

# Diseño de un biodigestor de flujo inducido con el uso de corrientes térmicas

Grupo de investigación en energías alternativas  
Luis E. García\* Manuel F. Mejía\*\* Rusvelt A. Murcia\*\*\* Rafael E. Prieto\*\*

Recibido: 12 de octubre de 2011 / Aceptado: 22 de noviembre de 2011

## RESUMEN

El presente proyecto comprende el diseño de un biodigestor de flujo inducido con el uso de acondicionamiento térmico para obtener biogás, su aplicación está dada para aprovechar los residuos biodegradables producidos por granjas que estén en una altitud superior los 2.500 metros sobre el nivel del mar. La principal ventaja que ofrece el proyecto es la implementación de procesos de acondicionamiento térmico, agitación mecánica y co-digestión, que permiten obtener menores tiempos de procesamiento y mayor contenido de metano en el biogás obtenido, logrando, de esta forma, un mayor poder calorífico del mismo.

**Palabras Clave:** biogás, biodigestor, residuos agropecuarios, digestión anaeróbica, agitación mecánica, acondicionamiento térmico.

## ABSTRACT

This project involves the design of an induced flow digester with the use of thermal currents to obtain biogas, its application is given to take advantage of biodegradable wastes produced by farms that are at an altitude exceeding 2,500 meters above sea level. The main advantage offered by the project is the implementation

of the thermal conditioning, mechanical agitation and co-digestion, allowing for lower processing times and higher content of methane in the biogas obtained, thus achieving a higher calorific value of the biogas.

**Keywords:** biogas, digester, agricultural wastes, anaerobic digestion, mechanical agitation, thermal conditioning.

## INTRODUCCIÓN

Debido a la innegable vocación agroindustrial de Colombia, el conjunto de actividades del sector de producción animal genera una gran cantidad de desechos que ocasionan varios tipos de problemas tales como, la contaminación e inconvenientes de salud pública ya que, generalmente, no se le da una adecuada disposición ni tratamiento a estos residuos.

Con el fin de ofrecer alternativas que permitan un mejor manejo de estos residuos aparecen los biodigestores, que solucionan, en parte, los problemas anteriormente mencionados. Con el paso del tiempo, la comunidad científica implementó diferentes mejoras para aumentar la producción de biogás; sin embargo, estos desarrollos no han sido difundidos en las regiones rurales y esto ha originado un atraso tecnológico.

\* M.Sc., I.M, Docente Universidad América.

\*\* M.Sc., I.M, Docente Universidad América.

\*\*\* Estudiante de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad de América.

\*\*\*\* Estudiante de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad de América.

## La demanda térmica se determina de acuerdo con los requerimientos del punto de implementación en términos de energía térmica y energía eléctrica para sus procesos productivos.

Actualmente existe un escepticismo, en general, ocasionado por el bajo rendimiento de estos sistemas en altitudes elevadas, ya que en este medio hay condiciones adversas como las bajas temperaturas que impiden la producción de grandes flujos de biogás.

En este proyecto se determina la materia prima que potencialmente es utilizable para la producción de energía útil. Así mismo, las ventajas de tener una mezcla de diferentes clases de residuos. Para llegar a esto, se evalúa la cantidad de desechos que producen diferentes sectores que realicen actividades de producción animal y que pertenezcan a las zonas donde se pretende aplicar el proyecto. Esto con el fin de parametrizar las dimensiones del biodigestor y determinar la cantidad de energía que puede llegar a ser aprovechada.

En este artículo se plantea el diseño de los diferentes sistemas tales como: sistema de carga y descarga del biodigestor, sistema de purificación del biogás, sistema de agitación mecánica y sistema de calentamiento. Así como la implementación de diferentes técnicas para aumentar la producción de biogás.

Se elabora la evaluación financiera del proyecto para determinar todos los factores económicos que comprenden el proyecto tales como inversión inicial, flujo de fondos, ganancias proyectadas, etc.

## DEMANDA ENERGÉTICA

La demanda térmica se determina de acuerdo con los requerimientos del punto de implementación en términos de energía térmica y energía eléctrica para sus procesos productivos; como resultado del proceso establecimiento del requerimiento energético y basado en los valores de consumo reportados en los informes de facturación, se estableció el valor en 550 kWh al mes. De acuerdo con el poder calorífico del biogás, el cual puede variar de 14 a 20 MJ/Nm<sup>3</sup> (UPME, 2003). Se de-

termina la cantidad de biogás y la cantidad de residuos necesarios.

