

Recopilación de aspectos teóricos sobre las tecnologías de producción de biogás a escala rural

Compilation of theoretical aspects on biogas production technologies at rural scale

Dr. C. Ernesto L. Barrera-Cardoso, MSc. Leyanet Odales-Bernal, Lic. Annerys Carabeo-Pérez, MSc. Yasmani Alba-Reyes, MSc. Félix Orestes Hermida-García

Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales (CEEPI). Universidad de Sancti Spíritus “José Martí Pérez”, Sancti Spíritus, Cuba.

ernestol@uniss.edu.cu

Resumen

La digestión anaerobia ha demostrado ser un proceso económicamente viable para la utilización cíclica de desechos orgánicos. A escala rural ofrece múltiples beneficios a sus usuarios. En el presente trabajo se recopilan aspectos teóricos de las tecnologías de producción de biogás a escala rural teniendo en cuenta su principio de funcionamiento y parámetros de operación, además se aborda el sistema de eliminación de sulfuro de hidrógeno para la purificación del biogás y el uso final del mismo. Se incluyen indicadores para los biodigestores más difundidos en Cuba: el “Biodigestor de tapa fija o de tipo “chino”, el “biodigestor de campana flotante o de tipo hindú”, el “biodigestor tubular o de bolsa de polietileno” y el “Biodigestor híbrido cubano”. Estos difieren en cuanto a sus costos de inversión, sus parámetros de operación y sus impactos ambientales. Se propone un documento que agrupa los biodigestores difundidos en Cuba, para potenciar la toma de decisiones sobre el tipo de tecnología a utilizar a escala rural.

Palabras clave: digestión anaerobia; biodigestores; escala rural; biogás.

Abstract

Anaerobic digestion has been an economically viable process for the cyclic use of organic waste. At the rural scale, it offers multiple benefits to its users. In the present work, the theoretical aspects of biogas production technologies are systematized at a rural scale, taking into account its operation principle and operating parameters, as well as the hydrogen sulfide elimination system for the biogas purification and its final use. Indicators for the most widespread biodigesters in Cuba are included: the “fixed cover or chinese type digester”, the “floating bell or hindu type digester”, the “tubular or polyethylene bag digester” and the “hybrid cuban digester”. These differ in terms of their investment costs, their operating parameters and their environmental impacts. It is proposed a material that group biodigesters disseminated in Cuba, to improve the decision making on the type of technology that will be used at rural level.

Keywords: anaerobic digestion; biodigester; rural scale; biogas.

Introducción

El proceso de producción de biogás por Digestión Anaerobia (DA) de materia orgánica, es una tecnología que ha ganado gran popularidad hoy en día y es adoptada extensamente por sus amplias aplicaciones [1]. La DA ha demostrado ser un proceso económicamente viable para la utilización cíclica de desechos orgánicos a gran escala [2,3]. Las plantas de DA son una tecnología atractiva por la cual el metano es almacenado y utilizado como fuente renovable de energía [4]. También produce un residual resultante conocido como digestato [5] que es considerado un valioso abono orgánico por ser rico en nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas [6,7]. Su adición al suelo es considerada una opción adecuada, con múltiples beneficios para la agricultura y el medioambiente pues reduce el empleo de fertilizantes, minerales y sintéticos [8,9].

A nivel mundial se han empleado diferentes tecnologías (biodigestores) a pequeña y a gran escala para el tratamiento anaerobio de residuos [10]. Estas tecnologías difieren en cuanto a sus costos de inversión, sus parámetros de operación, [11] por ejemplo: la demanda química de oxígeno (DQO), temperatura, tiempo de retención hidráulica (TRH), productividad volumétrica (Pv), la carga orgánica volumétrica (COV) y sus impactos ambientales [12-15]. Estas tecnologías deben ser seleccionadas cuidadosamente en función del contexto al que se quiera aplicar [16].

La producción de biogás a escala industrial, independientemente de que son procesos más complejos en su funcionamiento, permiten obtener mayor robustez al operar con menores TRH y elevadas COV [17-19]. En Cuba, la aplicación de esta tecnología ha estado limitada en gran medida por el desconocimiento y la poca comercialización de las alternativas tecnológicas existentes [17].

Durante muchos años, los residuales porcinos en Cuba se han tratado con el empleo de biodigestores anaerobios convencionales [20]. La tecnología del biogás a escala rural ofrece múltiples beneficios a sus usuarios, entre ellos, un adecuado tratamiento de los residuos agropecuarios, ahorro de electricidad con el uso del biogás para la cocción de alimentos y el empleo del digestato como

fertilizante orgánico [21]. Los principales tipos de biodigestores que han sido difundidos en Cuba son: el “biodigestor de tapa fija o de tipo chino”, el “biodigestor de campana flotante o de tipo hindú”, el “biodigestor tubular o de bolsa de polietileno” y el “biodigestor híbrido cubano” [22-24]. El objetivo del presente trabajo es analizar desde el punto de vista teórico las tecnologías existentes en Cuba para la producción de biogás a escala rural, que sirva como base para la toma de decisiones en el tratamiento de residuales a escala rural.

