

Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad

Fecha de recepción: 01/04/2009
Fecha de aceptación: 20/06/2009

Olga Rivas Solano¹
Margie Faith Vargas²
Rossy Guillén Watson³

Los biodigestores son sistemas diseñados para optimizar la producción de biogás por medio de desechos orgánicos, lo que permite obtener energía limpia, renovable y de bajo costo.

Palabras clave

Biogás, biodigestor, productividad de metano, sustratos, bacterias metanogénicas.

Key words

Biogas, Biodigestor, methane productivity, substrates, methanogenic bacteria.

Resumen

Los biodigestores son sistemas diseñados para optimizar la producción de biogás por medio de desechos orgánicos, lo que permite obtener energía limpia, renovable y de bajo costo. En el ITCR se efectuó, durante el año 2008, una actividad de fortalecimiento de la investigación con el propósito de desarrollar un sistema electrónico e inalámbrico de control y protección para la producción de biogás. Como parte de los objetivos específicos se

planteó investigar sobre los métodos que existen para acelerar la descomposición de la materia prima durante la producción del gas. Para elaborar el presente artículo se hizo una revisión con el fin de establecer los parámetros matemáticos implicados en la estimación de la productividad de un biodigestor. Posteriormente, se indagó la influencia de los factores químicos en la producción del mismo, entre ellos la composición de los sustratos y sus combinaciones, la adición de grasas y la presencia de inhibidores. Luego se estudió el efecto de factores físicos como la temperatura, la remoción de los sólidos y de las proteínas de los lodos y la separación de las fases de la digestión anaerobia de la materia orgánica. Finalmente, se investigó el papel de factores biológicos como la adición de bacterias termofílicas y la importancia de los metanógenos.

1. Centro de Investigación en Biotecnología. Escuela de Biología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: orivas@itcr.ac.cr
2. Estudiante de Ingeniería en Biotecnología. Escuela de Biología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: margiefaith@gmail.com
3. Estudiante de Ingeniería en Biotecnología. Escuela de Biología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: gosity16@gmail.com

En la presente revisión se describen los parámetros matemáticos relacionados con la productividad de un biodigestor y se comentan algunos de los factores químicos, físicos y biológicos que intervienen en el proceso.

Abstract

Biodigestors are designed to optimize biogas production using organic wastes, which permits to obtain clean, low-cost renewable energy. During 2008 a group of researchers of the ITCR worked in the development of a wireless electronic system for control and protection of biogas production. One of the specific objectives consisted in finding information about methods to augment biogas production. In this review we established the mathematic parameters related to biogas estimation of productivity. Then we focused in the influence of chemical factors such as substrate composition, substrate combinations, addition of fat and presence of inhibitors. We also studied the effect of physical factors like temperature, solid removal, protein exclusion and phase separation during anaerobic digestion of organic matter. Finally we tried to determine the role of biological factors such as the addition of thermophilic bacteria and the importance of methanogens.

Introducción

La producción de biogás es un proceso natural que ocurre en forma espontánea en un entorno anaerobio, es decir, carente de oxígeno. Dicho proceso lo realizan microorganismos como parte del ciclo biológico de la materia orgánica, el cual involucra la fermentación o digestión de materiales orgánicos para obtener el biogás.

Los biodigestores, por su parte, son sistemas diseñados para optimizar la producción de biogás a partir de desechos agrícolas, estiércol o efluentes industriales, entre otros, los cuales permiten así la obtención de energía limpia y de bajo costo a partir de una fuente renovable. El uso de esta tecnología no es nuevo, pero en los últimos años ha cobrado gran interés debido a la actual crisis energética producto del agotamiento de los combustibles fósiles.

Además, el aprovechamiento del biogás impulsa la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero como el metano (CH_4), cuyo potencial de calentamiento global es 23 veces mayor que el del dióxido de carbono (CO_2) (Campero, Kristine, Cuppens, Mizme, 2008).

