



EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS CON LA APLICACIÓN DE DIFERENTES SUSTRATOS EN UN BIODIGESTOR ANAERÓBICO CONTINUO A PARTIR DE UNA SOLUCIÓN NUMÉRICA

Laura Daniela Marín Rodríguez, Cristian Alberto Arenas Trujillo, Andrés Felipe Guerrero Guerrero

**Universidad de Cundinamarca
Fusagasugá, Colombia**

Resumen

La digestión anaeróbica (DA) está definida como un proceso bioquímico, en el cual, bajo la ausencia de oxígeno, diversas poblaciones bacterianas descomponen la materia orgánica con el fin de obtener biogás. Este producto, es una fuente de energía renovable que permite en gran porcentaje el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, residuos de origen animal, plantas de tratamiento de aguas residuales, entre otros. Considerando el beneficio que pueden aportar los residuos sólidos orgánicos (RSO) para la obtención de biogás y posterior transformación en energía eléctrica, nace la propuesta de implementar un biodigestor continuo. Para llevar a cabo este proceso es necesario evaluar el comportamiento dinámico y producción de biogás de la DA a partir de modelos matemáticos y con los datos obtenidos de una revisión bibliográfica bajo la aplicación de diferentes sustratos. A partir de esto, se obtiene que la mayor producción de biogás se da con la aplicación de aguas residuales y vinazas de tequila como sustrato, en comparación, con el ensilaje de maíz y ensilaje de pasto. Adicionalmente, el pH en la zona neutral determina que el proceso de DA simulado es óptimo.

Palabras clave: digestión anaeróbica; biogás; AMOCO

Abstract

Anaerobic digestion (AD) is defined as a biochemical process in which, in the absence of oxygen, various bacterial populations decompose organic matter to obtain biogas. This product is a renewable energy source that allows a large percentage of organic solid waste, animal waste, wastewater treatment plants, among others, to be used. Considering the benefit that organic solid waste (OSW) can provide for obtaining biogas and its subsequent transformation into electrical energy, the proposal to implement a continuous biodigester was born. To carry out this process it is necessary to evaluate the dynamic behavior and biogas production of the AD from mathematical models and with the data obtained from a literature review under the application of different substrates. From this, it is obtained that the highest biogas production occurs with the application of wastewater and tequila stillage as substrate, compared to corn silage and grass silage. Additionally, the pH in the neutral zone determines that the simulated AD process is optimal.

Keywords: anaerobic digestion; biogas; AMOCO

1. Introducción

En la actualidad, el biogás es considerado como una fuente de energía renovable que se puede obtener mediante el proceso de digestión anaeróbica (DA) de materia orgánica, a través de cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Machado-Higuera, 2018). Este proceso bioquímico puede analizarse con el desarrollo de modelos matemáticos que permitan evaluar el comportamiento dinámico de las variables de estado inmersas en la DA, así como llegar a una aproximación de la producción real de metano y dióxido de carbono.

Por lo tanto, en un proyecto correspondiente a la línea de transformación de energías de la Universidad de Cundinamarca con la participación de la Universidad Distrital, surge la necesidad de desarrollar una evaluación del comportamiento dinámico de un biodigester anaeróbico continuo incluyendo diferentes fuentes de sustrato, y criterios operacionales con el fin de establecer las condiciones técnicas para una mayor producción de biogás. Este proyecto se denomina "Prototipo de sistema de generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos orgánicos de la plaza de mercado del municipio de Fusagasugá" y es desarrollado en cuatro fases.

De este modo, la ejecución de la fase II del proyecto de investigación se enfoca en la solución de la problemática presentada previamente, e inicia con la resolución del modelo matemático AMOCO (Bernard et al., 2001), que incluye únicamente las etapas acidogénica y metanogénica de la DA, con el método numérico Runge-Kutta de quinto orden (Chapra & Canale, 2007). Posteriormente, tomando como referencia una revisión bibliográfica, se seleccionaron los parámetros cinéticos del modelo con la aplicación de los siguientes sustratos: aguas residuales obtenidas de una destilería de vino (Bernard et al., 2001), ensilaje de maíz (Salgado, 2019), vinazas de tequila (Hmissi et al., 2018) y ensilaje de pasto (Salgado, 2019). Con base en esto, se realizó un software en el entorno de programación MATLAB que simula la DA durante 40 días en un biorreactor continuo asumiendo que la mezcla es completamente homogénea y se encuentra en condiciones mesofílicas (37°C) (Bernard et al., 2001).