Desarrollo

Biodigestor de tapa fija o de tipo chino

Los biodigestores de tipo chino (figura 1) consisten en un sistema cerrado, construido usualmente de mampostería y bajo el nivel de la tierra [25]. Estos biodigestores de pequeño formato (minidigestores) poseen una tapa fija en forma de domo que contiene al biogás en su interior, una entrada para alimentar el sustrato y una salida del digestato que usualmente actúa como tanque de compensación. El espacio que contiene al gas debe ser hermético, por lo cual se aplican pinturas sintéticas u otras que garanticen la hermeticidad requerida [26]. La construcción de este tipo de biodigestores requiere de excesivo trabajo y de una rigurosa supervisión de especialistas. Su estructura de mampostería es propensa a la porosidad y agrietamiento (a veces irreparables) dificultando la necesaria hermeticidad y requiriendo el uso de materiales para el sellado. Existen varios diseños de biodigestores de tapa fija como son el modelo de la India *Deebandhu*, el *Akut* y el *CAMARTEC* cada uno de los cuales tiene un domo de forma esférica como característica central [26]. En Cuba se han desarrollado varios modelos adaptados a los recursos existentes, entre los que se destaca el modelo GBV [22]. Según el último censo realizado por el Grupo Nacional de Biogás (GNB) en el 2015, en Cuba existen aproximadamente 400 plantas de este tipo [18].

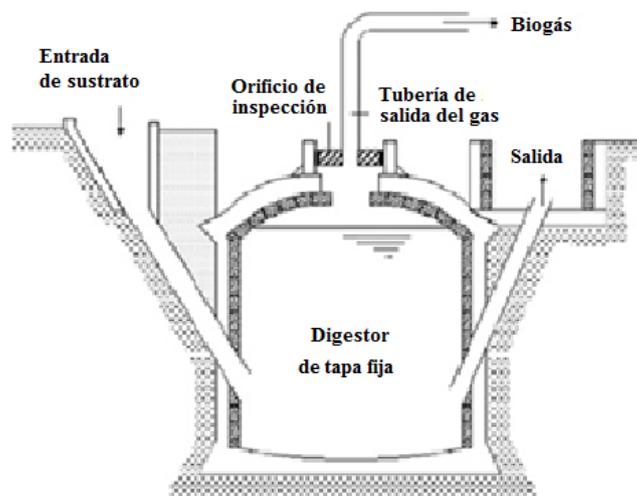


Fig. 1. Esquema general de un biodigestor de tapa fija o de tipo Chino

Principio de funcionamiento

Este tipo de biodigestor puede ser operado de forma continua o discontinua. Cuando la producción de gas comienza, el líquido que se encuentra en el interior del biodigestor se desplaza hacia el tanque de compensación (salida) mientras que el biogás producido se almacena en el domo. Cuando el biogás es extraído, una cantidad proporcional de líquido regresa hacia el interior del biodigestor [27]. Por tal motivo, la presión de gas dentro del biodigestor no permanece constante, incrementándose con la cantidad de biogás almacenado y con la diferencia de alturas entre el nivel interior y exterior del líquido. La fluctuación de esta presión puede complicar el uso final del biogás [26].

Parámetros de operación

Los biodigestores de tipo chino pueden manejar sustratos de alto contenido de fibra, de conjunto con excremento animal de hasta 500 cerdos [28]. Poseen una vida útil estimada entre 15 y 20 años; y pueden llegar a alcanzar de 6 a 91 m³ en aplicaciones domésticas y hasta 740 m³ en aplicaciones industriales [26]. En Cuba sus máximos volúmenes a escala doméstica se reportan en el orden de los 70 m³ y no se conocen experiencias de su aplicación a escala industrial. Su productividad volumétrica oscila entre 0,2 y 0,5 m³ de biogás por m³ de biodigestor al día, la cual constituye la más baja reportada para minidigestores. Una vez concluida su construcción se procede a cubrirlos con tierra hasta el tope, para su aislamiento térmico y para contrarrestar la presión interna. Las experiencias en Cuba reportan presiones de trabajo entre 75 y 90 mm de

columna de agua para su uso directo en la cocción de alimentos [22]. La eficiencia de remoción de materia orgánica es también una de las más bajas reportadas (máximo 50 %) debido a su forma cilíndrica que no garantiza el recorrido uniforme del sustrato dentro del biodigestor, originando cortos circuitos hidráulicos. ⁽²⁹⁾ El TRH que alcanza es de 21 días, con una COV de hasta 2 kg sólidos volátiles (SV) m⁻³ d⁻¹. Sus costos de inversión pueden variar en función del escenario, la fuente de adquisición de los recursos y la necesidad de contratación de mano de obra.

Los efluentes tratados en biodigestores de cúpula fija pueden ser dispuestos en una laguna de oxidación y empleados para el riego de cultivos, debido a su bajo por ciento de sólidos totales [18].

