.

Existen tres clases de biodigestores de flujo continuo:

- De cúpula fija (chino).
- De cúpula móvil o flotante (hindú).
- De salchicha, tubular, Taiwan, CIPAV o biodigestores familiares de bajo costo.

2.3.4 El sistema Hindú

El biodigestor hindú fue desarrollado en la India después de la Segunda Guerra Mundial en los años 50, surgió por necesidad, ya que los campesinos necesitaban combustible para los tractores y calefacción para sus hogares en épocas de invierno, luego cuando terminó la guerra se volvió a conseguir combustibles fósiles por lo que dejaron los biodigestores y volvieron a los hidrocarburos (Zepeda y Amaya, 2013). Como la India es pobre en combustibles se organizó el proyecto KVICK (Kaddi Village Industri Commision) de donde salió el digestor Hindú y el nombre del combustible obtenido conocido como biogás. Este digestor trabaja a presión constante y es muy fácil su operación ya que fue ideado para ser manejado por campesinos de muy poca preparación.

2.3.5 El sistema Chino

El biodigestor chino fue desarrollado al observar el éxito del biodigestor Hindú, el gobierno chino adaptó esta tecnología a sus propias necesidades, ya que el problema en China no era energético sino sanitario. Los chinos se deshicieron de las heces humanas en el área rural y al mismo tiempo obtuvieron abono orgánico, con el biodigestor se eliminan los malos olores y al mismo tiempo se obtiene gas para las cocinas y el alumbrado. El biodigestor chino funciona con presión variable ya que el objetivo no es producir gas sino el abono orgánico ya procesado (Ecured, 2010).

2.4 Tipos de Diseños de Digestión Anaerobia para los Residuos Sólidos Orgánicos

Debido al incremento en la demanda de la digestión anaerobia de los residuos sólidos orgánicos, en las últimas dos décadas se han implementado diferentes diseños de plantas de digestión anaerobia, tanto de alta como de baja tecnología.

A continuación, se realiza una breve descripción de las tecnologías. (Cecchi, 1986)

2.4.1 ASTRA.

El centro ASTRA ha desarrollado dos tipos de reactores para tratar los residuos sólidos orgánicos; los sistemas RBFP y LES. El primero (Figura 2) es un reactor de flujo pistón horizontal, pero con una etapa de pretratamiento dentro del propio reactor. El sustrato se introduce en el reactor, iniciándose una rápida digestión debido a que se mantiene debajo del líquido del reactor, provocando que las fracciones fáciles de digerir se diluyan rápidamente. Este tipo de pretratamiento (en el interior del reactor) evita la necesidad de tener que pre-tratar el sustrato previamente, por lo que supone una ventaja tanto operacional como económica. (Cecchi, 1986)

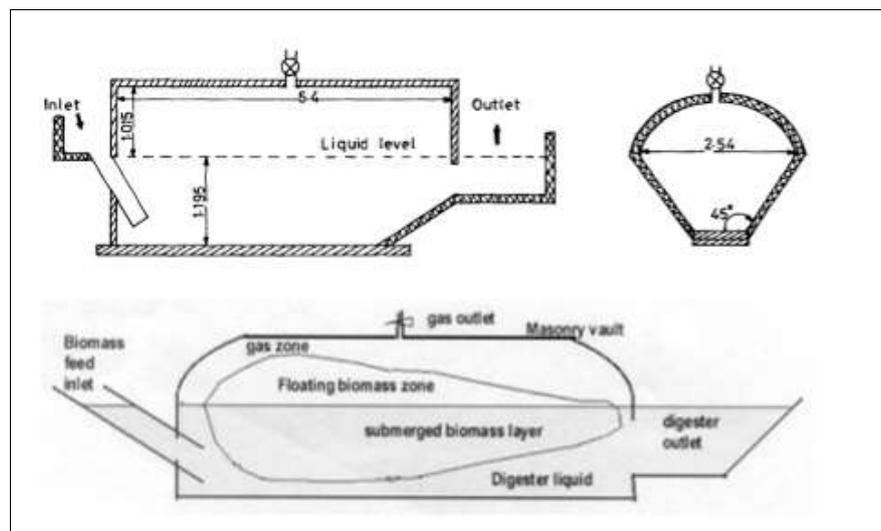


Figura 2. Reactor RBFP, diseño (arriba) y funcionamiento (abajo)
(Fuente: Jagadish et al., 1998 y Chanakya et al., 2004)

2.4.1.1 Sumersión forzada

El sistema ASTRA se aprovecha de la propiedad de flotación de los residuos sólidos orgánicos, ya que, en lugar de combatirla, la utiliza como parte del proceso. La costra generada en la interfase líquido-gas posibilita que el sustrato nuevo introducido se mantenga bajo el líquido del reactor. La sumersión en la parte inicial del reactor evita la flotación de los sólidos nuevos añadidos, y por lo tanto la formación de más costra. Además, Chanakya et al. (2009a) aseguran en su estudio que entre un 75% y 95% de ST y SV de los residuos de frutas y verduras se descomponen en un tiempo de residencia de 4 días cuando estos se mantienen sumergidos en el líquido del reactor. Esta especie de pre-tratamiento dentro del mismo reactor también es beneficioso para uno de los mayores problemas que se generan al tratar residuos sólidos orgánicos, la sobreproducción de AGV, ya que según Jagadish et al. (1998) y Chanakya et al. (2004) los AGV se diluyen rápidamente a través del líquido del biodigestor, evitando así su sobreproducción. (Cecchi, 1986)