A partir de los resultados de la simulación, se obtuvo la respuesta dinámica del sustrato orgánico, AGVs, poblaciones bacterianas, alcalinidad, carbono inorgánico, pH y producción de biogás con la aplicación de diferentes sustratos. De acuerdo con lo anterior, se pudo comprobar que los modelos matemáticos que describen la DA, tienen la capacidad de reproducir de forma acertada el comportamiento y la complejidad del bioproceso con la implementación de diversos sustratos, inóculos y condiciones operacionales.

Este procedimiento representa una base para el modelado dinámico de la DA de residuos sólidos orgánicos, sin embargo, los parámetros del modelo deben ser ajustados con datos obtenidos de un proceso experimental en un prototipo de biorreactor continuo. En consecuencia, esto permitirá establecer una aproximación de la producción real de biogás con la aplicación de RSO como sustrato.

2. Modelos matemáticos

El proceso de digestión anaeróbica puede ser descrito por medio de modelos matemáticos que se fundamentan en variables fisicoquímicas y biológicas con la finalidad de estimar la producción de biogás. A lo largo de los años, diferentes autores han propuesto modelos con múltiples factores determinantes en el proceso, el más utilizado en investigaciones y aplicaciones industriales ha sido el modelo ADM1 (Anaerobic Digestion Model No.1) presentado por el grupo IWA (International Water Association) en el 2001 (Batstone et al., 2002) (Delgadillo Mirquez et al., 2018). Este modelo cuenta con un grado de complejidad alto dado que describe el proceso biológico a partir de una amplia gama de ecuaciones diferenciales, ecuaciones algebraicas, 32 variables de estado junto a parámetros cinéticos y estequiométricos (Delgadillo Mirquez et al., 2018). Con base en este modelo se han realizado diversas simplificaciones de gran aplicabilidad, uno de los modelos matemáticos más representativo es AMOCO, caracterizado por su simplicidad y precisión (Ficara et al., 2012). AMOCO presenta el balance de masas en dos etapas del proceso de digestión anaeróbica: acidogénesis y metanogénesis con dos poblaciones bacterianas X1 y X2 e incluye equilibrios electroquímicos con el propósito de incluir la alcalinidad (Machado-Higuera, 2018)(Bernard et al., 2001). De este modo, (Bernard et al., 2001) plantea que en la etapa acidogénica, la población bacteriana X1 consume el sustrato S1 y produce CO₂ y AGVs, mientras que en la fase metanogénica, la población bacteriana X2 emplea como sustrato (S2) a los AGVs para producir metano y dióxido de carbono. De acuerdo con lo anterior, este modelo únicamente incorpora seis variables de estado: sustrato orgánico (S1), sustrato acetogénico (S2), población bacteriana acidogénica (X1), población bacteriana metanogénica (X2), alcalinidad (Z) y carbono inorgánico (C).

3. Fuentes de sustrato utilizadas

Con el propósito de verificar el comportamiento dinámico del proceso de DA en el software que se elaborará y sobre la base de las fuentes bibliográficas revisadas, se seleccionan cuatro artículos que desarrollan el modelo AMOCO. En ellos, se emplean diversos sustratos e identifican experimentalmente los datos para la implementación del modelo matemático que describe la DA.



Los sustratos seleccionados corresponden a aguas residuales (Bernard et al., 2001), ensilaje de maíz (Salgado, 2019), vinazas de tequila (Hmissi et al., 2018) y ensilaje de pasto (Salgado, 2019). A continuación, en la Tabla 1. se presentan los parámetros cinéticos y coeficientes de rendimiento empleados para cada simulación:

Tabla 1. Parámetros del modelo AMOCO para aguas residuales, ensilaje de maíz, vinazas de tequila y ensilaje de pasto.