Biodigestor de campana flotante o de tipo Hindú

Los biodigestores de campana flotante o de tipo hindú (figura 2) están formados por un cilindro de mampostería en su parte inferior (con un tope para apoyar la campana) y una campana flotante que almacena el gas en la parte superior [30]. La campana de gas es usualmente construida de metal con planchas de acero, de entre 2 y 2,5 mm de espesor, siendo soldadas algunas abrazaderas en su interior como un medio de ruptura de la espuma cuando se procede a su rotación. Luego de la eliminación de las suciedades y la corrosión en la superficie del metal, la campana debe ser cubierta con pintura de aceite o sintética para protegerla de la corrosión [26]. Por tanto, es recomendable aplicar mantenimiento a la campana anualmente para lograr una vida útil de la misma de entre 8 y 12 años. Algunos materiales recomendables son las planchas de acero galvanizado, los plásticos (fibra de vidrio reforzada y planchas de plástico) y el ferrocemento con recubrimiento para garantizar la hermeticidad del gas.

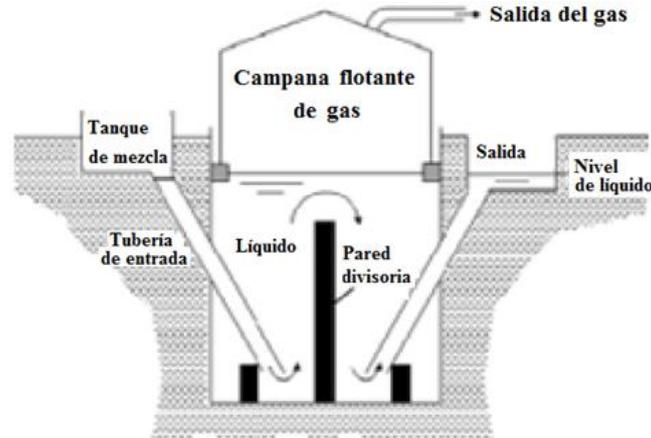


Fig. 2. Esquema general de un biodigestor de campana flotante o de tipo Hindú

Principio de funcionamiento

Los biodigestores de tipo Hindú son fáciles de entender y operar. Ellos proporcionan gas a una presión relativamente constante ($\approx 0,1$ atm) y el volumen de gas almacenado se identifica por la posición de la campana. A medida que la producción de gas aumenta, la campana metálica se desplaza hacia arriba indicando un incremento de la cantidad de biogás contenida en el biodigestor. ⁽³¹⁾ La campana se encuentra guiada por un marco de mampostería que le proporciona estabilidad y la mantiene erecta, pudiendo estar flotando dentro del líquido que se encuentra en el interior del biodigestor o en una chaqueta de agua separada (figura 2). En este último caso se ha estimado una mayor vida útil de la campana ya que permite que se apliquen capas de aceite usado.

Parámetros de operación

Los biodigestores de tipo Hindú alcanzan tamaños de entre 5 y 70 m³ a escala doméstica, mientras que volúmenes de hasta 248 m³ han sido reportados como de uso industrial [26]. En Cuba no se conocen experiencias de su aplicación a escala industrial. Su productividad volumétrica es ligeramente superior (0,3-0,6 m³ de biogás por m³ de biodigestor al día) a la de los biodigestores de tipo Chino, lo cual se debe a la forma uniforme en que fluye la materia orgánica dentro del biodigestor, [26] además de presentar al igual que el biodigestor de tapa fija una COV de hasta 2 kg SV m⁻³ d⁻¹. Al igual que los de tipo chino, los costos de inversión pueden variar en función del escenario, la fuente de adquisición de los recursos y la necesidad de contratación de mano de obra.

Biodigestor tubular o de bolsa de polietileno

Los biodigestores tubulares o de bolsa de polietileno (figura 3), están formados por una bolsa “resistente a las condiciones ambientales” [32]. La bolsa es considerada como frágil y susceptible a daños mecánicos y a los cambios de la temperatura ambiental, por lo que su vida útil se considera de entre 2 y 5 años [26]. La exposición extrema a temperaturas bajas puede reducir considerablemente la producción de biogás debido a su insuficiente aislamiento con el medio exterior, mientras que las altas temperaturas ambientales pueden catalizar la producción de otros compuestos volátiles diferentes del metano. Este tipo de plantas requiere, por lo tanto, de protección y posible aislamiento térmico contra condiciones climáticas extremas lo cual incrementa los costos de instalación de los mismos [26,33, 34]. Aun así, los recursos necesarios para construir las bolsas de polietileno son considerados menores que los que se necesitan para construir biodigestores de tipo chino e hindú [35].