2.4.1.2 Rotura de costra

Esta otra característica se basa en el trabajo de Raman et al. (1989). Este autor introduce una red de nylon (Figura 3), colocada en el centro de fluctuación del líquido del reactor, para romper la costra generada en la interfase líquido-gas y que puede interferir de forma negativa en la producción uniforme del gas. Cuando el líquido fluctúa debido a la presión del gas generado en el proceso, la costra atraviesa la red de nylon, rompiéndose.

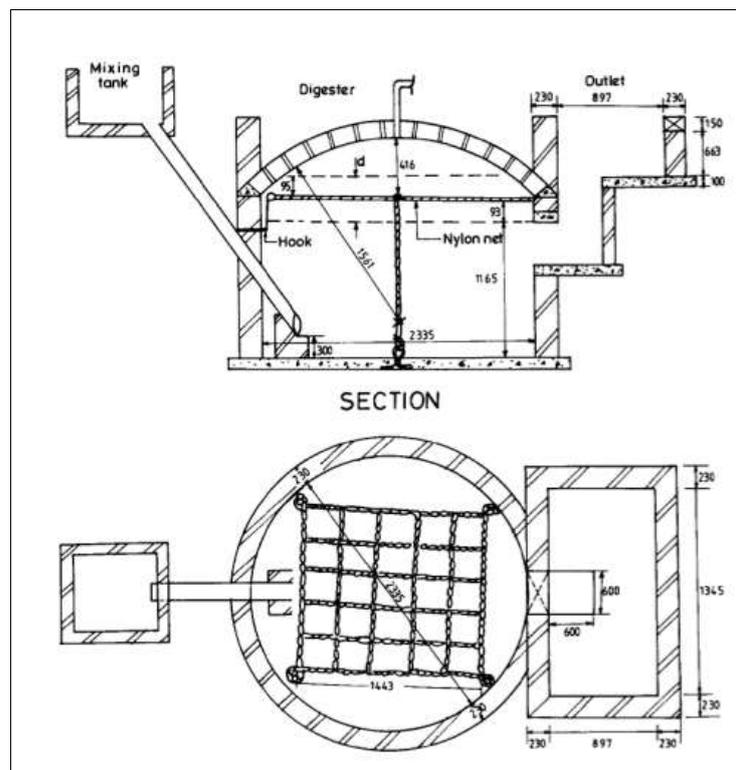


Figura 3. Planta de biogás con la red de rotura de costra
(Fuente: Raman et al., 1989)

2.5 Reactores de digestión anaeróbica

2.5.1 Biodigestor a escala de laboratorio

Según Kim Oanh et al. (2013) en el estudio que realizaron a escala de laboratorio se usaron reactores cilíndricos de 45 litros ubicados en el interior. Los reactores se aislaron con espuma de poliuretano para minimizar las variaciones de la temperatura del reactor que podrían afectar el proceso de digestión anaerobia. Cada reactor fue cerrado herméticamente con cinta de goma y un tapón de rosca para asegurar condiciones anaerobias. Durante el proceso el líquido fue reciclado sobre el reactor. El líquido reciclado se obtuvo por filtración del efluente del digestor a través de una pantalla (tamaño de malla 1 mm) para evitar la obstrucción de las tuberías y luego

se distribuyó sobre la parte superior de los residuos sólidos en el reactor mediante una bomba y un sistema de rociado de grifos. Del tapón del reactor el biogás se recogió en una bolsa de biogás. En la Figura 4 se muestra el diseño detallado de los reactores a escala de laboratorio. Cada reactor fue cargado con 20kg FORSU o una mezcla de varios tipos de basura sólida orgánica.

