

# Estudio de la simulación hidrodinámica de un biodigestor doméstico de tipo tubular

Artículo largo



Erick Ramos\*; Gerardo Carranza; César Monterrosa; Priscila Gómez

Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, El Salvador

\*eramos@uca.edu.sv

## Resumen

Esta investigación ha sido impulsada por la falta de información sobre la hidrodinámica de biodigestores tubulares, a pesar de que, la agitación al interior del biodigestor está relacionada con la producción y calidad de biogás. Por lo tanto, se propone estudiar cinco variantes de la configuración interna de un biodigestor estándar utilizando el software “Simulation CFD” y 3D “Fusion 360” de Autodesk®. La simulación 3D muestra que el biodigestor modificado con paletas cilíndricas y el biodigestor con tuberías recortadas, presentan un mejor rendimiento en el grado de agitación transversal, lo que favorece la producción de biogás. Por el contrario, el biodigestor relleno con anillos no mejora significativamente el grado de agitación, lo cual es verificado mediante un modelo experimental en condiciones similares a las utilizadas en la simulación. Los resultados muestran que la configuración de tuberías recortadas favorece la generación de biogás, proponiendo una nueva alternativa constructiva con bajo costo de implementación.

### Palabras clave:

Biodigestor;  
Simulación; Autodesk;  
Hidrodinámica;  
Biogás.

## Study of the hydrodynamic simulation of a domestic tubular-type biodigester

### Abstract

The driving force of this research is the lack of information about tubular digester hydrodynamics, despite mixing inside the digester having direct impact on biogas production and quality. Thus five variants of internal configuration of a standard tubular digester have been proposed through use of Autodesk software, mainly Fusion 360 and Autodesk CFD. Results obtained from 3D simulation show that transversal mixing performance is increased by the tubular paddle modification and the shortening of the inlet and outlet piping in the digester increase stimulation of gas production. In contrast ring polymer contact media does not significantly improve agitation. This was verified by an experimental model with similar conditions to the simulation. Also, results from the variant that has shortened piping show that an increase in biogas production is possible with low cost of implementation.

### Keywords:

Biodigester;  
Simulation; Autodesk;  
Hydrodynamics;  
Biogas.

**Forma de citar:** Ramos, E., Carranza, G., Monterrosa, C., y Gómez, P. (2021). Estudio de la simulación hidrodinámica de un biodigestor doméstico de tipo tubular. *Red BioLAC*, 5, 41-47.

## Introducción

En las últimas décadas la producción de biogás ha tomado mayor relevancia al ser una fuente de bioenergía sostenible (Servati y Hajinezhad, 2020; Barbera *et al.*, 2018; D'Imporzano *et al.*, 2018). El biogás es producido a partir de la degradación de biomasa por medio de microorganismos en condiciones anaerobias. El proceso ocurre en cuatro etapas (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis), las cuales han sido ampliamente estudiadas en la literatura (Kashyap *et al.*, 2003; Molino *et al.*, 2013; Rowse, 2011). El proceso ocurre en espacios cerrados llamados biodigestores. Diferentes autores han propuesto distintos tipos de biodigestores a escala industrial y doméstica con el fin de llevar a cabo una biodigestión anaerobia de manera eficiente (Cuesta *et al.*, 2011; Ocaña, 2011). Sin embargo, el elevado costo de los biodigestores de estructura fija resulta una limitante para pequeños agricultores de zonas rurales, lo cual hace menos accesible este tipo de energía (Buhigas, 2010). Por este motivo durante los años 60 surgen en Taiwán, los biodigestores elaborados con materiales flexibles (membranas de nylon y neopreno) pero aún con costos elevados. Es a partir de los años 70 que se comienza a utilizar materiales de bajo costo y en la actualidad se usa PVC y polietileno, con mejoras en sus propiedades. Este tipo de material tiene comúnmente una forma tubular que se utiliza para colocar en sus extremos la entrada y salida del biodigestor y en el centro la salida de biogás, su dimensionamiento y principio de operación son bastante sencillos (Herrero, 2008).