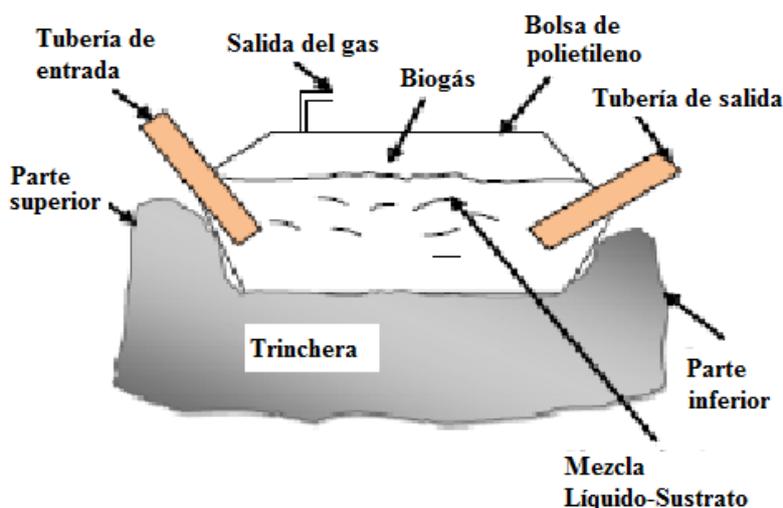


Fig. 3. Esquema general de un biodigestor tubular o de bolsa de polietileno

Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento es muy sencillo, los sustratos son alimentados por la tubería de entrada y ocupan la parte inferior de la bolsa mientras que el tope sirve como contenedor del biogás generado durante la operación. La presión de trabajo es usualmente alcanzada colocando pesos sobre la bolsa. Una vez digerido el sustrato alimentado, el digestato abandona la bolsa por la tubería de salida. ⁽²⁶⁾

Parámetros de operación

A diferencia de los de tipo chino e hindú, este tipo de biodigestor no admite residuales fibrosos, están diseñados fundamentalmente para el tratamiento de excretas [26]. Los volúmenes máximos que pueden alcanzar oscilan entre los 5 y 20 m³ por lo que su aplicación se ve limitada a escenarios con baja disponibilidad de sustratos (ej., centros porcinos de 150 cerdos equivalentes) [28]. Estos biodigestores pueden producir entre 0,3 y 0,8 m³ de biogás por m³ de biodigestor al día, con eficiencias de remoción de DQO de entre 65 y 70 % [24,26]. El TRH alcanza hasta 14 días y la COV hasta 4 kg SV m⁻³ d⁻¹, además de presentar ambos un régimen de trabajo semicontinuo. Son muy útiles para soluciones rápidas por sus cortos períodos de instalación y se puede reciclar el material plástico una vez culminada su vida útil [26].

Biodigestor híbrido cubano

Los biodigestores híbridos, también conocidos y patentados como biodigestor híbrido cubano (figura 4), han sido difundidos en Cuba a escala doméstica e industrial con resultados satisfactorios. Al igual que los de tipo chino consisten en un sistema cerrado, construido usualmente de mampostería y bajo el nivel de la tierra. Estos biodigestores poseen una tapa fija, que a diferencia de los de tipo chino, tiene una forma plana. Como todos los demás, poseen una entrada para alimentar el sustrato y una salida de digestato que a escala doméstica actúa como tanque de compensación. Para garantizar la hermeticidad de estos biodigestores y evitar salideros de gas se coloca un sello de agua en la parte superior de su tapa que forma un estanque que puede ser utilizado para la acuicultura o para otros usos [23]. Debido a la forma plana de sus estructuras, su construcción no requiere de excesivo trabajo o de una rigurosa supervisión de especialistas.

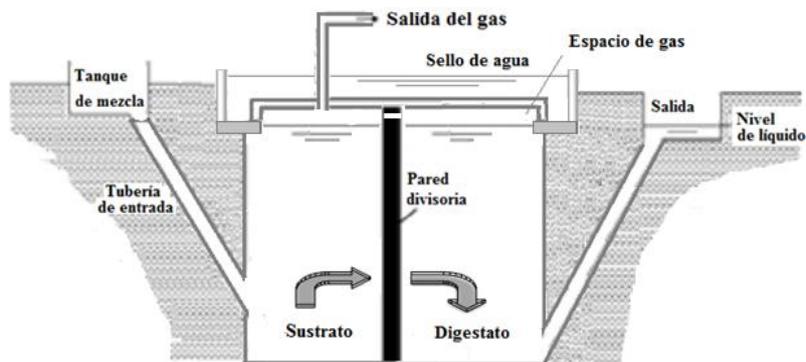


Fig. 4. Esquema general de un biodigestor híbrido cubano

Principio de funcionamiento

Los biodigestores híbridos combinan en su principio de funcionamiento el de los biodigestores de tipo chino, pues son de tapa fija, el de los de bolsas de polietileno pues en su interior funcionan como biodigestores secuenciales o de flujo pistón y el de los de tipo Hindú ya que tienen en su interior un laberinto marcado por paredes verticales, además como geometría de circulación horizontal poseen semejanzas con el reactor de flujo ascendente de manto de lodos (UASB). En ellos los sustratos son alimentados por la tubería de entrada y ocupan la parte inferior del biodigestor mientras que, en el tope, un espacio de unos 30 cm sirve como contenedor del biogás generado durante la operación (figura 4) [23]. La presión de trabajo es usualmente alcanzada según el tanque de compensación a escala doméstica (al igual que los de tipo chino).