## CO-DIGESTIÓN

De acuerdo con la revisión bibliográfica, se establece que la co-digestión (mezcla de materias primas) de residuos es conveniente ya que se logra una sinergia del proceso y se obtiene un mejor balance de nutrientes y propiedades fisicoquímicas que derivan en una mayor producción de biogás y mayor estabilidad del proceso (Ward et. al., 2008) (Balasubramaniyam, et. al., 2008). De esta manera, y de acuerdo con la relación carbono/nitrógeno se establece una proporción adecuada de 72% estiércol de ave y 28% estiércol vacuno. Con esta proporción de mezcla, se determinan otros parámetros como materia volátil (18.368 %), producción de biogás de la mezcla (0.358 m<sup>3</sup>/kg SV) y finalmente residuos necesarios (360.11 kg/día).

## TANQUE PRINCIPAL

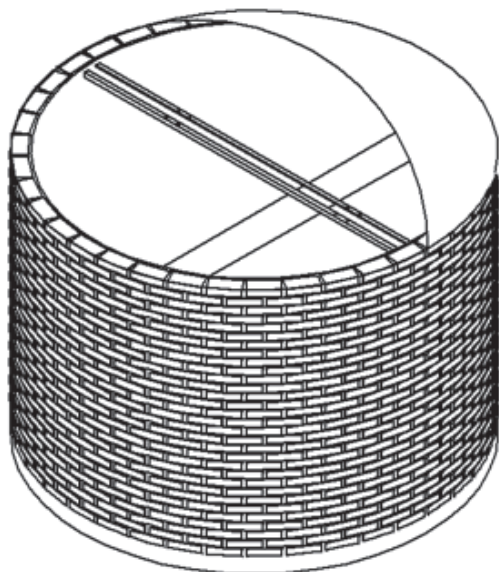
Después de realizar los cálculos iniciales se determina que el biodigestor que se debe construir es de un tamaño mediano (12 a 45 m<sup>3</sup>) (Fundación Hábitat, 2005) y de tipo semi-industrial. Se determina que la mejor opción para los requerimientos dados es un biodigestor tipo CSTR (Biodigestor de mezcla continua). La principal característica de este tipo de biodigestor es que ya incluye un sistema de agitación y es de alimentación continua.

La producción de biogás se puede incrementar cuando se separan las cuatro fases del proceso en dos diferentes etapas (Hidrólisis-Acidogénesis) y (Acetogénesis-Metanogénesis) alcanzando un rendimiento superior de alrededor del 17% respecto a un biodigestor de una sola etapa (Kaparaju et. al., 2009). Por esta razón, en este estudio se realiza una división de las fases del proceso; se elabora un cuadro comparativo evaluando las posibles disposiciones y la división de las fases y se determina que la mejor opción es un tanque con división interna. Se ha establecido en la literatura que la proporción adecuada de división es 70% en la primera y 30% en la segunda fase, respectivamente (Kaparaju et. al., 2009).

Para terminar, se establece que la mejor forma del biodigestor es de tipo cilíndrico ya que la forma cilíndrica evita que las bacterias se posesionen en las esquinas y retrasen el proceso de digestión; además, previene accidentes ya que la presión es baja debido a que no hay concentradores de esfuerzos en el tanque (Ward et. al., 2008).

**En la figura 1, se ilustra el esquema de construcción del equipo desarrollado en este estudio.**

Figura 1. Disposición constructiva del biodigestor



Fuente: Autores.

## SISTEMA DE AGITACIÓN

La inclusión de un sistema de agitación acelera de gran manera la digestión, lo que permite conseguir objetivos tales como: prevención de formación de superficies densas; mantenimiento de la homogeneidad del contenido del tanque y utilización máxima del contenido del biodigestor. De esta manera, se asegura un contacto íntimo entre los microorganismos y los sustratos (Santosh, 2004).

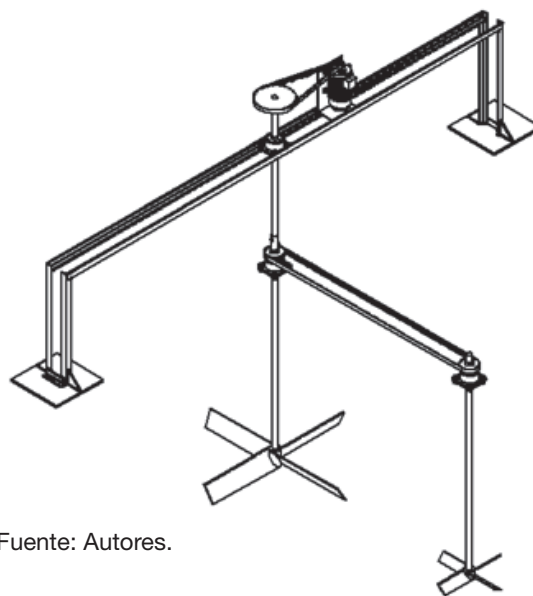
Mediante el método de atributos ponderados, se establece que la agitación mecánica es la más conveniente debido a su bajo consumo energético, el volumen de mezcla que maneja, la viscosidad, los efectos reológicos por el tipo de mezcla y la poca necesidad de sistemas auxiliares para su funcionamiento.