El biodigestor tubular funciona por equilibrio hidráulico entre su entrada y salida; no obstante, en la revisión bibliográfica realizada no se ha encontrado un estudio profundo del tipo y magnitud de mezclado al interior de esta clase de biodigestor, a pesar de que el mezclado es un factor de operación requerido para maximizar la producción de biogás y crear las condiciones óptimas para la descomposición de los materiales orgánicos en el biodigestor. Además, la mezcla puede prevenir zonas con máximos y mínimos de concentración, como sedimentación en el fondo del biodigestor y escoria en la superficie del lodo (Servati & Hajinezhad, 2020; Kaparaju *et al.*, 2008; Karim *et al.*, 2005). Sin embargo, se han reportado casos donde la mezcla excesiva ha sido adversa para la producción de biogás (Benbelkacem *et al.*, 2013) por lo que es importante investigar sobre el comportamiento hidrodinámico al interior de los biodigestores.

Para estudiar el comportamiento hidrodinámico de los biodigestores es necesario experimentar de digestión a gran escala, pero estos pueden resultar en altos costos de inversión y tiempo. Sin embargo, los experimentos a escala de laboratorio y los modelos de simulación son apropiados para estudiar la mezcla al interior de un biodigestor a escala real (Subramanian *et al.*, 2015; Sadino-Riquelme *et al.*, 2018) y, por lo tanto, se utilizarán en este trabajo para estudiar la hidrodinámica al interior de un biodigestor de tipo tubular.

Diferentes autores en la literatura reportan programas utilizados para el estudio del proceso de digestión anaerobia en sus diferentes etapas. Saxena *et al.* (2019) reportan el uso de MATLAB R2014b para resolver un modelo dinámico para ecuaciones de balance de materia, tasa de crecimiento de bacterias, descomposición, entre otras. Ravendra *et al.* (2019) reportan el uso de Aspen Plus™ para optimizar el proceso producción de biogás. Li *et al.* (2019) describen también una simulación en Aspen Plus™ 7.2 para la captura de CO<sub>2</sub> del biogás por medio de la formación de hidrato de clatrato. Por otra parte, Harun *et al.* (2018) muestran en su trabajo la simulación de un proceso de biodigestión de desechos alimenticios, utilizando el programa SuperPro Designer. Sin embargo, no se han encontrado investigaciones que utilicen el CFD de Autodesk® para generar resultados en trabajos vinculados con la hidrodinámica de un biodigestor tubular.

Con base en lo expuesto anteriormente, la presente investigación se enfoca en la simulación de la hidrodinámica de un biodigestor comercial tubular (también llamado estándar en este trabajo), por medio de un software CFD de AutoDesk®. La selección de los métodos de agitación y sus respectivas configuraciones, son descritas en este trabajo; así como, los parámetros utilizados para las simulaciones realizadas. Además, se validan algunos resultados de la simulación por medio de la comparación con modelos a escala de laboratorio. Finalmente, se discuten los resultados obtenidos con el propósito de identificar qué configuraciones producen un mejor mezclado y potencialmente la mayor producción de biogás.

## Metodología

Para la selección del método de agitación y configuración del biodigestor tubular se tomaron en cuenta parámetros como: turbulencia dentro del biodigestor, disminución de zonas muertas, y aumento en la eficiencia en la producción de biogás. La primera configuración propuesta consta de anillos fijos dentro del biodigestor. A lo largo del biodigestor se colocaron 130 anillos plásticos fijos de 10 cm de diámetro y largo; estos parámetros se calcularon con base en el estudio de Herrero (2014). En la segunda configuración se colocaron dos *nozzles* cerca de la tubería de entrada del biodigestor, que introducen sustrato a un flujo de 1,8 m/s (Roberts *et al.*, 2005), y dos *nozzles* en la zona de salida que extraen el sustrato del biodigestor y que se recircula hacia las *nozzles* de la entrada. Para la tercera propuesta de configuración se recortaron las tuberías de entrada y de salida del biodigestor, dejando el extremo de entrada del sustrato más cercano a la estructura del biodigestor. La cuarta configuración se basa en la mezcla longitudinal del sustrato dentro del biodigestor. Para esto se colocó un agitador mecánico, el cual está compuesto de un eje principal con 18 paletas cilíndricas (barras de 10 cm de diámetro y 27 de largo) ubicadas de manera radial sobre el eje y el cual opera

a una velocidad de rotación de 7 rpm (Lübken, 2013); de esta manera se obtiene agitación a lo largo del biodigestor, pero de forma radial. La quinta propuesta de configuración es similar a la anterior, con la única diferencia que la forma de las paletas utilizadas es plana (2 cm de espesor y 10 cm de ancho) y que la cantidad de estas se incrementó a 26 distribuidas igualmente espaciadas a lo largo del eje. Las dimensiones y la cantidad de paletas se fijaron en función de la revisión de la bibliografía y las diferentes simulaciones realizadas en este trabajo.