Parámetros de operación

Estos biodigestores pueden ser utilizados para tratar una gran variedad de residuales, ya sean diluidos o concentrados y han sido aplicados en el país a residuales de la industria azucarera, excretas bovinas, porcinas y residuos vegetales (ej., restos de la producción del tomate). A escala doméstica sus volúmenes oscilan entre los 3 y 50 m³ mientras que a escala industrial alcanzan volúmenes de hasta 763 m³, pudiéndose tratar los residuales generados por 10 cerdos por cada m³ de reactor, a diferencia del reactor tipo "chino" donde solo se logra tratar los residuales de 3 cerdos por cada m³ de reactor. La productividad volumétrica de gas de estos biodigestores oscila entre 1,0 y 1,2 m³ de biogás por m³ de biodigestor al día, siendo la mayor reportada dentro de los minidigestores existentes en Cuba [23]. Además, la remoción de carga orgánica alcanza valores de hasta 60% de la DQO, el TRH de 2,5 días, alcanzando una COV de diseño de hasta 6 kg SV m⁻³ d⁻¹ y la calidad del biogás reportado por diseño logra 60 % de metano trabajando en régimen continuo. Este hecho permite la asimilación de mayores cargas orgánicas para lograr iguales eficiencias de remoción. Otro aspecto importante es el aprovechamiento del espacio constructivo, permitiendo la utilización de la cubierta del reactor en construcciones propias de los escenarios (ej. naves de cerdos, secaderos, aljibe de agua) [36].

Purificación del biogás

El sistema de purificación garantiza el acondicionamiento del biogás para su uso posterior en el hogar. Uno de los elementos del biogás más indeseable es el sulfuro de hidrógeno (H_2S) [37,38]. La reducción del contenido de H_2S en el biogás, por su alto poder corrosivo, contribuye a alargar la vida útil de los equipos. Algunos autores consideran que en pequeñas concentraciones (menor del 1%) no es imprescindible la eliminación del H_2S [39]. Sin embargo, los límites de tolerancia de H_2S en el biogás, a escala industrial, son inferiores al 0,1% [40,41].

A escala doméstica, el método de eliminación de H_2S más empleado en Cuba está basado en el uso de virutas de hierro. En estos filtros se conforman varias capas intercaladas de virutas de hierro y de madera. En la medida que el hierro se agota, puede ser renovado cambiando el material filtrante o haciendo pasar aire caliente a contracorriente por el mismo [42].

El contenido de agua en el biogás también debe ser eliminado, [42,43] pues se van formando gotas por condensación que se depositan en los puntos más bajos de la tubería de conducción de gas. Con el tiempo la cantidad de agua condensada aumenta, llegando a impedir el flujo normal de circulación del biogás [44,45]. Usualmente para eliminar esta agua condensada de las tuberías se coloca un drenaje o una trampa de agua en la parte más baja de la tubería.

Uso final del biogás a escala doméstica

En la mayoría de los casos el biogás es utilizado solamente para la cocción de los alimentos [35,46] y los excedentes producidos son enviados a la atmósfera. Teniendo en cuenta que el metano es un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global 34 veces superior al del dióxido de carbono, [47,48] resulta indispensable garantizar la utilización del 100 % del biogás producido. Existen varias opciones para diversificar el uso final del biogás a escala doméstica y evitar las emisiones de metano, entre ellas las lámparas de iluminación, la refrigeración, la cocción de alimentos en ollas arroceras y quemadores. Así mismo, el consumo de biogás oscila entre 150 y 200 L/h para una cocina de un quemador; entre 120 y 200 L/h para una lámpara de iluminación; y entre 50 y 100 L/h para un refrigerador doméstico [22].

Perspectivas actuales y futuras de los biodigestores a escala rural

Los biodigestores a escala rural independientemente de los diferentes tipos que existen son relativamente fáciles de instalar y de operar teniendo en cuenta que los usuarios son principalmente campesinos. Los biodigestores Chino e Hindú permiten el tratamiento de grandes volúmenes de residuales agropecuarios (hasta 70 m³) con alto contenido en fibra con similares porcentajes en remoción de la carga contaminante, siendo ligeramente superior el Hindú, debido a la forma uniforme en que fluye la materia orgánica dentro del biodigestor. El biodigestor de polietileno es una opción rápida para el manejo de excretas alcanzando un alto por ciento de remoción, tiene el inconveniente que admite menor volumen de carga orgánica y el periodo de duración de esta tecnología es corto si se compara con las anteriores [49]. La tecnología de biodigestor híbrido cubano, al ser una combinación de varios tipos de biodigestores, es la mejor opción ya que es más fácil de instalar que el tipo chino, permite mayor asimilación de carga orgánica que las tecnologías restantes, además de presentar la mayor productividad volumétrica de biogás [36].

A pesar de ser un paso importante para nuestro país el uso de tecnologías para la producción de energía renovable en las comunidades rurales, es conveniente resaltar que las experiencias internacionales demuestran que las tecnologías de alta carga como UASB, [50] reactor anaerobio discontinuo secuencial (ASBR), reactor anaerobio de lecho granular expandido (EGSB), entre otros) son más robustas y efectivas desde el punto de vista ambiental y energético, ⁽¹⁸⁾ por lo que se hace necesario abrir las puertas a las tecnologías de biogás de alta eficiencia existentes en el mundo.