Se dimensionan los agitadores de acuerdo con parámetros como: las dimensiones del tanque; la posición adecuada del agitador; los momentos de flexión y torque actuantes (Paul, 2004). Cada fase del tanque maneja un agitador y estos son comunicados mediante un

sistema de transmisión de correas sincrónicas accionado por un motor eléctrico.

**En la figura 2, se ilustra el sistema de agitación soportado por una estructura que consiste en la unión de varios perfiles en L.**

Figura 2. Disposición constructiva del sistema de agitación



Fuente: Autores.

## SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO

Por revisión bibliográfica se encuentra que uno de los factores más relevantes es la temperatura del proceso (Santosh, 2004) (Chen, 2008) (Boe et. al., 2009) (Osorio et. al., 2007). Por tal razón, en este estudio se realiza el diseño de un sistema de acondicionamiento térmico. Para la realización del proceso en dos fases se determinó que la mejor temperatura para la segunda fase del proceso es de 55 °C aumentando la producción de biogás en un 11.7% a procesos realizados a temperatura ambiente que oscila entre 20 a 25 °C (Ward et. al., 2008). De la misma forma se ha establecido que el gasto energético, se optimiza en relación con la producción de biogás cuando sólo se acondiciona térmicamente la segunda fase (Ward et. al., 2008).

Para lograr este objetivo, es necesario establecer el requerimiento energético del biodigestor operando a la temperatura adecuada de digestión. Esto quiere decir que se debe proveer energía en forma de calor para cubrir dos aspectos: la energía necesaria para calentar la

El biogás no es puro, contiene trazas de diferentes compuestos como: agua ( $H_2O$ ), monóxido de carbono (CO); dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) (Deublein y Steinhauser, 2006).

mezcla de estiércol-agua y, también, la energía necesaria para cubrir las pérdidas de calor de la mezcla por las superficies del biodigestor (fondo, paredes y techo).

Luego de determinar el requerimiento energético, se procede a seleccionar el tipo de intercambiador de calor y se determina que el más adecuado es el de tipo espiral. Finalmente, se establecen sus dimensiones para cumplir con el régimen de trabajo requerido.

## FILTRACIÓN DEL BIOGÁS

El biogás no es puro, contiene trazas de diferentes compuestos como: agua ( $H_2O$ ), monóxido de carbono (CO); dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) (Deublein y Steinhauser, 2006). Estos diferentes compuestos son indeseables en la utilización del biogás, ya que pueden originar problemas de corrosión en los equipos donde sea empleado el biogás.

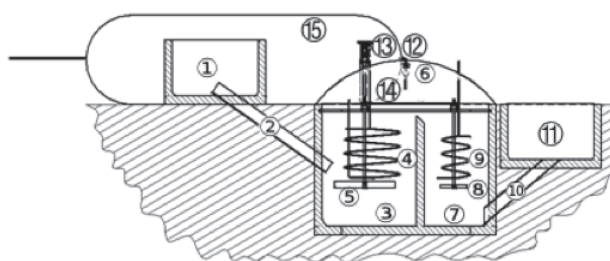
En estudios realizados, se evaluaron diferentes tipos y suspensiones de filtrado, para determinar su efectividad en la remoción de las impurezas del biogás. El filtrado fue realizado en las siguientes suspensiones: Agua de óxido de calcio ( $CaO$ ), agua con hidróxido de calcio ( $Ca(OH)_2$ ) y agua con sulfato de calcio ( $CaSO_4$ ). La solución de óxido de calcio disminuyó notablemente las concentraciones de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), siendo el mejor filtro para retener los gases indeseables (Coto et. al., 2007).

La concentración utilizada en la solución que tuvo mayor efectividad fue de tres partes de agua por una de óxido de calcio (3:1). De acuerdo con los experimentos realizados, para mantener una concentración de metano superior al 90% durante 8 días, se deben utilizar 0.375 kg de óxido de calcio (Cal viva) por cada metro cúbico de biogás producido en ese lapso (Coto et. al., 2007).