La geometría de las configuraciones descritas se elaboró con el software Autodesk Fusion 360, al igual que la geometría del biodigestor estándar. Éste se encuentra conformado por un recipiente de homogenización a la entrada, tubería de alimentación, una bolsa tubular de polietileno, tubería de descarga y un recipiente colector a la salida. La geometría del biodigestor se definió siguiendo los parámetros especificados en el esquema comercial proporcionado por una empresa especializada en el diseño de biodigestores.

Las simulaciones del biodigestor estándar y sus cinco variantes se desarrollaron con el software de Autodesk Simulation CFD con la función Autosize para generar un número de nodos y malla óptimos para el volumen a simular. Con el editor de materiales del software se configuró un nuevo material con los parámetros de densidad y viscosidad medidos experimentalmente; estos valores se obtuvieron de los lodos anaerobios generados en la planta de tratamiento de una empresa del sector cervecero. La densidad se midió con un picnómetro y la viscosidad con un viscosímetro de bolas. Adicionalmente, la condición de frontera se estableció con una presión manométrica de cero, ya que la carga y descarga del biodigestor es a presión atmosférica. Para las condiciones iniciales de la simulación se estableció un volumen de fluido de trabajo dentro del biodigestor y en el depósito de entrada. Debido a que el fluido de trabajo se desplaza hacia el interior del biodigestor únicamente por gravedad, el vector de gravedad se definió como constante y negativo en la dirección vertical.

Para la parte experimental, se construyó un modelo del biodigestor estándar a una escala de 1:10, se usó polietileno para el volumen tubular del biodigestor; y para la entrada y salida, contenedores de polipropileno y tuberías de vidrio. Además, se elaboró un modelo del biodigestor relleno con 130 anillos de 1 cm de diámetro y longitud, adaptado de la información presentada en el estudio de Herrero (2014). Ambos biodigestores se conectaron a gasómetros independientes. Como alimentación de los biodigestores se utilizó una mezcla de sustituto de leche materna (Navarro y Rodríguez, 2012) y lodos activados provenientes de una empresa cervecera. Para la selección de la proporción de

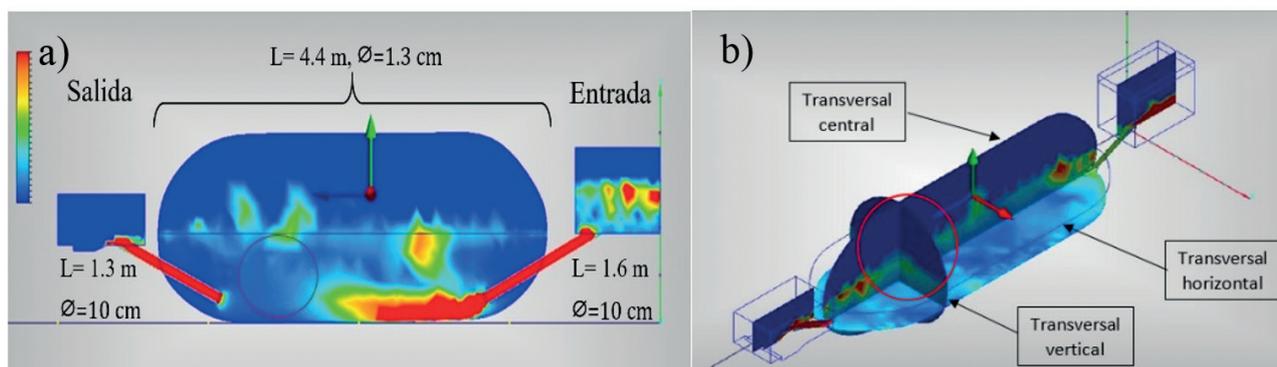
componentes más adecuada para la mezcla se aplicaron pruebas Biochemical Methane Potential (BMP) en base a la metodología ASTM E 2170-01 (Angelidaki *et al.*, 2009; Esposito *et al.*, 2012). Se prepararon 5 mezclas con un volumen total de 100 mL: 2 muestras con 90 mL de lodos activados y 10 mL de sustituto de leche materna; 2 muestras con 95,5 mL de lodos activados y 4,5 mL de sustituto de leche materna y 1 muestra de blanco con 100 mL de únicamente lodos activados. Luego, las muestras se purgaron con gas N<sub>2</sub> por 30 s y se dejaron en la incubadora a la temperatura de los lodos de la planta de tratamiento de la empresa cervecera.