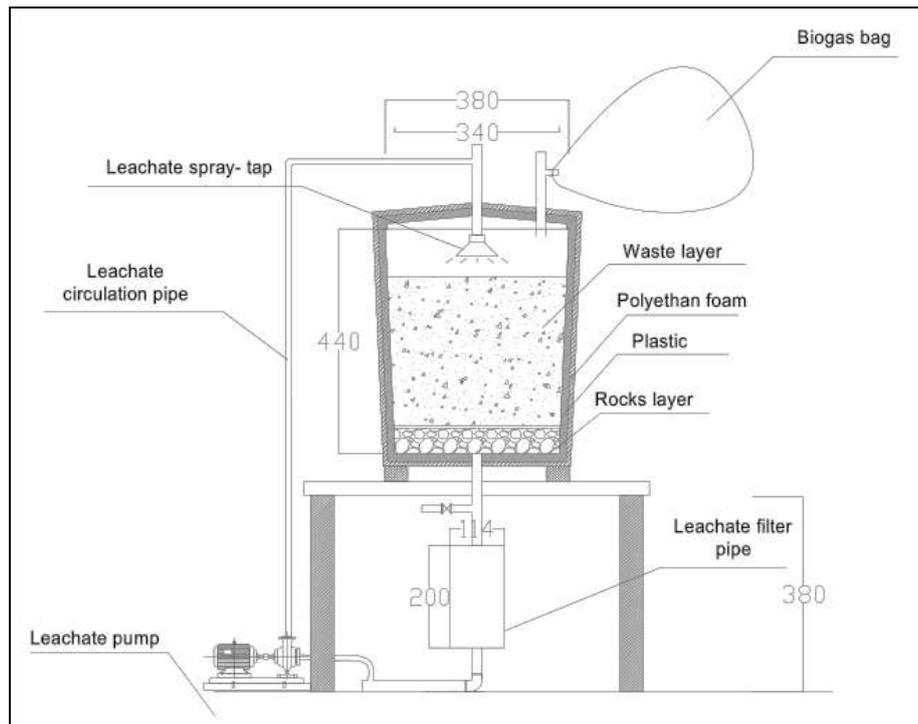


Figura 4. Biodigestor de digestión anaeróbica a escala de laboratorio
Fuente: (Le Thi, K.O. et al. 2013)

2.5.2 Biodigestor a escala piloto

Según Kim Oanh et al. (2013) utilizaron dos reactores de escala piloto similares con un volumen de 5 metros cúbicos cada uno. En la Figura 5 se muestra la esquemática del reactor. Los reactores de escala piloto fueron diseñados en forma de cilindro y construidos con material de acero inoxidable. La pared interior de los reactores fue cubierta con una capa compuesta para proteger el acero contra la corrosión. El diseño del sistema de reactor piloto fue similar al del reactor a escala de laboratorio (Figura 4) con respecto al reciclaje de lixiviados y al sistema de recolección de biogás. Se instaló un sistema eléctrico para controlar automáticamente la bomba de reciclaje de lixiviados.

La mezcla con los mejores resultados con respecto a la producción de biogás y el contenido de metano en la prueba de escala de laboratorio fue seleccionada para los experimentos con reactores a escala piloto.

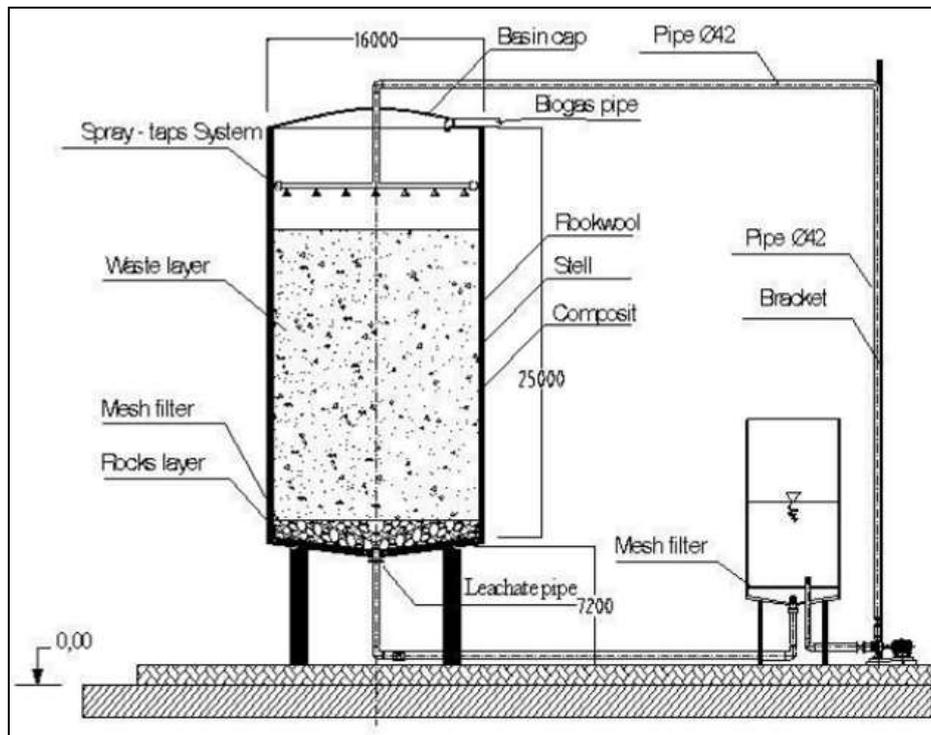


Figura 5. Biodigestor de digestión anaeróbica a escala piloto
Fuente: (Le Thi, K.O. et al. 2013)

2.6 Potencial de Producción de Metano de los Residuos Sólidos Orgánicos

Los residuos de frutas y vegetales presentan un potencial energético si estos se convierten biológicamente en metano (Gunaseelan, 2004). Estos residuos, y en general todos los orgánicos, pueden ser caracterizados por su potencial bioquímico de metano (PBM). El ensayo PMB provee una medida de la degradabilidad anaeróbica de un residuo determinado, además de ser un método rápido y económico. El potencial de producción de metano obtenible experimentalmente en procesos biológicos corresponde a la cantidad de metano que puede ser producida por kg de SV cargado en un proceso digestión anaerobia.