Parámetros \ Sustrato	Aguas residuales	Ensilaje de maíz	Vinazas de tequila	Ensilaje de pasto	Unidad
μ_{1max}	1.2	4.2	1.96	0.7	d^{-1}
μ_{2max}	0.74	1.0	2.86	0.74	d^{-1}
K_{S1}	7.1	469.1	6.37	1.3	g/L
K_{S2}	9.28	34.5	49.64	34.4	mmol/L
K_{I2}	256	250	416.77	991.3	mmol/L
k_1	42.14	3.14	28.35	24	g/g
k_2	116.5	155	86.45	220.7	mmol/g
k_3	26	300	165.11	874	mmol/g
k_4	50.6	80.6	50.16	90	mmol/g
k_5	343.6	3.6	336.64	200	mmol/g
k_6	453	350	453	488.2	mmol/g

4. Resultados

En esta sección se presenta la solución del modelo AMOCO por medio del método Runge-Kutta de Butcher (Chapra & Canale, 2007), lo anterior para realizar la simulación del proceso de DA y evaluación del comportamiento de las variables de estado. Luego, se expone el análisis de resultados con el fin de establecer la mayor producción de biogás con la aplicación de diversos tipos de sustrato como aguas residuales obtenidas de una destilería de vino, ensilaje de maíz, vinazas de tequila y ensilaje de pasto en el proceso de digestión anaeróbica.

4.1 Solución numérica del modelo matemático AMOCO

La solución de las ecuaciones diferenciales ordinarias autónomas de primer orden y no lineales que integran el modelo AMOCO se realiza con el método de solución numérica Runge-Kutta de Butcher (Chapra & Canale, 2007) como se presenta a continuación:

- Población bacteriana acidogénica X_1 :

$$\frac{dX_1}{dt} = \left[\frac{u_{1,max} S_1}{S_1 + K_{S1}} - \alpha D - k_{d1} \right] X_1 \quad (1)$$

$$\overline{x_{1(n+1)}} = \overline{x_{1(n)}} + \frac{h}{90} (7\bar{a} + 32\bar{c} + 12\bar{d} + 32\bar{e} + 7\bar{f}) \quad (2)$$

- Población bacteriana metanogénica X_2 :



$$\frac{dX_2}{dt} = \left[\frac{u_{2,\max} S_2}{S_2 + \frac{S_2^2}{K_{I2}} + K_{S2}} - \alpha D - k_{d2} \right] X_2 \quad (3)$$

$$\overline{x_{2(n+1)}} = \overline{x_{2(n)}} + \frac{h}{90} (7\bar{a} + 32\bar{c} + 12\bar{d} + 32\bar{e} + 7\bar{f}) \quad (4)$$

- Sustrato orgánico S_1 :

$$\frac{dS_1}{dt} = D(S_{1,in} - S_1) - k_1 \cdot \frac{u_{1,\max} S_1}{S_1 + K_{S1}} \cdot X_1 \quad (5)$$

$$\overline{s_{1(n+1)}} = \overline{s_{1(n)}} + \frac{h}{90} (7\bar{a} + 32\bar{c} + 12\bar{d} + 32\bar{e} + 7\bar{f}) \quad (6)$$

- Sustrato metanogénico S_2 (Ácidos Grasos Volátiles):

$$\frac{dS_2}{dt} = D(S_{2,in} - S_2) + k_2 \cdot \frac{u_{1,\max} S_1}{S_1 + K_{S1}} \cdot X_1 - k_3 \cdot \frac{u_{2,\max} S_2}{S_2 + \frac{S_2^2}{K_{I2}} + K_{S2}} \cdot X_2 \quad (7)$$

$$\overline{s_{2(n+1)}} = \overline{s_{2(n)}} + \frac{h}{90} (7\bar{a} + 32\bar{c} + 12\bar{d} + 32\bar{e} + 7\bar{f}) \quad (8)$$

- Alcalinidad (Z):

$$\frac{dZ}{dt} = D(Z_{in} - Z) \quad (9)$$

$$\overline{z_{(n+1)}} = \overline{z_{(n)}} + \frac{h}{90} (7\bar{a} + 32\bar{c} + 12\bar{d} + 32\bar{e} + 7\bar{f}) \quad (10)$$