El biogás obtenido durante un periodo de 23 días de fermentación se extrajo a diario por medio de una jeringa de 60 mL y se introdujo en un frasco de vidrio sellado con solución 1 N de NaOH. Se agitó por algunos minutos con el objetivo de hacer reaccionar el H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub> con el NaOH y de esta forma eliminarlos del biogás. Finalmente, se midió el volumen de metano en el frasco de vidrio con ayuda de una jeringa; así se calculó el volumen de biogás generado por la muestra y la cantidad de metano. Este procedimiento se realizó para cada una de las muestras con el objetivo de seleccionar la mezcla con mayor producción de biogás, para alimentar a los biodigestores. También es importante mencionar que se despreciaron los valores obtenidos de los primeros 3 días de fermentación, debido a la posible presencia de trazas de otros gases en el frasco al momento de extraer las muestras de biogás. Las muestras de biogás extraídas de los gasómetros eran analizadas según la metodología utilizada en las pruebas BMP descritas anteriormente; de esta forma se podía contabilizar el metano producido a diario por cada biodigestor a escala de laboratorio. Además, la cantidad de biogás producida por el blanco permite obtener por diferencia el metano producido únicamente por la incorporación del sustrato a los lodos.

## Resultados y discusión

### Simulación para configuraciones propuestas de Biodigestores

Se determinó que el tiempo adecuado para el análisis del biodigestor estándar es 40 s, esto es lo que tarda la alimentación, colocada a la derecha en la **Figura 1a**, en ingresar por completo. También se determinó que a los 9 s se presenta el mayor perfil de velocidades del fluido y, consecuentemente, el mayor mezclado en el sistema. Sin embargo, aún en este tiempo existe un volumen del biodigestor estándar que permanece estático (indicado por el círculo rojo y el volumen sobre la tubería de entrada), por lo que se considerará como puntos de mejora y comparación para el resto de las configuraciones.



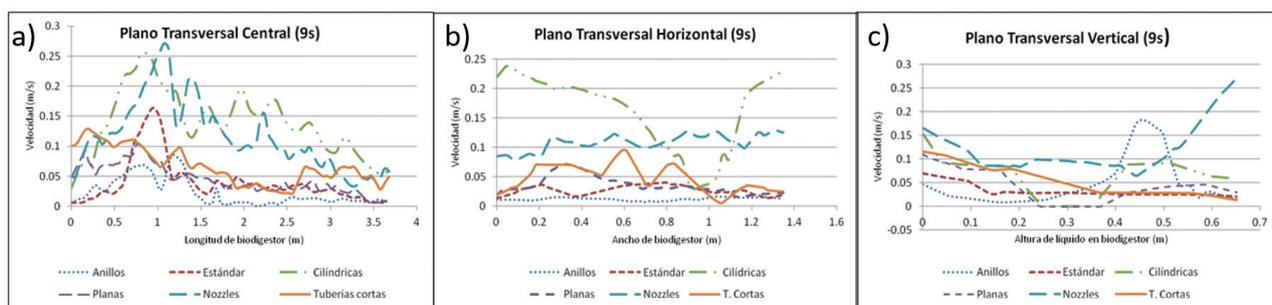
**Figura 1** | Planos analizados en el biodigestor: a) plano transversal central del biodigestor estándar en el tiempo de mayor mezclado (9 s) y b) distribución de planos para el análisis del perfil de velocidades en el biodigestor y las configuraciones.