En algunos países como Alemania y Francia, el biogás se emplea como combustible para automotores, sin embargo, en Costa Rica y en otros países en vías de desarrollo, el uso del biogás se ha visto limitado al sitio donde se produce, en el cual se puede emplear de forma directa para combustión con fines de cocción e iluminación, o bien se puede utilizar indirectamente, para alimentar motores de combustión interna que generan fuerza motriz o eléctrica (Kapdi, Vijay, Rajesh, Prasad 2004; Ilyas, 2006).

En el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), se desarrolló, durante el año 2008, una actividad de fortalecimiento financiada por la Vicerrectoría de Investigación (VIE) con el propósito de desarrollar un sistema electrónico e inalámbrico de control y protección para monitorear la producción, compresión y almacenamiento del biogás proveniente de un biodigestor. Como parte de los objetivos específicos se planteó investigar sobre métodos para acelerar la descomposición de la materia prima y aumentar la producción del gas.

En la presente revisión se describen los parámetros matemáticos relacionados con la productividad de un biodigestor y se comentan algunos de los factores químicos, físicos y biológicos que intervienen en el proceso.

Parámetros matemáticos relacionados con la productividad de un biodigestor

Uno de los parámetros que permite estimar la producción de biogás en un biodigestor es la productividad de metano o productividad metanoica, la cual se define como la cantidad de metano generado en la unidad de tiempo con respecto a la materia

dispuesta en el reactor. De esta manera, la expresión matemática que permite calcular la productividad de metano de un determinado resto orgánico en un tiempo dado, es la siguiente (Sogari, 2003):

$$P_{CH_4} = \frac{V_{CH_4}}{V_{reactor} * t}$$

Donde V_{CH_4} es el volumen de metano generado; $V_{reactor}$ es el volumen de materia dispuesta en el recinto fermentador y t es el tiempo considerado.

La producción de metano, tiene un límite que depende fundamentalmente de la naturaleza de la materia dispuesta en el sistema digestor. La fórmula que permite estimar la máxima generación de metano para un producto determinado, es la siguiente (Sogari, 2003):

$$M_{Max} = \frac{V_{CH_4}}{S_{org_total}}$$

Donde V_{CH_4} es el volumen de metano generado y S_{org_total} es la cantidad de materia orgánica total utilizada en todo el proceso.

Seguidamente se profundiza acerca de la influencia, en la productividad de los biodigestores, de factores químicos como la composición y las combinaciones de sustratos, la adición de grasas y la presencia de inhibidores.

Factores químicos

Composición química del sustrato

Los sustratos ideales para la digestión anaerobia en biodigestores son los desechos orgánicos húmedos de origen agrícola, industrial, doméstico y municipal, así como las excretas de origen humano y animal. Los residuos de la industria alimentaria y de las actividades agrícolas en particular, son excelentes como sustratos para la

digestión anaerobia, ya que no contienen contaminantes, patógenos, ni metales pesados.

La presencia de nutrientes como carbono, nitrógeno y azufre, así como algunos elementos traza, es necesaria para el desarrollo de las comunidades microbianas encargadas de la producción de biogás. La relación carbono-nitrógeno debe estar en una proporción de entre 20 y 30 partes del primer elemento por cada parte del segundo. Si la proporción de nitrógeno aumenta la producción de biogás puede disminuir debido a la formación de amonio, el cual se genera durante la degradación anaeróbica de urea o proteínas. El amonio libre puede ser inhibitorio para la fermentación anaeróbica y tóxico para las bacterias metanogénicas (Guevara, 1996; Gallert y Winter, 1997; Cui y Jahng, 2006).

En este sentido no se recomienda utilizar un solo tipo de sustrato. Lo ideal es por el contrario, combinar materiales ricos en nitrógeno con materiales abundantes en carbono para obtener un buen balance de nutrientes que promueva el adecuado crecimiento de los microorganismos que degradan la materia orgánica dentro del biodigestor y, de esta manera, aumentar la productividad del mismo (Guevara, 1996).