- Carbono inorgánico (C):

$$\frac{dC}{dt} = D(C_{in} - C) + k_4 \cdot \frac{u_{1,\max} S_1}{S_1 + K_{S1}} \cdot X_1 + k_5 \cdot \frac{u_{2,\max} S_2}{S_2 + \frac{S_2^2}{K_{I2}} + K_{S2}} \cdot X_2 - k_L a [C + S_2 - Z - K_H P_c] \quad (11)$$

$$\overline{c_{(n+1)}} = \overline{c_{(n)}} + \frac{h}{90} (7\bar{a} + 32\bar{c} + 12\bar{d} + 32\bar{e} + 7\bar{f}) \quad (12)$$

Las constantes a, b, c, d, e y f corresponden a la resolución de los puntos de evaluación para cada ecuación diferencial con el método Runge-Kutta de quinto orden como se detalla en el Capítulo 25 del libro de (Chapra & Canale, 2007).



4.2 Análisis de resultados

Con base en la simulación en el entorno de programación MATLAB que integra la solución del modelo AMOCO y la tabla presentada en la sección 3, que corresponde a los parámetros de estimación y coeficientes de rendimiento del modelo ajustados a un proceso de DA con aguas residuales, ensilaje de maíz, vinazas de tequila y ensilaje de pasto, se obtienen los siguientes resultados. La Figura 1. y la Figura 2. corresponden a las simulaciones que representan el comportamiento de S1, S2, X1 y X2 con la aplicación de ensilaje de maíz y vinazas de tequila, ya que presentan un menor tiempo de estabilización en comparación con los otros sustratos. Por otro lado, en la Figura 3. y en la Figura 4. se exponen las simulaciones aguas residuales y vinazas de tequilla, debido a que, presentan las tendencias de mayor producción de biogás.

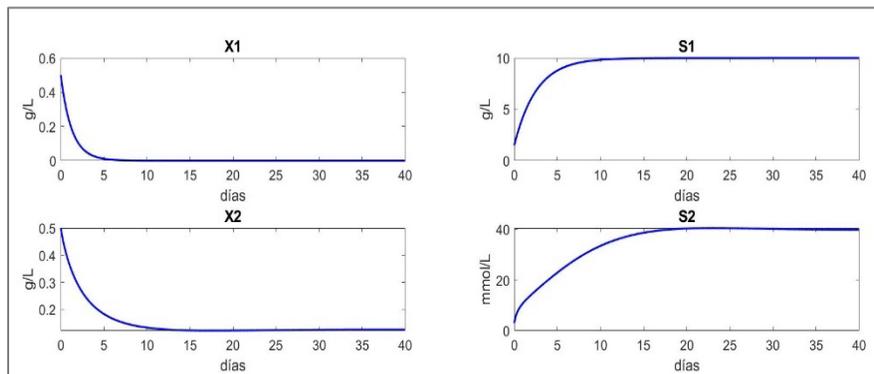


Figura 1. Comportamiento de las variables del modelo AMOCO para la DA con ensilaje de maíz

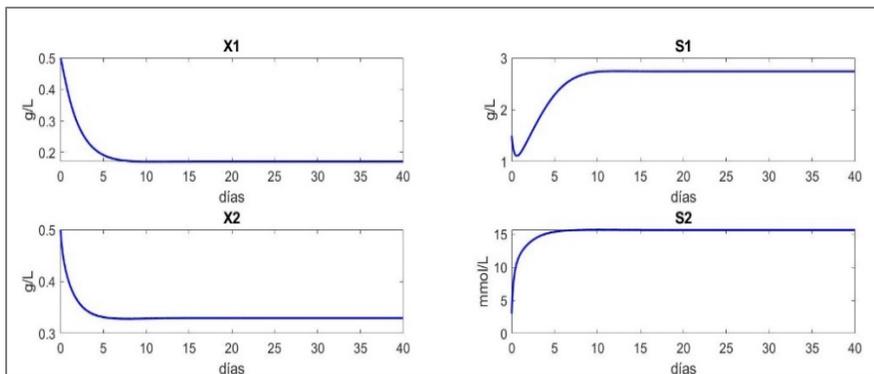


Figura 2. Comportamiento de las variables del modelo AMOCO para la DA con vinazas de tequila