Conclusiones

- 1. Las tecnologías de producción de biogás a escala rural ofrecen múltiples beneficios a sus usuarios como son la obtención de energía renovable, empleada fundamentalmente en la cocción de alimentos, efluentes líquidos que pueden ser empleados para el riego de los cultivos y efluentes sólidos que pueden ser aprovechados como abono orgánico. Los principales tipos de biodigestores que han sido difundidos en Cuba son: el "biodigestor***

de tapa fija o de tipo chino”, el “biodigestor de campana flotante o de tipo hindú”, el “biodigestor tubular o de bolsa de polietileno” y el “biodigestor híbrido cubano”. Estos difieren en cuanto a sus costos de inversión, sus parámetros de operación y sus impactos ambientales. Los parámetros de operación recopilados proporcionan información valiosa que apoyará la toma de decisiones en el sector rural cubano. Siempre que sea posible, se deben seleccionar aquellas tecnologías capaces de asimilar mayores cargas orgánicas (reactor híbrido cubano) y logren las mayores productividades volumétricas y eficiencias de remoción. Para la purificación del biogás el método más empleado en Cuba es la eliminación de H₂S a través de las virutas de hierro y la trampa de agua se utiliza para la eliminación de las gotas de este líquido que permanecen en el biogás.

Referencias bibliográficas

1. OKONKWO, Ugochukwu C., Ejiroghene ONOKPITE a Anthony O. ONOKWAI. Comparative study of the optimal ratio of biogas production from various organic wastes and weeds for digester/restarted digester. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences* [online]. 2018, **30**(2), 123–129. ISSN 1018-3639. Dostupné z: doi:10.1016/j.jksues.2016.02.002
2. HUANG, Xinlei, Sining YUN, Jiang ZHU, Tingting DU, Chen ZHANG a Xue LI. Mesophilic anaerobic co-digestion of aloe peel waste with dairy manure in the batch digester: Focusing on mixing ratios and digestate stability. *Bioresource Technology* [online]. 2016, **218**, 62–68. ISSN 0960-8524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2016.06.070
3. DEUBLEIN, Dieter a Angelika STEINHAUSER. *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction*. B.m.: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-3-527-64371-4.
4. HUIRU, Zeng, Yan YUNJUN, Federica LIBERTI, Bartocci PIETRO a Francesco FANTOZZI. Technical and economic feasibility analysis of an anaerobic digestion plant fed with canteen food waste. *Energy Conversion and*

Management [online]. 2019, **180**, 938–948. ISSN 0196-8904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2018.11.045

5. HRAD, Marlies, Martin PIRINGER a Marion HUBER-HUMER. Determining methane emissions from biogas plants – Operational and meteorological aspects. *Bioresource Technology* [online]. 2015, **191**, 234–243. ISSN 0960-8524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2015.05.016

6. RAJAGOPAL, Rajinikanth, Pierre ROUSSEAU, Nicolas BERNET a Fabrice BÉLINE. Combined anaerobic and activated sludge anoxic/oxic treatment for piggery wastewater. *Bioresource Technology* [online]. 2011, **102**(3), 2185–2192. ISSN 0960-8524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2010.09.112

7. ALBURQUERQUE, José Antonio, Carlos DE LA FUENTE, Alicia FERRER-COSTA, Lucía CARRASCO, Juan CEGARRA, Manuel ABAD a María Pilar BERNAL. Assessment of the fertiliser potential of digestates from farm and agroindustrial residues. *Biomass and Bioenergy* [online]. 2012, **40**(Supplement C), 181–189. ISSN 0961-9534. Dostupné z: doi:10.1016/j.biombioe.2012.02.018

8. ANGELIDAKI, I., L. ELLEGAARD a B. AHRING. Application of the anaerobic digestion process. *Biomethanation II*. 2003, Berlín: Springer.

9. BRAUN, Rudolf, Peter WEILAND a Arthur WELLINGER. Biogas from energy crop digestion. In: *IEA bioenergy task*. 2008, s. 1–20.

10. MCAULIFFE, Graham A., Deborah V. CHAPMAN a Colin L. SAGE. A thematic review of life cycle assessment (LCA) applied to pig production. *Environmental Impact Assessment Review* [online]. 2016, **56**, 12–22. ISSN 0195-9255. Dostupné z: doi:10.1016/j.eiar.2015.08.008

11. NASIR, Ismail M., Tinia I. Mohd GHAZI a Rozita OMAR. Anaerobic digestion technology in livestock manure treatment for biogas production: A review. *Engineering in Life Sciences* [online]. 2012, **12**(3), 258–269. ISSN 1618-2863. Dostupné z: doi:10.1002/elsc.201100150