Combinaciones de sustratos

Desde 1999, las plantas alemanas productoras de biogás mezclan las excretas animales con residuos industriales de alimentos, de la agricultura, de mercados, de restaurantes y del sector municipal. El rendimiento de las excretas vacunas y porcinas al utilizarlas como biomasa oscila entre 25 y 36 m³/t de masa fresca, debido a que el contenido de materia seca orgánica de las mismas es bajo (2% a 10%). Además, su relación carbono nitrógeno es inferior a 25:1, es decir, son ricos en nitrógeno. Por otra parte, la producción de biogás a partir de cosechas

Lo ideal es por el contrario, combinar materiales ricos en nitrógeno con materiales abundantes en carbono para obtener un buen balance de nutrientes que promueva el adecuado crecimiento de los microorganismos que degradan la materia orgánica dentro del biodigestor y, de esta manera, aumentar la productividad del mismo (Guevara, 1996).

como remolachas de forraje, maíz, sorgo dulce y cebada, se encuentra entre 600 y 1000m³ por tonelada de masa orgánica seca. La relación carbono-nitrógeno de estos sustratos es superior a 30:1, por lo que son ricos en carbono. La co-digestión de estas cosechas da como resultado no sólo un fuerte incremento de la productividad del biogás, sino también una disminución del contenido de oligoelementos de los residuos digeridos (Martínez, Böttinger, Oechsner, Kanswohl, Schlegel, 2008; Gleixner, 2007; Weiland, 2000; Guevara, 1996).

Por otra parte, Rodríguez y colaboradores (1997) analizaron la productividad de una combinación de estiércol con la planta *Eichornia crassipes* y también de ambos sustratos por separado, y se encontró que los digestores cargados con *E. crassipes* presentaron el mayor rendimiento, mientras que los de menor productividad fueron aquellos que contenían estiércol. En cuanto a la mezcla de ambos sustratos, los autores encontraron que la adición de *E. crassipes* mejoró el rendimiento del estiércol.

Estos estudios refuerzan la recomendación anterior con respecto a la combinación de diferentes tipos de sustratos para balancear la proporción de nutrientes disponibles para las comunidades microbianas encargadas de la producción de biogás.

Adición de grasas

Las grasas vegetales poseen un alto potencial energético debido a su composición química y elevado contenido de lípidos degradables por bacterias anaeróbicas. Cuando se agregan a los biodigestores pueden aumentar en hasta un 2400% la productividad de biogás. En un estudio realizado en Costa Rica por investigadores de la EARTH, se probaron tres tratamientos que consistieron en la adición de 0%, 2,5% y 5% de aceite a un biodigestor alimentado con excreta porcina y vacuna, y se obtuvo un incremento directo de la producción

conforme aumentó el porcentaje de aceite. El tratamiento con 0% de aceite presentó un volumen de 244 litros de biogás, el tratamiento con 2,5% de aceite presentó un volumen de 342 litros, y el tratamiento con 5 % de aceite agregado presentó un volumen de 477 litros (Dias, Kreling, Botero y Murillo, 2007).

Martínez (2008) advierte que el empleo de grasas de origen animal podría aumentar el riesgo de transmitir enfermedades. Además, sugiere realizar un pretratamiento a los residuos provenientes de restaurantes, mercados y el área municipal para reducir el tamaño de partícula, separar los posibles contaminantes del proceso de digestión y facilitar la aplicación al suelo de los residuos tratados anaeróbicamente. Con respecto a esto último, recomienda un tratamiento de pasteurización a 70°C durante una hora, para eliminar los gérmenes patógenos.

De esta manera, la utilización de grasas vegetales junto con la combinación de sustratos ricos en nitrógeno y abundantes en carbono permite elevar la productividad de los biodigestores.

Inhibidores de la producción de biogás

Además del amonio libre, según García y sus colaboradores (2006), el sulfonato lineal del alquilbenceno (LAS) es el surfactante aniónico más importante en agentes limpiadores de hogares e industrias. En la mayoría de los digestores, la adición de surfactantes causa una disminución de la tasa de producción de biogás.

Esto debe ser tomado en cuenta a la hora de adicionar residuos domésticos e industriales a un biodigestor en funcionamiento, ya que la productividad, lejos de aumentar se podría ver afectada.