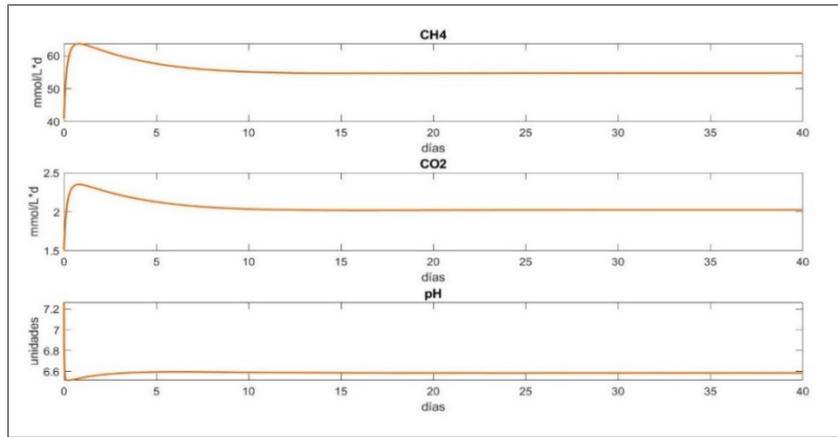


Figura 3. Producción de CH₄, CO₂ y comportamiento del pH en un biodigestor anaeróbico alimentado con aguas residuales

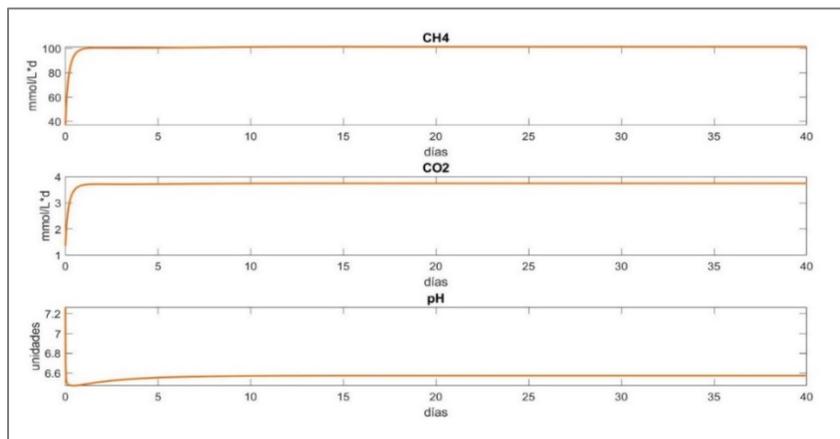


Figura 4. Producción de CH₄, CO₂ y comportamiento del pH en un biodigestor anaeróbico alimentado con vinazas de tequila

La respuesta dinámica obtenida mediante la ejecución de la simulación con diferentes fuentes de sustrato evidencia en cuanto a las tendencias del sustrato orgánico (S1) y la población bacteriana acidogénica (X1) que, se presenta un comportamiento basado en el modelo depredador-presa (Prey-predator, 2017). Esto significa que si no hay depredadores (bacterias), la presa o alimento (sustrato) crece de forma exponencial, por el contrario, si no hay alimento, los depredadores descienden en su población (Prey-predator, 2017). Adicionalmente, se determina que la simulación con la aplicación de ensilaje de maíz como se puede observar en la Figura 1. tiene menor tiempo de estabilización para las variables S1 (día 12) y X1 (día 6), a diferencia de los demás sustratos, sin embargo, no hay una disminución inicial del sustrato. Por lo tanto, si se tiene en cuenta este decremento inicial de S1, la estabilización más rápida sería del resultado con vinazas de tequila con una concentración de 2.74 g/L (día 17) para S1 y 0.17 g/L (día 9) para X1 como se evidencia en la Figura 2.