12. WARD, A. J., HOBBS P. J., P. J. HOLLIMAN a D. L. JONES. Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*. 2008, 7928–7940.
13. BARRERA, E. L. *Anaerobic digestion of a very high strength and sulfate-rich vinasse: from experiments to modeling and sustainability assessment*. B.m., 2014. Gent University.
14. ERNESTO L. BARRERA, ELENA ROSA, HENRI SPANJERS, OSVALDO ROMERO, STEVEN DE MEESTER a JO DEWULF. A comparative assessment of anaerobic digestion power plants as alternative to lagoons for vinasse treatment: life cycle assessment and exergy analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2016, **113**, p:459–471.
15. SALOMON, Karina Ribeiro, Electo Eduardo SILVA LORA, Mateus Henrique ROCHA a Oscar ALMAZÁN DEL OLMO. Cost calculations for biogas from vinasse biodigestion and its energy utilization. *Sugar industry*. 2011, **136**, 217–223.
16. ROCHA, M. H., E. E. S. LORA, O. J. VENTURINI, J. C. P. ESCOBAR, J. J. C. S. SANTOS a A. G. MOURA. Use of the life cycle assessment (LCA) for comparison of the environmental performance of four alternatives for the treatment and disposal of bioethanol stillage. *International Sugar Journal*. 2010, **112**, 611–622.
17. BARRERA-CARDOSO, Ernesto L., Annerys CARABEO-PÉREZ, Leyanet ODALES-BERNAL, Luz M. CONTRERAS-VELÁZQUEZ a Lisbet LÓPEZ-GONZÁLEZ. Sistematización de aspectos teóricos sobre las tecnologías de producción de biogás a escala industrial. *Tecnología Química*. 2018, **38**(1), 29–45. ISSN 2224-6185.
18. PÉREZ, Tania, Ileana PEREDA, Deny OLIVA a Marcelo ZAIAT. Anaerobic digestion technologies for the treatment of pig wastes. *Cuban Journal of Agricultural Science* [online]. 2016, **50**(3) [vid. 2018-07-11]. ISSN 2079-3480. Dostupné z: <http://www.cjascience.com/index.php/CJAS/article/view/628>
19. CAMPOS-POZUELO, Elena. *Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria*

agroalimentaria [online]. B.m., 2001 [vid. 2020-02-02]. Tesis Doctoral. Universitat de Lleida. Dostupné z: <https://repositori.udl.cat/handle/10459.1/63733>

20. REYES, Yasmani Alba, Ernesto L. BARRERA, Anisley Sarduy VALLE, Maylier Pérez GIL, Orestes Hermida GARCÍA a Jo DEWULF. Life Cycle Assessment for the Cuban pig production: Case study in Sancti Spiritus. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2019, **219**, 99–109. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2019.02.047

21. GREEN, J. M. a M. N. SIBISI. Domestic biogas digesters: a comparative study. In: *Energy Conference: Proceedings of Domestic Use of Energy Conference*. 2002, s. 33–38.

22. GUARDADO, J. A. *Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas*. 2007.

23. HERMIDA, O. Huella energética de las producciones pecuarias. *CITECNA*. 2014.

24. SOSA, R., E. SANCHEZ, S. MONTALVO, R. CHAO a Y. SÁEZ. Gas production in tubular biodigesters/Producción de gas en biodigestores tubulares. *Revista Computadorizada de Producción Porcina*. 2005, **12**.

25. SANTERRE, Michael T. a Kirk R. SMITH. Measures of appropriateness: the resource requirements of anaerobic digestion (biogas) systems. *World Development* [online]. 1982, **10**(3), 239–261. ISSN 0305-750X. Dostupné z: doi:10.1016/0305-750X(82)90013-4

26. NZILA, Charles, Jo DEWULF, Henri SPANJERS, David TUIGONG, Henry KIRIAMITI a Herman VAN LANGENHOVE. Multi criteria sustainability assessment of biogas production in Kenya. *Applied Energy* [online]. 2012, **93**, 496–506. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.020>

27. SASSE, Ludwig, Christopher KELLNER a Ainea KIMARO. Improved biogas unit for developing countries. *GATE Publication, Eschborn*. 1991.

28. SOSA, R., Tamara CRUZ a J. L. de la FUENTE. Diversification and overviews of anaerobic digestion of Cuban pig breeding. *Cuban Journal of*

Agricultural Science [online]. 2014, **48**(1) [vid. 2020-02-03]. ISSN 2079-3480.
Dostupné z: <http://cjascience.com/index.php/CJAS/article/view/430>

29. MONTALVO, S. a L. GUERRERO. Tratamiento anaerobio de residuos. Producción de biogás. 2003.

30. GROUP, E. Promoting Biogas Systems in Kenya -A feasibility study - Kerea. *yumpu.com* [online]. 2007 [vid. 2019-02-03]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/en/document/read/11658383/promoting-biogas-systems-in-kenya-a-feasibility-study-kerea>

31. SINGH, K. Jatinder a Sarbjit Singh SOOCH. Comparative study of economics of different models of family size biogas plants for state of Punjab, India. *Energy Conversion and Management* [online]. 2004, **45**(9), 1329–1341. ISSN 0196-8904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2003.09.018