Factores físicos

Temperatura

La biodigestión anaerobia puede ocurrir en un amplio rango de temperaturas

que van desde los 5°C hasta los 60°C. Las bacterias metanogénicas son más sensibles a la temperatura que los demás microorganismos de un biodigestor, debido a que su velocidad de crecimiento es más lenta. El proceso de digestión anaerobio no se ve afectado si la temperatura aumenta en unos pocos grados; sin embargo, un decrecimiento podría retardar la producción de metano, sin perjudicar la actividad de las bacterias acidificantes, lo cual permite una excesiva acumulación de ácidos y una posible falla en el biodigestor. En este sentido, se debe procurar mantener un microclima cálido en el biodigestor para conservar una tasa de producción de biogás alta (Bidlingmaie, 2006; Osorio, Ciro y González, 2007).

Una estrategia para aumentar la temperatura del biodigestor y, a la vez, mantenerla más constante consiste en la construcción de una estructura liviana forrada con plástico de invernadero, la cual también contribuye a restringir el acceso de animales que puedan dañarlo.

Una estrategia para aumentar la temperatura del biodigestor y, a la vez, mantenerla más constante consiste en la construcción de una estructura liviana forrada con plástico de invernadero, la cual también contribuye a restringir el acceso de animales que puedan dañarlo.

Separación de sólidos

Las impurezas como plásticos o arena se deben separar mediante técnicas de flotación y sedimentación. Además, una reducción de tamaño de los desechos sólidos a partículas de 10 a 40 mm es necesaria para lograr una mejor accesibilidad biológica y con mejor flujo de sustrato en el proceso (Weiland, 2000). De acuerdo con Kasapgi y sus colaboradores (2001), el uso de membranas tubulares sin soporte para la ultrafiltración, acopladas al biodigestor como una unidad externa, permite lograr un incremento significativo en la cantidad de biogás con valor energético.

Esta es una medida de bajo costo que se puede implementar fácilmente a la entrada de cualquier biodigestor.

Remoción de proteínas de los lodos

Cui y Jahng (2006), encontraron que mediante la desintegración de lodos y

la subsecuente remoción de proteínas, la generación de biogás mejoró significativamente y el contenido de metano en el biogás producido a partir de lodos desproteinizados también aumentó de 55,6% (v/v) (control) a 74,8%. Esto se debe a que entre el 40% y el 50% del peso seco de una célula microbiana corresponde a las proteínas que generan amonio. Como se indicó anteriormente el amonio libre inhibe la producción de biogás ya que es tóxico para las bacterias metanogénicas. Por este motivo la eliminación de proteínas de los lodos puede optimizar tanto la producción como la calidad del biogás.

Los autores de este estudio efectuaron la desproteinización de los lodos mediante tratamientos térmicos a 121 °C, por sonicación (aplicación de ondas ultrasónicas) y también por desnaturalización a pH alcalino. De todas estas alternativas la menos factible de aplicar en nuestro país es la sonicación ya que implica la adquisición de un equipo costoso.

Separación de fases

El porcentaje de biomasa que es convertido a metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) es de, aproximadamente, 70%. Para que éste aumente, se requiere una separación de las fases que componen la digestión anaerobia de la materia orgánica, a saber la hidrólisis (degradación de compuestos orgánicos complejos en compuestos simples), la acidogénesis (obtención de ácidos grasos), la acetogénesis (producción de acetato) y la metanogénesis (generación de metano). De esta manera se puede optimizar las condiciones del pH y de la temperatura en cada proceso (Gleixner, 2007; Antoni, Zyerlov y Schwarz 2007; Park, Hong, Cheon, Hidaka y Tsuno 2008).

Kon y colaboradores (2006) desarrollaron un sistema modificado de tres etapas de fermentación de metano. En la primera se concentraron los procesos de hidrólisis y acidogénesis semianaeróbica, en

El rendimiento de un biodigestor está ligado principalmente a la estructura de la comunidad microbiana presente en el mismo.

la segunda se realizó la acidogénesis estrictamente anaeróbica y, por último, en la tercera se efectuó la metanogénesis estrictamente anaeróbica. El fluido ácido emanado del fermentador acidogénico secundario fue utilizado como sustrato y el fluido metanogénico emanado del fermentador metanogénico fue empleado como inóculo. Los microorganismos usados en la fermentación acidogénica fueron especies de *Clostridium*. En la fermentación metanogénica se utilizó una mezcla de bacterias aisladas de suelo y abono de vaca. En la reacción se colocaron 8 litros de la mezcla de sustrato con inóculos (1:1) dentro del reactor metanogénico. Cada reactor se operó a temperaturas crecientes de 30 a 55 °C a intervalos de 5 °C. Se monitorearon los cambios en el pH, la DQOs y la producción de gas. Como resultado se incrementaron las tasas de hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis sin afectar el pH, y se dio una alta producción de metano.