Debido al incremento a nivel mundial de la aplicación de la tecnología de digestión anaerobia, en los últimos años se han llevado a cabo un gran número de estudios e investigaciones para determinar el potencial de producción de metano de los residuos sólidos orgánicos. Los diferentes protocolos planteados se diferencian en función del propósito de la medición, el tipo de muestras, la complejidad de los equipos propuestos en cada trabajo e incluso

las unidades de las variables presentadas, haciendo que la comparación de los datos de biodegradabilidad en la literatura sea muy difícil (Angelidaki et al., 2009).

Hansen et al. (2004) proponen un protocolo más comprensivo y fácil de operar para la determinación del potencial de producción de metano de los residuos sólidos orgánicos, y se expresa en términos de volumen de metano (mL) en condiciones estándar de presión y temperatura por gramo de residuo orgánico expresado como SV. El tiempo de determinación es de 50 días. La biomasa tiene que ser un residuo a tener en cuenta en la tecnología de digestión anaerobia, ya que el potencial de producción de metano de esta es al menos el doble que la de los excrementos de animales (Jagadish et al., 1998). Esto es intuitivo, ya que, el excremento ha sido previamente digerido por un animal, y por lo tanto una gran parte de la energía ya ha sido eliminada (Curry y Pillay, 2012). Qiao et al. (2011) evalúan en su estudio el potencial de producción de metano de los excrementos de vaca y cerdo, del fango y de los restos de frutas, verduras y comida.

2.7 Función Utilitaria

2.7.1 Función Principal

Los sistemas integrados para el reciclado y la recuperación de recursos y mejora en las condiciones de saneamiento de una zona deben considerar como eje central del sistema un digestor anaerobio. La función principal para el establecimiento del biodigestor es que constituyen una valiosa alternativa para el tratamiento de los desechos orgánicos presentes en las aguas residuales ya que previene la contaminación de los cuerpos de agua y al mismo tiempo suministra un gas combustible (fundamentalmente metano) que puede emplearse para satisfacer la demanda de energía de una comunidad y un efluente que puede ser utilizado como fertilizante.

El biogás es empleado fundamentalmente en la generación eléctrica, en motores para bombas de agua, alumbrado, en la cocción de alimentos y equipos de refrigeración. El efluente en el riego de pasturas y en la generación de biomasa cuando es sometido a postratamiento. La adopción de biodigestores ha sido muy alta entre agricultores de áreas donde la leña escasea o el acceso a electricidad u otras fuentes de energía es limitado. Esta situación ha sido observada en campos de Colombia, Costa Rica, Ecuador, y Sri Lanka. Este proyecto consiste en un digestor, que no es más que el depósito donde se introducen los materiales de desperdicios, y una campana almacenadora de gas. una nueva tecnología.

2.7.2 Ventajas

- Es una energía renovable y sustentable.
- Aprovecha la producción natural del biogás.
- Es posible utilizar los productos secundarios como abono o fertilizante.
- Evita el uso de leña local, así reduciendo la presión sobre los recursos forestales.
- Fomenta el desarrollo sustentable.

- Redirige y aprovecha los gases de efecto invernadero producidos por los vertederos y granjas industriales, lo cual reduce la huella de carbono de estos establecimientos y disminuye su contribución al cambio climático.
- Cumple con la normatividad nacional e internacional.
- Impide la contaminación de mantos acuíferos.
- Crea empleos especializados.
- Crea la posibilidad de incursionar un proyecto de vanguardia.

3 BIODIGESTOR A ESCALA DE LABORATORIO

Existen diversos tipos de digestores en la industria y en zonas rurales. El diseño del digestor depende de las condiciones de operación, del tipo de materia prima, del costo de operación, entre otros.

Los digestores anaeróbicos pueden ser clasificados de acuerdo con la frecuencia de alimentación, temperatura, grado de mezclado, configuración y por los materiales de construcción. El digestor más simple es el digestor tipo batch, reactores más complejos son el reactor de contacto anaerobio, reactor de lecho expandido, digestor multietapa, digestor anaerobio de manto de fango de flujo ascendente y digestor de expansión continua, entre los más importantes.

3.1 Estructura de un Biodigestor

Existen muchas variaciones en el diseño del biodigestor. Algunos elementos que comúnmente se incorporan son:

- **Cámara de fermentación:** El espacio donde se almacena la biomasa durante el proceso de descomposición.
- **Cámara de almacén de gas:** El espacio donde se acumula el biogás antes de ser extraído.
- **Pila de carga:** La entrada donde se coloca la biomasa.
- **Pila de descarga:** La salida, sirve para retirar los residuos que están gastados y ya no son útiles para el biogás, pero que se pueden utilizar como abono (bioabono).
- **Agitador:** Desplaza los residuos que están en el fondo hacia arriba del biodigestor para aprovechar toda la biomasa.
- **Tubería de gas:** La salida del biogás. Se puede conectar directamente a una estufa o se puede transportar por medio de la misma tubería a su lugar de aprovechamiento.