## DISEÑO PROPUESTO

En la figura 3, se ilustra la vista en corte de la disposición constructiva del sistema de biodigestión; de la misma forma, se ilustran las partes constitutivas del mismo.

**Figura 3. Vista en corte de la disposición constructiva del sistema de digestión**



Fuente: Autores.

El equipo diseñado tiene como objetivo realizar un aprovechamiento energético y un tratamiento de residuos provenientes de actividades agropecuarias para producir biogás y bioabono.

De acuerdo con los cálculos realizados, el contenido de sólidos debe rondar el 10% para una fermentación efectiva; así mismo, el tiempo de permanencia ideal a la temperatura que se realiza el proceso es de 25 días.

Los residuos orgánicos son alimentados al tanque de entrada (1) y en este tanque se realiza la mezcla con el agua antes de entrar al biodigestor que está ubicado bajo tierra. Luego la mezcla entra mediante una tubería de PVC (2) al biodigestor que debe tener un diámetro considerable (de 20 a 25 centímetros) para evitar atascamientos de la mezcla debido a que es de naturaleza heterogénea. La mezcla se acumula en la primera cámara del biodigestor (3) y se logran las dos primeras fases de la fermentación (Hidrólisis-Acidogénesis) donde el proceso es acelerado mediante un flujo inducido realizado por un agitador mecánico (4) tipo PBT con 4 aspas y también por un sistema de acondicionamiento térmico que consiste en un intercambiador de cobre por el cual circula agua a 35 °C (5). El sistema de agitación cumple con un objetivo principal: evitar la acumulación de sólidos en el biodigestor y también facilitar el burbujeo del biogás para la acumulación en la cúpula (6). El sistema de acondicionamiento térmico acelera la descomposición de la mezcla debido a que a mayor temperatura hay mayor producción de biogás.

## LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: ENERGÍAS ALTERNATIVAS

Luego por rebose, el sustrato pasa a la segunda fase (7) del proceso donde también hay un agitador con las mismas características al de la primera fase (8) y un intercambiador de cobre por el cual circula agua a 55 °C (9). Se utiliza un sistema de transmisión de potencia que consiste en correas y poleas sincrónicas (14). El sistema de agitación es accionado mediante un motor eléctrico (13).

En la segunda fase se realiza la metanización de la mezcla, el biogás producido se acumula en la cúpula de geomembrana; este biogás puede ser utilizado para quemar directamente o alimentar un generador eléctrico. Posteriormente el biogás es removido del biodigestor por una tubería de conducción (10); la tubería de conducción pasa por una válvula de alivio (11) para evitar sobrepresiones. Luego de la válvula de seguridad se encuentra un filtro de óxido de calcio y agua (12), que se usa para retirar las impurezas del biogás y aumentar su poder calorífico.

El bioabono que ha completado el proceso de digestión anaeróbica se retira mediante una tubería al tanque de salida de la mezcla (16), este bioabono puede ser utilizado como fertilizante.

## EVALUACIÓN FINANCIERA

Para la evaluación financiera, se tienen en cuenta parámetros como costos de ingeniería del proyecto (-\$10,475,556), costos de construcción y montaje (-\$12'646,757), ahorro energético (\$3'353,566), beneficios por venta del bioabono (\$19'796,023), costos de operación y mantenimiento (\$1'978,313).

En los costos de ingeniería incluidos, se incluyen el talento humano de los investigadores, se incluyen, también, otros gastos como lo son maquinaria y equipo, fungibles e imprevistos.

Los costos de construcción y montaje incluyen la parte civil, los sistemas mecánicos de agitación y acondicionamiento térmico, la cúpula de geomembrana, quemadores, válvulas, acumuladores y sistema de filtrado del biogás.

El ahorro energético está dado por la sustitución de combustible de gas propano por biogás. Los beneficios por venta del bioabono se establecen de acuerdo con que son un producto relativamente innovador y con poca penetración en el mercado.

Los costos de operación se calculan de acuerdo con la dedicación hora/hombre que se le debe dar al equipo y los costos de mantenimiento anuales se estiman en un 5% de la inversión inicial.

Como herramienta de evaluación, se utilizan las herramientas de Valor Presente Neto VPN y Tasa Interna de Retorno TIR. Los cálculos de TIR y VPN se realizan con ayuda de la herramienta de hoja de cálculo EXCEL. El valor de la TIR que arroja el programa es de 25%, lo que quiere decir que el proyecto supera ampliamente otro tipo de inversión moderada donde se asume un costo de capital del 15%. El valor del VPN que arroja el programa es de \$17'103,896 lo que también indica la amplia rentabilidad del proyecto.