Sin embargo, a pesar de las ventajas mencionadas en otros estudios, la mayoría de las plantas agrícolas de biogás utilizan la tecnología de una sola fase debido a que su instalación y mantenimiento son más económicos.

Factores biológicos

Adición de bacterias termofílicas

El rendimiento de un sistema de digestión anaeróbica está ligado, principalmente, a la estructura de la comunidad microbiana presente en el digestor. Los parámetros ambientales y de operación del proceso afectan el comportamiento, rendimiento y, eventualmente, el destino de la comunidad microbiana en los digestores anaeróbicos. Es más, la naturaleza e influencia de los lodos usados para la inoculación también deben ser tomadas en cuenta (Demirel y Scherer, 2008). Por ejemplo, de acuerdo con Miah y sus colaboradores (2005), la adición de una pequeña cantidad de bacterias termofílicas aeróbicas (TA) tiene

un gran potencial como tratamiento rentable para acelerar la digestión anaeróbica de desechos biológicos. La adición de 5% (v/v) de lodos TA al lodo metanogénico aumentó la producción de biogás con una concentración de metano de 50-67%. Esto se debe a que, durante la solubilización de lodos, las enzimas de bacterias TA excretadas influenciaron la hidrólisis de los lodos durante la digestión anaeróbica.

No obstante para trabajar con TA, se necesita una temperatura de operación cercana a los 65 °C, lo cual eleva el costo del proceso.

Importancia de los metanógenos

Según Demirel y Scherer (2008), las diferencias en las condiciones ambientales y de operación afectan el comportamiento de los metanógenos acetotróficos e hidrogenotróficos presentes en un digestor de biogás. Los metanógenos acetotróficos son anaerobios obligados que convierten el acetato en metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂). Su actividad y funcionamiento son de gran importancia durante la conversión anaeróbica del acetato. La actividad de los metanógenos hidrogenotróficos, por su parte, es crucial para un funcionamiento estable y eficiente del biodigestor, aunque la disponibilidad de hidrógeno puede ser un factor limitante para estos microorganismos.

Para promover un aumento en la productividad de los biodigestores es posible inocularlos con fuentes conocidas de microorganismos metanógenos como el rumen de vaca, lo cual representa una alternativa eficiente y de bajo costo.

Conclusión

El rendimiento de un biodigestor está ligado principalmente a la estructura de la comunidad microbiana presente en el mismo. Además, la producción de metano tiene un límite que depende también de la

naturaleza de la materia dispuesta en el sistema digestor.

Sin embargo, mediante la manipulación de los factores químicos, físicos y biológicos presentados en esta revisión, se puede adaptar, de un modo sencillo, la producción de biogás a la demanda actual de energía. Entre estos factores cabe resaltar los que resultan de bajo costo, como por ejemplo la combinación de sustratos, la adición de grasas, la separación de los sólidos y la inoculación de los biodigestores con microorganismos metanogénicos.

Actualmente en el ITCR se continúa investigando sobre este tema por medio de un proyecto multidisciplinario financiado por la VIE, el cual pretende darle continuidad a la actividad de fortalecimiento. Para ello se tiene planeado, en una primera etapa, construir un biodigestor de polietileno para poder efectuar pruebas de campo. Más adelante se planea investigar acerca de métodos para la purificación del biogás con el fin de obtener metano de alta pureza que pueda ser envasado y transportado.