3.2 Factores de Construcción

El digestor puede estar hecho con diferentes materiales de construcción, y puede estar enterrado o sobre el nivel del suelo, puede ser vertical u horizontal. La campana almacenadora del gas, llamada gasómetro, que puede ser móvil y flotante, cubre el digestor y puede construirse de metal, plásticos, ferrocemento o fija de mampostería, en otros casos esta campana móvil puede

estar separada del digestor, la función de esta campana es la de almacenar el gas que se produce en el digestor, además ejerce presión al gas para el consumo. Dispone de un tanque de carga en donde se prepara la mezcla de la materia prima, con agua y a través de un ducto es depositada en el fondo del digestor. La capacidad de este debe ser igual al volumen del material a digerirse, que requiere el digestor diariamente; adicionalmente, se puede colocar o no un tanque de almacenamiento del residuo (abono) que sale del digestor y debe estar colocado a 180 grados del tanque de carga, mínimo 90 grados. Para complementar un proyecto de biogás. (Raman, 1989)

Dimensionamiento

El tiempo de retención es un parámetro que únicamente es exacto en los reactores tipo batch. Para las plantas de funcionamiento continuo, un valor aproximado será el que se obtiene de dividir el volumen del reactor por el volumen de sustrato diario alimentado. Los factores de diseño, la geometría del digestor, el mezclado etc. podrán hacer variar este parámetro de forma notable para algunos contenidos concretos del sustrato. Así el tiempo de retención mínimo a aplicar dependerá de la temperatura de trabajo y de la naturaleza del sustrato.

El tamaño del reactor depende de la cantidad, la calidad y el tipo de biomasa disponible, así como de la temperatura de trabajo. Para el cálculo de plantas de biogás se puede partir de dos análisis diferentes:

1. Que se conozcan las cantidades exactas de las materias orgánicas que deseamos procesar y a partir de ellas calcular todo el biogás y abono, así como el tamaño adecuado del digestor para el tratamiento del material deseado.
2. Que conozcamos la cantidad de energía biogás y abono que se requiere suministrar y a partir de estos valores, calcular la materia orgánica que se requiera y su correspondiente digestor.

Volumen del biodigestor

El volumen del digestor (Vd) se determina a partir del tiempo de retención hidráulica (TR) y la cantidad de sustrato diario introducido (Vcd) así:

$$Vd [m^3] = TR [días] * Vcd [m^3 / día]$$

Para una planta simple, el tiempo de retención mínimo estará en unos 30 días. Aún así, la experiencia ha demostrado que plantas con TR de 60 - 80 días, y hasta 100 días funcionan, y con un mayor tiempo de retención se consigue una mayor producción de gas, alcanzando producciones de hasta un 40% más. (Appels, 2008)

El volumen del sustrato introducido dependerá de la cantidad de agua que se añade para alcanzar la proporción de sólidos adecuada, del 4 - 8%.

Cálculo del volumen del biodigestor

TR = 30 días (Tiempo de Retención)

En volumen

$$Vdv = Vd / 1000 \quad \text{Volumen del cilindro en m}^3 \quad (1)$$

$$0,045 \text{ m}^3 = Vd / 1000$$

$$Vd = 45 \text{ L} \quad \text{Litros de Compost} \quad (2)$$

$$Vd = Vcd * TR$$

$$45 \text{ L} = Vcd * 30$$

$$Vcd = 1,5 \text{ Kg} \quad \text{Mezcla por día} \quad (3)$$

$$Vcd = 3 \text{ Ecd}$$

$$\text{Ecd} = 0,5 \text{ Kg} \quad \text{Cantidad de Compost por día} \quad (4)$$

Cálculo de producción de biogás por día

Producción 0,125 L por kg de compost al día = 0,000125 m³

$$SD = \text{Ecd} * 0,000125 \text{ m}^3$$

$$SD = 0,0000625 \text{ m}^3 \quad \text{Producción de biogás por día}$$

Se debe añadir un 5 al 10 % del total por margen de seguridad esto es: Factor de seguridad del 10%

$$SDt = SD + SD * 0,1$$

$$SDt = 0,00006875 \text{ m}^3 \quad \text{De biogás por día}$$

Capacidad de almacenamiento de biogás en la campana

$$V_{\text{campana}} = SDt / 2$$

$$V_{\text{campana}} = 0,0000347 \text{ m}^3$$

Altura de la campana

$$h_1 = V_{\text{campana}} * 4$$

$$h_1 = 0,000314 \text{ m}$$

Estos parámetros se muestran a continuación en la representación de la Figura 6.