Definidos los tiempos para el análisis, se seleccionan las vistas más representativas que permitan una discusión de los resultados. Cada configuración se analizará desde un plano transversal vertical, transversal horizontal y transversal central, como se muestra en la **Figura 1b**. La vista transversal vertical está colocada en el punto de menor mezcla en el modelo de biodigestor estándar para 9 s, esta se encuentra indicada por una circunferencia de color rojo en la **Figura 1b**.

Es relevante indicar que el análisis se centra en disminuir los puntos muertos de fluido, es decir, reducir el volumen de fluido con velocidad menor a 0,02 m/s (Deublein &

Steinhauser, 2008) durante la alimentación del biodigestor. Por lo tanto, las configuraciones con menos puntos muertos implicarán una mejor mezcla y una producción de biogás más eficiente.

Con base en los resultados obtenidos en la simulación 3D, se realiza una comparación a 9 s de las velocidades del fluido en la intersección de los planos descritos en la **Figura 1b**. En la **Figura 2** se muestran el comportamiento de la velocidad para el biodigestor estándar y las configuraciones propuestas: anillos, *nozzles*, entrada recortada, paletas tubulares y paletas planas.



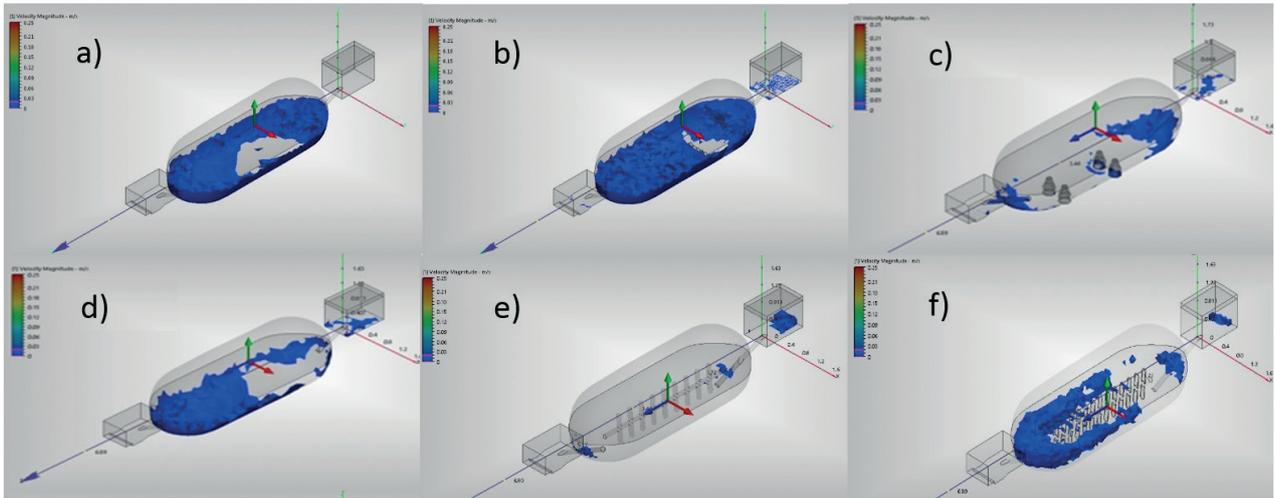
**Figura 2** | Perfil de velocidad para los tres planos analizados en el biodigestor estándar y sus cinco variantes.

En la **Figura 2a** se observa que las configuraciones con mayor perfil de velocidades son paletas cilíndricas y *nozzles*, mientras que la configuración con menor perfil de velocidades es la de anillos, que incluso es menor al del modelo estándar. Los picos de velocidad a una longitud de 1 m se deben a que ahí se ubica la descarga del tubo de alimentación. También se observa que antes de 1 m de longitud, es decir, sobre la tubería de alimentación, la agitación y mezclado es menor para el biodigestor estándar y con anillos, pero no para el resto de las configuraciones. En la **Figura 2b** se observa que la configuración de paletas cilíndricas y *nozzles* presentan mayor mezclado; adicionalmente, la configuración de tuberías recortadas