En la tabla 1, se ilustran los resultados generales del proceso de diseño del equipo de biodigestión propuesto en este estudio.

Característica	Valor
Demanda energética	550 kWh / mes
Consumo de materia Prima	360.11 kg / día
Volumen del equipo	18.65 m <sup>3</sup>
Producción de biogás	23.68 m <sup>3</sup> / día

Fuente: Autores.

## CONCLUSIONES

- La generación de biogás mediante residuos agropecuarios tiene grandes ventajas como la sustitución de combustibles, la generación de bioabono con un alto contenido de nutrientes, el tratamiento de los residuos, la disminución de contaminantes, creación de mercados locales, valor agregado a residuos considerados anteriormente desechos, reducción de cargas biológicas y agentes nocivos en la materia prima.

- La implementación de biodigestores es una alternativa para lograr un desarrollo sostenible de este tipo de actividades agropecuarias y autosostenibilidad para el punto de implementación.

- La implementación de técnicas de optimización presenta un aumento significativo en el contenido de metano presente en el biogás y, por ende, un mayor poder calorífico.

- Aunque la digestión anaeróbica es un proceso conocido ampliamente desde hace muchos años, es necesario seguir realizando desarrollos de ingeniería en este campo, debido a la crisis energética actual, ocasionada por los altos costos de los combustibles fósiles y el inherente daño ambiental generado por el uso de los mismos.

- Cabe resaltar que este proyecto tiene un enfoque particular. Las condiciones específicas del punto de implementación donde se quiera desarrollar están íntimamente relacionadas con las variables del proceso tales como: características topográficas, socioeconómicas, disponibilidad de residuos, temperatura ambiente, pH, relación Carbono – Nitrógeno, y tamaño de las partículas.

- Considerando el agotamiento de los recursos fósiles y sus efectos nocivos, se concluye que el desarrollo e implementación de procesos de digestión anaeróbica son una alternativa a tener en cuenta como proceso

energético que permita la reducción de emisiones y generación de productos energéticos.

- Se hace necesario realizar acciones encaminadas a la difusión, estudio y desarrollo de proyectos de digestión anaeróbica. Para tal fin es necesario contar con el apoyo de gobiernos, instituciones públicas y privadas de carácter nacional e internacional.

- El producto energético obtenido del proceso de digestión anaeróbica presenta grandes posibilidades para la generación de energía térmica, eléctrica y mecánica.

- Como conclusión final, se puede decir que la construcción de un biodigestor de flujo inducido con el uso de corrientes térmicas es viable técnica y financieramente, para un punto de implementación que esté ubicado alrededor de los 2.500 metros de altitud y realice actividades pecuarias.

## BIBLIOGRAFÍA

Balasubramaniam, U.; Zisengwe, L.; Meriggi, N.; Buysman, E. (2008). *Biogas production in climates with long cold winters..* Holanda: Wageningen University Press.

Boe, K.; Karakasheva, D.; Trablyb, E.; Angelidaki, I. (2009). Effect of post-digestion temperature on serial CSTR biogás reactor performance. En: *Water research*. 43, 669-676.

Chen, Y.; Cheng, J.; Creamer, K. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. En: *Bioresource Technology*. 99, 4044-4064.

Coto, J. E.; Maldonado J. J.; Botero, R.; Murillo, J. V. (2007). Implementación de un sistema para generar electricidad a partir de biogás en la finca pecuaria

integrada de EARTH. Tesis, Universidad EARTH.

Deublein, D.; Steinhauser, A. (2006). *Biogas from waste and renewable resources*. Ed. Wiley VCH.

Fundación Hábitat. (2005). *Biodigestores, una alterna a la autosuficiencia energética y de biofertilizantes*. Colombia.

Kaparaju, P.; Ellegaard, L.; Angelidaki, I. (2009). Optimization of biogas production from manure through serial digestion: Lab-scale and pilot-scale studies. En: *Bioresource Technology*. 100, 701-709.

Osorio, J.; Ciro, H. & González, H. (2007). Evaluación de un sistema de biodigestión en serie para clima frío. En *Revista Facultad Agronomía – Universidad Nacional*. Medellín. 60 (2). 4145-4162.

Paul, E. (2004): *Handbook of industrial mixing science and practice: agitadores de flujo axial*. New Jersey: John Wiley y sons Inc.

Santosh, Y.; Sreekrishnan, T.R.; Kohli, S.; Rana, V. (2004). Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques—a review. En: *Bioresource Technology*. 95, 1-10.

UPME. (2003). *Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás*. Versión 1.

Ward, A. et. al. (2008). Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources. En: *Bioresource Technology*. 99 , 7928 - 7940.