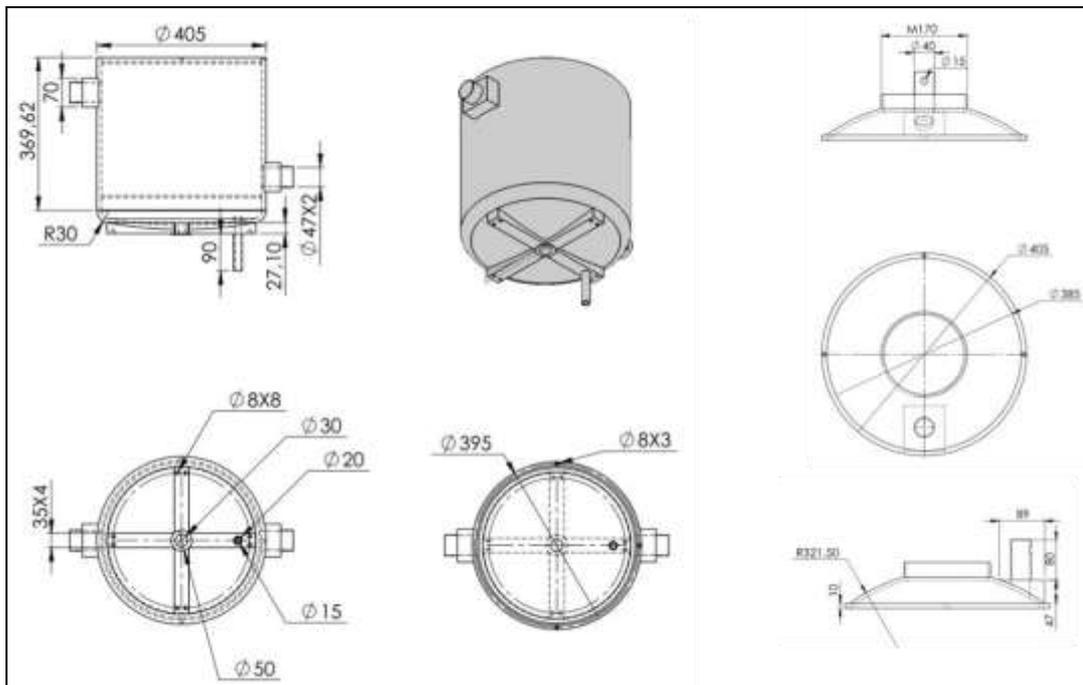


Figura 6. Dimensionamiento del biodigestor

Diseño del biodigestor

En base al volumen del digester calculado anteriormente, debemos conocer el resto de dimensiones del digester, para lo cual seguimos la siguiente metodología: Generalmente los digestores son cilíndricos, debido a que esta forma geométrica es muy consistente, requiere menor cantidad de materiales de construcción, y eliminar las aristas o esquinas de las paredes que pueden permitir fugas de gas. Conociendo el volumen calculamos la profundidad del pozo (tipo vertical) considerando que se trata de un biodigestor cilíndrico vertical de diámetro (d) Igual a la profundidad (h). Ver Figura 7.

Volumen del biodigestor

$d = h$
 $V = 0,045 \text{ m}^3$

Diámetro del biodigestor interno

$V = [(\pi \cdot d^2) / 4] \cdot h$
 $d = (V \cdot 4 / \pi)^{1/3}$
 $d = 0,386 \text{ m}$