muestran un mayor mezclado que el biodigestor estándar en el 75 % del ancho del biodigestor. En la **Figura 2c**, las curvas para las configuraciones de paletas planas y cilíndricas, se observa que a 0,3 m de profundidad se alcanzan valores de velocidad de cero, debido a que en esos puntos se encuentran superficies sólidas donde la velocidad del fluido es igual a cero. Es relevante que el biodigestor con entradas cortas mejora en la mayoría de los puntos al biodigestor estándar; esto es favorable porque las diferencias constructivas son mínimas y sin costos adicionales. En la **Figura 3** se muestran estos resultados en una vista 3D para cada configuración propuesta y el biodigestor estándar. Al comparar la **Figura 3a** y **3d** se observa que el biodigestor

con tuberías recortadas reduce las regiones de color azul (regiones con velocidad del fluido menor a 0,02 m/s) con respecto al biodigestor estándar, esto mejora el mezclado y potencialmente la producción de biogás. Sin embargo, las

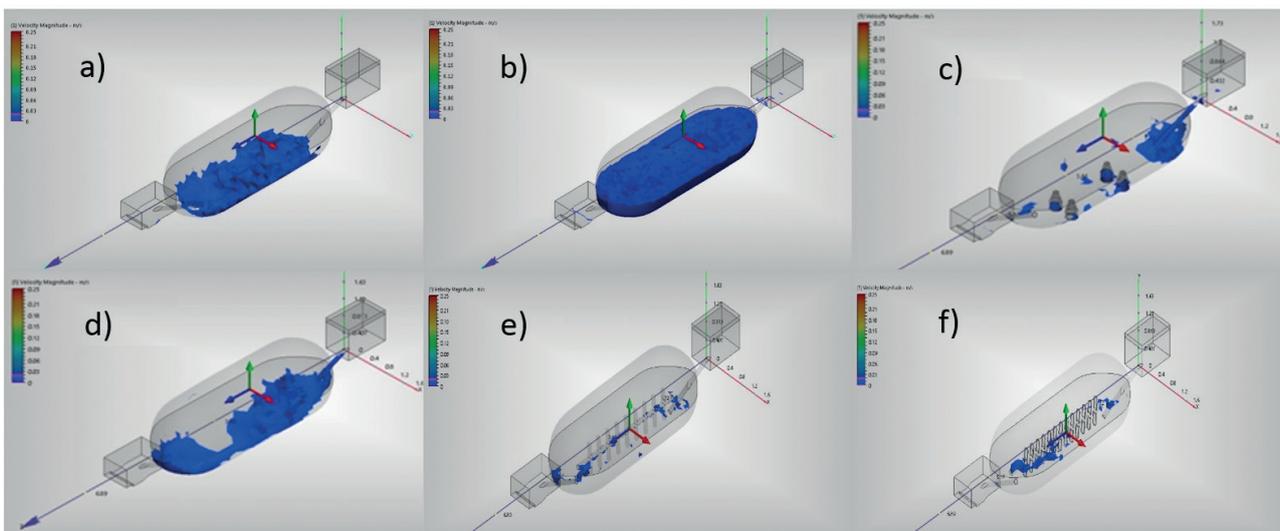
configuraciones de paletas tubulares (**Figura 3e**) y *nozzles* (**Figura 3c**), presentan el mejor mezclado al tener escasas regiones azules.



**Figura 3** | Regiones de color azul dentro de los biodigestores con velocidad menor a 0,02 m/s y a un tiempo de 9 s: a) Biodigestor estándar, b) Biodigestor con anillos, c) *Nozzles*, d) Entradas cortas, e) Paletas tubulares y f) Paletas planas.

Para el análisis en el tiempo de 40 s, se observa que los resultados mostrados en la **Figura 4** son similares a los obtenidos a 9 s en la **Figura 3**. El modelo de biodigestor con anillo no mejora significativamente el mezclado lo cual es evidente en la **Figura 4b** debido al gran tamaño de la región azul, mientras que la configuración de *nozzles*, paletas cilíndricas y planas mejoran en gran medida la agitación

del sistema lo que implica una mejora en la producción de biogás. Esto se confirma debido a las escasas regiones de color azul en las **Figuras 4e, 4c y 4f**. Nuevamente se vuelve relevante la configuración de entradas cortas (**Figura 4d**) porque sin mayores cambios mejora el mezclado con respecto al modelo estándar (**Figura 4a**).