32. FREDERIKS, B. *Biogas bag installation manual for small bag-type plug flow digesters*. FACTFoundation, Eindhoven, Netherlands. [online]. 2011 [vid. 2019-10-02]. Dostupné z: <http://www.fact-foundation.com>

33. FERRER, Ivet, Marianna GARFÍ, Enrica UGGETTI, Laia FERRER-MARTÍ, Arcadio CALDERON a Enric VELO. Biogas production in low-cost household digesters at the Peruvian Andes. *Biomass and Bioenergy* [online]. 2011, **35**(5), 1668–1674. ISSN 0961-9534. Dostupné z: doi:10.1016/j.biombioe.2010.12.036

34. FERRER, I., M. GAMIZ, M. ALMEIDA a A. RUIZ. Pilot project of biogas production from pig manure and urine mixture at ambient temperature in Ventanilla (Lima, Peru). *Waste Management* [online]. 2009, **29**(1), 168–173. ISSN 0956-053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2008.02.014

35. RAJENDRAN, Karthik, Solmaz ASLANZADEH a Mohammad J. TAHERZADEH. Household Biogas Digesters—A Review. *Energies* [online]. 2012, **5**(8), 2911–2942. Dostupné z: doi:10.3390/en5082911

36. HERMIDA, O. *Producción energéticamente sostenible de carne de cerdo a partir del biogás producido por sus residuales en el Complejo Agroindustrial Guayos, Sancti Spíritus*. Cuba, 2018. Tesis de Maestría. Universidad de Cienfuegos.

37. ORTEGA VIERA, Lianys, Susana RODRÍGUEZ MUÑOZ, Elina FERNÁNDEZ SANTANA a Liuver BÁRCENAS PÉREZ. Principales métodos para la desulfuración del biogás. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. 2015, **36**(1), 45–56. ISSN 1680-0338.
38. DE ARESPOCHAGA, N., C. VALDERRAMA, C. MESA, L. BOUCHY a J. L. CORTINA. Biogas deep clean-up based on adsorption technologies for Solid Oxide Fuel Cell applications. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2014, **255**, 593–603. ISSN 1385-8947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2014.06.072
39. GUARDADO, J. A. a L. BÉRRIZ. Biodigestores simples, Secadores y Calentadores Solares. *Energía, Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible*. 2014.
40. WEILAND, Peter. Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology* [online]. 2010, **85**(4), 849–860. ISSN 1432-0614. Dostupné z: doi:10.1007/s00253-009-2246-7
41. WELLINGER, A. a A. LINBERG. *Biogas Upgrading and Utilization - IEA Bioenergy Task 24. International Energy Association, Paris, France*. 2000.
42. PERSSON, Margareta, Owe JÖNSSON a Arthur WELLINGER. Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection. In: *IEA Bioenergy task*. 2006, s. 1–34.
43. AWE, Olumide Wesley, Yaqian ZHAO, Ange NZIHOU, Doan Pham MINH a Nathalie LYCZKO. A Review of Biogas Utilisation, Purification and Upgrading Technologies. *Waste and Biomass Valorization* [online]. 2017, **8**(2), 267–283. ISSN 1877-265X. Dostupné z: doi:10.1007/s12649-016-9826-4
44. RYCKEBOSCH, E., M. DROUILLON a H. VERVAEREN. Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass and Bioenergy* [online]. 2011, **35**(5), 1633–1645. ISSN 0961-9534. Dostupné z: doi:10.1016/j.biombioe.2011.02.033
45. BAUER, Fredric, Tobias PERSSON, Christian HULTEBERG a Daniel TAMM. Biogas upgrading – technology overview, comparison and perspectives for the future. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* [online]. 2013, **7**(5), 499–511. ISSN 1932-1031. Dostupné z: doi:10.1002/bbb.1423

46. GAUTAM, Rajeeb, Sumit BARAL a Sunil HERAT. Biogas as a sustainable energy source in Nepal: Present status and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2009, **13**(1), 248–252. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2007.07.006
47. EGGLESTON, Simon, Leandro BUENDIA, Kyoko MIWA, Todd NGARA a Kiyoto TANABE. *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. B.m.: Institute for Global Environmental Strategies Hayama, Japan, 2006.
48. STOCKER, T.F., D. QIN, G.-K. PLATTNER, M. TIGNOR, S.K. ALLEN, J. BOSCHUNG, A. NAUELS, Y. XIA, V. BEX a P.M. MIDGLEY. *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom and New York: Cambridge University. 2013.
49. LANSING, Stephanie, Jay F. MARTIN, Raúl Botero BOTERO, Tatiana Nogueira DA SILVA a Ederson Dias DA SILVA. Methane production in low-cost, unheated, plug-flow digesters treating swine manure and used cooking grease. *Bioresource Technology* [online]. 2010, **101**(12), 4362–4370. ISSN 0960-8524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2010.01.100
50. KAPARAJU, Prasad, María SERRANO a Irini ANGELIDAKI. Optimization of biogas production from wheat straw stillage in UASB reactor. *Applied Energy*. 2010, **87**, 3779–3783. ISSN 0306-2619.