Altura del Biodigestor

$h = d = 0,386 \text{ m}$

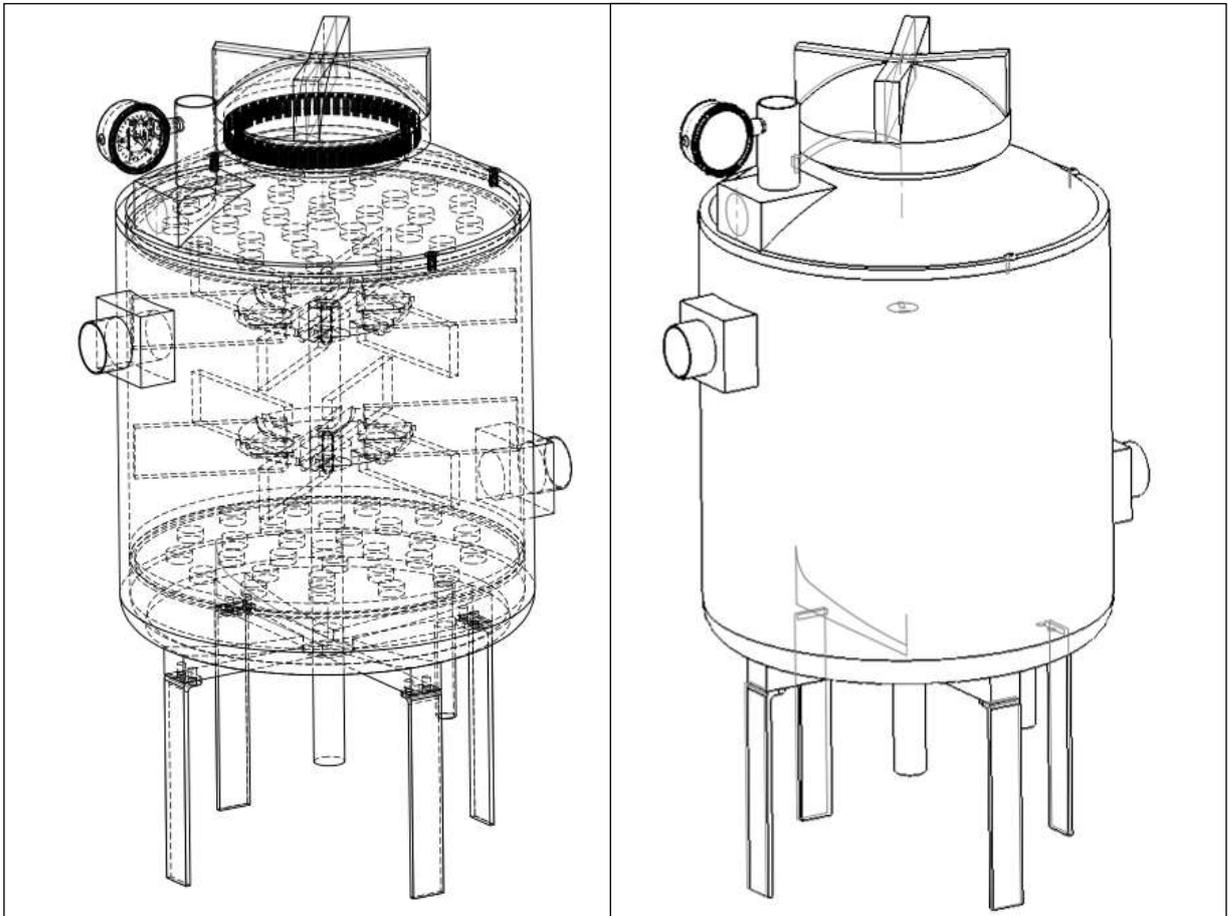


Figura 7. Biodigestor

4 CONCLUSIONES

La realización del presente trabajo permitió arribar a las siguientes conclusiones:

- Con un el desarrollo de un biodigestor a escala laboratorio de bajo costo, se logra obtener la producción de biogás, a partir de los desechos generados.
- Como resultado de toda la investigación, se deduce que es posible la reducción de la dependencia de loa combustibles fósiles en el Ecuador, logrando su reemplazo gradual mediante métodos de desarrollo sostenible.
- El diseño de un biodigestor a escala de laboratorio para la industrialización energética de los desechos sólidos municipales sirve como base para la construcción de un prototipo a escala piloto o de una planta para el tratamiento anaerobio de los desechos sólidos generados.
- Con la utilización de estos equipos en laboratorios. se podrá recuperar la energía contenida en los desechos generados, con el fin de reducir el flujo hacia los vertederos y proporcionar una tasa de producción para la obtención de biogás.

5 RECOMENDACIONES

- Socializar y concienciar los beneficios del biogás para mejorar la cantidad de vida de las comunidades.
- Es evidente el empleo del biodigestor para la producción de energía alternativa a partir de desechos generados.
- Las aplicaciones del biogás para la generación de electricidad y de energía térmica.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Anand, V., Chanakya, H. N., Rajan, M. G. C. (1991). Solid phase fermentation of leaf biomass to biogas. *Resources, Conservation and Recycling*, 6 (1991) 23-33
- Angelidaki, I. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science & Technology— WST* 59.5 2009.
- Appels, L. B. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science* 34 (2008) 755– 781 .
- Balasubramanya, R. H. (1988). Large-Scale Digestion of Willowdust in Batch Digesters. *Biological Wastes* 25 (1988) 25 32 .
- Bolzonella, D. I. (2003). Semi-dry thermophilic anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: focusing on the start-up phase. *Bioresource Technology* 86 (2003) 123–129 .
- Bolzonella, D., P. Pavan, et al., (2006) "Dry anaerobic digestion of differently sorted organic municipal solid waste: a full scale experience.", *Water Science and Technology* 53(8): 10, 2006.
- Botero, R. P. (1987). Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas: "Manual para su instalación, operación y utilización". CIPAV, Cali, Colombia .
- Bouallagui, H. C. (2003). Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester. *Bioresource Technology* 86 (2003) 85–89 .
- Bouallagui, H., Touhami, Y., Cheikh, R. B., Hamdi, M. (2005). Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. *Process Biochemistry* 40 (2005) 989–995
- Bruce E. Rittmann, Perry L. McCarty (2001). *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*. The McGraw-Hill Companies

- Chanakya, H. N., Rajabapaiah P., Modak J. M. (2004). Evolving biomass-based biogas plants: The ASTRA experience. *Current science*, vol. 87, no. 7, 10 October 2004
- Chanakya, H. N., Reddy, B. V. V., Modak J. M. (2009a). Biomethanation of herbaceous biomass residues using 3-zone plug flow like digesters – A case study from India. *Renewable Energy* 34 (2009) 416–420
- Chanakya, H. N., Sharma, I., Ramachandra, T.V. (2009b). Micro-scale anaerobic digestion of point source components of organic fraction of municipal solid waste. *Waste Management* 29 (2009) 1306–1312
- Chanakya, H. N., Sreesha, M. (2012). Anaerobic retting of banana and arecanut wastes in a plug flow digester for recovery of fiber, biogas and compost. *Energy for Sustainable Development* 16 (2012) 231–235
- Cecchi, F. T. (1986). Anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid wastes – performance. *The Science of the Total Environment*, 56 (1986) 183–197
- Curry, N., Pillay, P. (2012). Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment. *Renewable Energy* 41 (2012) 200-209
- Diaz de Basurto, Aitor (2013). Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya (Bolivia). Tesis de Máster en Ingeniería Ambiental. Escola Tecnica Superior d Enginyeria de Camins, Canals i Ports, UPC BARCELONATECH
- Elias, M.C., Pronovost, S.M., Cahill, K.J., Beckerle, M.C., Kadrmaz, J.L. (2012). A crucial role for Ras suppressor-1 (RSU-1) revealed when PINCH and ILK binding is disrupted. *J. Cell Sci.* 125(13): 3185-3194
- Elías, X., Campos, E., Flotats, X. (2012). Procesos biológicos: la digestión anaerobia y el compostaje. Ediciones Diaz de Santos, Madrid
- Fernández, J., Pérez, M., Romero, L. I. (2008). Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *Bioresource Technology* 99 (2008) 6075–6080
- Fernández, J. (2010). Optimización de la digestión anaerobia seca de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura. Memoria presentada para optar al grado de Doctora, con Mención Europea, por la Universidad de Cádiz.
- Gunaseelan, V. N. (2004). Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. *Biomass and Bioenergy* 26 (2004) 389 – 399.