**Figura 4** | Regiones de color azul dentro de los biodigestores con velocidad menor a 0,02 m/s a un tiempo de 40 s: a) Biodigestor estándar, b) Biodigestor con anillos, c) *Nozzles*, d) Entradas cortas, e) Paletas tubulares y f) Paletas planas.

## Producción de Biogás en Modelos de Laboratorio

Los modelos seleccionados para la verificación de resultados a escala laboratorio fueron el biodigestor estándar y de anillos. A través de los resultados de las pruebas BMP se seleccionó para su alimentación una mezcla (90:10 en volumen) de lodo activado de una planta de tratamiento de una empresa cervecera y sustituto de leche como materia orgánica a digerir. En un periodo de 20 días de fermentación el biodigestor estándar generó una mayor cantidad de biogás (665,2 mL) y de mejor calidad (50,4 % de CH<sub>4</sub>) con respecto al biodigestor con anillos, que generó 266,1 mL de biogás y 42,4 % de metano. Estos resultados son acordes a los obtenidos en la simulación donde el mezclado en el biodigestor de anillos fue menor al estándar.

## Conclusiones

Los resultados muestran que el biodigestor comercial de tipo tubular presenta una hidrodinámica que puede ser mejorada para favorecer la eficiencia en la producción de biogás. Sin embargo, el análisis del biodigestor tubular estándar resultó una base útil para comparar el grado de agitación en las configuraciones propuestas en este trabajo, de las cuales, la que presentó un mayor grado de agitación fue la configuración de paletas cilíndricas.

Es importante indicar que la configuración de tuberías recortadas logra una mejora significativa en el grado de agitación, inferior al alcanzado con la configuración de paleta cilíndricas, pero que en comparación con el biodigestor estándar permite un mejor aprovechamiento del sustrato y sin introducir costos adicionales en los materiales de construcción.

La configuración de anillos generó una reducción en el grado de agitación, lo que se traduce en una disminución en la eficiencia de producción de biogás. La simulación se validó con resultados experimentales de los modelos de biodigestores estándar y con anillos, los cuales mostraron una disminución del 15,9 % de metano, con respecto al estándar.

## Referencias

- Angelidaki, I. A., Bolzonella, M., Borzacconi, D., Campos, L., Guwy, J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., & van Lier J. B. (2009). Defining the Biomethane Potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for Batch assays. *Water science and Technology*, 59(5), 927-934. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.040>
- Barbera, E., Menegon, S., Banzato, D., D'Alpaos, C., & Bertucco, A. (2018). From biogas to biomethane: a process simulation-based techno-economic comparison of different upgrading technologies in the Italian context, *Renewable Energy*, 135, 663-673. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.052>
- Benbelkacem, H., Garcia-Bernet, D., Bollon, J., Loisel, D., Bayard, R., Steyer, J. P., Gourdon, R., Buffière, P., & Escudé, R. (2013). Liquid mixing and solid segregation in high-solid anaerobic digesters. *Bioresource Technology*, 147, 387-394. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.027>
- Buhigas, A. (2010). Sistema para el tratamiento de desechos orgánicos [Tesis de grado, Universidad Carlos III de Madrid]. <https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/id/45617/PFC/>
- Cuesta, M., Sánchez, F., Crespo, G. y Fernández, S. (2007). Informe de vigilancia de Madri+d: Situación actual de la producción de biogás y su aprovechamiento. Madrid: Círculo de innovación en tecnologías medioambientales y energía Madri+d (CITME). [http://www.madrid.org/media/mtec/17\\_Situacion\\_actual\\_produccion\\_biogas\\_y\\_aprovechamiento.pdf](http://www.madrid.org/media/mtec/17_Situacion_actual_produccion_biogas_y_aprovechamiento.pdf)
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). Biogas from waste and renewable resources. WILEY VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527621705>
- D'Imporzano, G., Pilu, R., Corno, L., & Adani, F. (2018). Arundo donax L. can substitute traditional energy crops for more efficient, environmentally-friendly production of biogas: a Life Cycle Assessment approach. *Bioresource Technology*, 267, 249-256. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.053>
- Esposito, G., Frunzo, L., & Liotta, F. (2012). Bio-Methane Potential test to measure the biogas production from the digestion and Co-digestion of complex organic substrates. *The Open Environmental Engineering Journal*, 5, 1-8. <https://doi.org/10.2174/1874829501205010001>
- Harun, N., Othman, N. A., Zaki, N., Rasul, M., Samah, R., & Hashim, H. (2019). Simulation of anaerobic digestion for biogas production from food waste using SuperPro designer, *Materials Today: Proceedings*, 19(4), 1315-1320. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.143>
- Herrero, J. M. (2008). Biodigestores familiares, guía de diseño y manual de instalación. Cooperación Técnica Alemana GTZ- Energía. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1048.6242>
- Herrero, M., Alvarez, R., Rojas, M. R., Aliaga, L., Céspedes, R., & Carbonell, J. (2014). Improvement through low cost biofilm carrier in anaerobic tubular digestion in cold climate regions. *Bioresource Technology*, 167, 87-93. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.115>