Bibliografía

- Antoni D., V. Zverlov, V. Schwarz. W.H. (2007). Biofuels from microbes. *Appl Microbiol Biotechnol.* 77, 23–35.
- Bidlingmaier W. (2006). Fifth ORBIT Conference Probes Anaerobic Digestion. *BioCycle Journal of Composting and Organics Recycling.* 47(9), 42-49.
- Campero, O., Kristinc, G., Cuppens, T., Mizme, P. (2008). Implementación del programa de mitigación de los efectos negativos del gas metano CH₄, con la ejecución de acciones integrales de energías renovables y medio ambiente en el área rural de La Paz, Cochabamba y Santa Cruz. (*Tecnologías en Desarrollo.* 1-36.
- Cui R., D. J. (2006). Enhanced methane production from anaerobic digestion of disintegrated and deproteinized excess sludge. *Biotechnology Letters.* 28, 531–538.
- Demirel, B., Scherer, P. (2008). The roles of acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversion of biomass to methane: A review. *Rev Environ Sci Biotechnol.* 7, 173–190.
- Dias E.D., Kreling J.C., Botero R., Murillo J.V. (2007). Evaluación de la productividad y del efluente de biodigestores suplementados con grasas residuales. *Tierra Tropical* 3(2), 149-160.
- Gallert C., J. Winter. (1997). Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic wastes: effect of ammonia on glucose degradation and methane production. *Appl Microbiol Biotechnol.* 48, 405-410.
- García M.T., Campos, E., Dalmau, M., Illa'n, P., Sánchez-Leal, J. (2006). Inhibition of biogas production by alkyl benzene sulfonates (LAS) in a screening test for anaerobic biodegradability. *Biodegradation.* 17, 39–46.
- Gleixner A. (2007). *Fermentation of Distiller's Wash in a Biogas Plant. Utilization of By-Products and Treatment of Waste in the Food Industry.* Springer, 99-108.
- Guevara A. (1996). *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Producción de gas y saneamiento de efluentes.* Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. División de Salud y Ambiente. Oficina Regional de la Organización Panamericana de la Salud. Lima, Perú. 80.
- Ilyas S.Z. 2006. A case study to bottle the biogas in cylinders as a source of power for rural industries development in Pakistan. *World Applied Sciences Journal.* 1(2), 127-130.
- Kapdi S.S., Vijay, V.K., Rajesh, S.K., Prasad, R. (2004). Biogas scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in Indian context. *Renewable Energy* 20, 1-8.
- Kasapgil, B., Ince, O., Anderson, G., Arayici, S. (2001). Assessment of biogas use as an energy source from anaerobic digestion of brewery wastewater. *Water, Air, and Soil Pollution* 126, 239–251.
- Kon, J., Rock, B., Nam, Y., Wouk, S. (2006). Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic digestion of food waste. *Journal of Bioscience and Bioengineering.* 102 (4), 328-332.
- Martínez C.M., Böttinger, S., Oechsner, H., Kanswohl, N., Schlegel, M. (2008). *Instalaciones de biogas a mediana y gran escala en Alemania.* Publicado el 08 de Enero 2008. Fuente: www.engormix.com.

- Miah, M., Tada, C., Yang, Y., Sawayama, S. (2005). Aerobic thermophilic bacteria enhance biogas production. *J Mater Cycles Waste Manag.* 7:48-54
- Park, Y., Hong, F., Cheon, J., Hidaka, T., Tsuno, H. (2008). Comparison of thermophilic anaerobic digestion characteristics between single-phase and two-phase systems for kitchen garbage treatment. *Journal of Bioscience and Bioengineering.* 105 (1), 48-54.
- Osorio, J., Ciro, H., González, H. (2007). Evaluación de un sistema de biodigestión en serie para clima frío. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín.* 60 (2).
- Rodríguez J.C., El Atrach, K., Rumbos, E., Delepiani, A.G. (1997). Resultados experimentales sobre la producción de biogas a través de la bora y el estiércol de ganado. *Agronomía Trop.* 47(4), 441-455.
- Sogari, N. (2003). Cálculo de la producción de metano generado por distintos restos orgánicos. *Universidad Nacional Del Nordeste, Argentina. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas.* Resumen T-027.
- Weiland P. (2000). Anaerobic waste digestion in Germany – Status and recent developments. *Biodegradation* 11, 415-421.