- Hansen, T. L., Schmidt, J. E., Angelidaki, I., Marca, E. Jansen, J. C., Mosbæk, H., Christensen, T. H. (2004). Method for determination of methane potentials of solid organic waste. *Waste Management* 24 (2004) 393–400, 86
- Hiler, E.; Stout, B. *Biomass Energy, A Monograph*. TEES Monograph Series. 1985 págs. 76-112
- Jagadish, K. S., Chanakya, H. N., Rajabapaiah, P., Anand, V. (1998). Plug flow digestors for biogas generation from leaf biomass. *Biomass and bioenergy* 14 (1998) 415-423
- Jagadish SVK, Craufurd PQ, Wheeler TR. (2008). Phenotyping parents of mapping populations of rice (*Oryza sativa* L.) for heat tolerance during anthesis. *Crop Science*. 2008; 48:1140–1146.
- Le Thi, K.O., Tran Thi, M.D., Rulkens, W. (2013). Renew Energy from Municipal Solid Waste in Developing Country. *International Journal Environmental Protection*, Vol. 3 Iss. 11, pp. 1-14, 2013.
- Machado, W. D., Vera van Gelderen, E. M., Alonso M. A., Urueña, M. R. (2012). Biodigestión anaeróbica a escala piloto industrial de residuos semisólidos generados en la industrialización del limón. *Actas del 7mo Congreso de Medio Ambiente AUGM*, 22 al 24 de mayo de 2012. UNLP. La Plata, Argentina.
- Magaña R., J. Luis; Torres R., Ernestina; Martínez G., Martín T.; Sandoval Juárez, Carmen; Hernández Cantero, Rosalía. (2006). Producción de Biogás a Nivel Laboratorio Utilizando Estiércol de Cabras. *Acta Universitaria*, vol. 16, núm. 2, mayo-agosto, 2006, pp. 27-37, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México.
- Melosi, Martin V. (2008). *The Sanitary City: Environmental Services in Urban America from Colonial Times to the Present* (en inglés). University of Pittsburgh Pre. ISBN 9780822973379. Consultado el 19 de febrero de 2017.
- Monroy, O.; Viniegra, G. *Biotecnología para el aprovechamiento de los Desperdicios Orgánicos*. AGT Editor. 1990, México págs. 44, 65-93.
- Nayono, S. E. (2009). *Anaerobic digestion of organic solid waste for energy production*. Thesis, Universitat Fridericiana zu Karlsruhe (TH), 148 p. 88
- Pedraza, G., Chará, J., Conde, N., Giraldo, S., Goraldo, L. (2002) Evaluación de los biodigestores en geomembrana (PVC) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino. *Livestock Research for Rural Development*, 14 (1)
- Preston, T.R., Rodríguez, L. (2002) Low-cost biodigesters at the epicenter of ecological farming systems. *Proceedings Biodigester Workshop*, March 2002

- Qiao, W., Yan, X., Ye, J., Sun, Y., Wang, W., Zhang, Z. (2011). Evaluation of biogas production from different biomass wastes with/without hydrothermal pretreatment. *Renewable Energy* 36 (2011) 3313-3318
- Raman, P. R. (1989). A Static Scum-Breaking Net for FixedDome Biogas Plants. *Biological Wastes* 30 (1989) 261-273 .
- Ramírez, A., Yaguana T. (2015). Diseño de un biodigestor anaeróbico para la producción de biogás. Proyecto de Graduación en Ingeniería Química. Escuela Politécnica del Litoral
- Rittmann, B. E., McCarty, P- L. (2001). *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering
- Romero, J. (2000). Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y Principios de Diseño. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. 2000, Colombia págs. 223 – 250
- Verma, S. (2002). Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes. Master of science degree in earth resources engineering, Columbia University.
- Winkler, M. Tratamiento Biológico de Aguas de Desecho. Editorial Limusa. 1986 México págs. 41, 310-322.
- Zepeda, D., Amaya, F. (2013). Diseño de planta de tratamiento de desechos orgánicos para la generación y aprovechamiento de biogás. Informe Final de Investigación, Programa de Investigación Aplicada. Escuela Especializada en Ingeniería ITCA – FEPADE. Dirección de Investigación y Proyección Social. ISBN: 978-99961-50-01-2