- Kaparaju, P., Buendia, I., Ellegaard, L., & Angelidakia, I. (2008). Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: lab-scale and pilot-scale studies. *Bioresource Technology*, 99(11), 4919-4928. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.015>
- Karim, K., Hoffmann, R., Klasson, K. T., & Al-Dahhan, M. H. (2005). Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mode of mixing. *Water Research*, 39(15), 3597-3606. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.06.019>
- Kashyap, D.R., Dadhich, K.S., & Sharma, S.K. (2003). Biomethanation under psychrophilic conditions: a review. *Bioresource Technology*, 87, 147-153. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00205-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00205-5)
- Li, Q., Fan, S., Chen, Q., Yang, G., Chen, Y., Li, L., & Li, G. (2019). Experimental and process simulation of hydrate-based CO<sub>2</sub> capture from biogas. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 72, 103008. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.103008>
- Lübken, M., Koch, K., Klauke, L., Gehring, T., & Wichern, M. (2013). CFD investigation of the flow characteristics of a plug flow anaerobic digester for lignocellulosic biomass methanisation. *World Congress on Anaerobic Digestion: Recovering (Bio) Resources for the World*. <http://www.redbiogas.cl/wp-content/uploads/2013/07/IWA-11803.pdf>
- Molino, A., Nanna, F., Ding, Y., Bikson, B., & Braccio, G. (2013). Biomethane production by anaerobic digestion of organic waste. *Fuel*, 103, 1003-1009. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.07.070>
- Navarro, E., y Rodríguez, M. (2012). Evaluación del potencial de generación de biogás de desechos agroindustriales de la bahía de jiquilisco. [Trabajo de grado, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas]. <http://bvirtual.uca.edu.sv/repo/tesis/157472.pdf>
- Ocaña, F. (2011). Biodigestor anaerobio de laboratorio. [Tesis de grado, Universidad Carlos III de Madrid]. <http://hdl.handle.net/10016/13040>
- Ravendran, R., Abdulrazik, A., & Zailan, R. (2019). Aspen Plus simulation of optimal biogas production in anaerobic digestion process, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 702, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/702/1/012001>
- Roberts, P. J., Tian, X., Lee, S., Sotiropoulos, F., & Duer, M. (2005). *Mixing in Water Storage Tanks*. AWWA Research Foundation. <https://anyflip.com/zluf/eqtm>
- Rowse, L. E. (2011). Design of small scale anaerobic digester for application in rural developing countries. [Tesis de máster, Universidad de Florida]. <https://digitalcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4519&context=etd>
- Servati, P., & Hajinezhad, A. (2020). CFD simulation of anaerobic digester to investigate sludge rheology and biogas production. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 10, 885-899. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00793-z>
- Subramanian, B., Miot, A., Jones, B., Klibert, C., & Pagilla, K.R. (2015). A full-scale study of mixing and foaming in egg-shaped anaerobic digesters. *Bioresource Technology*, 192, 461-470. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.023>
- Sadino-Riquelme, C., Hayes, R., Jeison, D., & Donoso-Brav, A. (2018). Computational fluid dynamic (CFD) modelling in anaerobic digestion: General application and recent advances, *Critical Reviews Environmental Science Technology*, 48(1), 39-76. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1440853>
- Saxena, S., Kumar, V., & George, S. (2019). Modeling & simulation studies on batch anaerobic digestion of hydrodynamically cavitated tannery waste effluent for higher biogas yield, *Ultrasonics Sonochemistry*, 58, 104692, 1350-4177. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104692>