Por otro lado, el menor tiempo de estabilización para los AGVs (S2) y para las bacterias metanogénicas X2 también corresponde a la dinámica simulada con parámetros para vinazas de



tequila, esto ocurre en el día 9 con 15.68 mmol/L para S2 y alrededor del día 12 con una concentración de 0.329 g/L para X2. Cabe resaltar que esta dinámica es la única que cumple con lo que mencionan (Alcaraz-González et al., 2013) en donde se establece que la concentración de AGVs debe estar por debajo de 25 mmol/L para garantizar la estabilidad operativa de la DA. En cuanto a la alcalinidad, esta presenta el mismo comportamiento en todas sus simulaciones ya que en su formulación matemática no se tienen en cuenta las concentraciones de sustrato o de microorganismos que hacen parte de los parámetros cinéticos y coeficientes de rendimiento de cada sustrato. Sin embargo, el modelo no representa correctamente la dinámica de la alcalinidad debido a que no considera esta variable como una especie reactiva, es decir, no tiene en cuenta el nitrógeno del sustrato orgánico y de las biomásas (Ficara et al., 2012). Adicionalmente, no cumple con el valor de alcalinidad por debajo de 60 mmol/L sugerido en el artículo de (Alcaraz-González et al., 2013), dado que, alcanza el estado permanente en el día 15 con un valor de 87.43 mmol/. Finalmente, la producción de CH₄ en estado transitorio de todas las simulaciones posee una tendencia alejada de la realidad porque en un proceso experimental de DA normalmente la tasa de producción de metano durante los primeros días es muy baja o nula. Sin embargo, en estado permanente el modelamiento dinámico si puede representar correctamente el alcance de la producción de CH₄. De acuerdo con los resultados de la simulación se evidencia en la Figura 3. y en la Figura 4., hay una mayor producción con la implementación de aguas residuales (54.8 mmol/L*d) y con vinazas de tequila (100.62 mmol/L*d) como materia orgánica. Para finalizar, el pH se mantuvo en el rango de operación (6-8 unidades) lo que indica que el bioproceso de digestión anaeróbica es óptimo.

5. Conclusiones

A partir de los resultados presentados, se comprueba que los modelos matemáticos que describen la DA, tienen la capacidad de reproducir de forma acertada el comportamiento y la complejidad del bioproceso con la implementación de diversos sustratos, inóculos y condiciones operacionales. De acuerdo con la simulación del modelo AMOCO, se puede evidenciar que la aplicación de diferentes sustratos puede afectar significativamente el comportamiento de las variables de estado de la DA y en consecuencia la producción de metano.

La simulación de la alcalinidad con la aplicación de los diferentes sustratos no representa correctamente la dinámica de esta variable debido a que su formulación matemática no tiene en cuenta la concentración de nitrógeno en el sustrato orgánico y en los microorganismos X1 y X2. Con base en las simulaciones de los cuatro sustratos, se evidencia que el nivel de pH se encuentra en el rango de 6 a 8 unidades, lo que demuestra que se está llevando a cabo un proceso de digestión anaeróbica óptimo.

6. Referencias

- Alcaraz-González, V., Fregoso-Sanchez, F. A., Mendez-Acosta, H. O., & Gonzalez-Alvarez, V. (2013). Robust regulation of alkalinity in highly uncertain continuous anaerobic digestion processes. *Clean - Soil, Air, Water*, 41(12), 1157–1164. <https://doi.org/10.1002/clen.201100736>
- Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders,



- W. T., Siegrist, H., & Vavilin, V. A. (2002). The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 45(10), 65–73. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0292>
- Bernard, O., Hadj-sadok, Z., Dochain, D., Genovesi, A., Steyer, J., Project, C., & Cedex, S. (2001). Dynamical Model Development and Parameter Identification for an Anaerobic Wastewater Treatment Process. *Biotechnology and Bioengineering*, 75, 424–438.
 - Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2007). *Métodos numéricos para ingenieros* (M.-H. Interamericana (ed.); 5th ed.).
 - Delgadillo Mirquez, L., Machado Higuera, M., & Hernández Sarabia, M. (2018). Mathematical modelling and simulation for biogas production from organic waste. *International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation*, 10(2), 97. <https://doi.org/10.1504/ijesms.2018.10013112>
 - Ficara, E., Hassam, S., Allegrini, A., Leva, A., Malpei, F., & Ferretti, G. (2012). Anaerobic Digestion Models: a Comparative Study. In *IFAC Proceedings Volumes* (Vol. 45, Issue 2). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20120215-3-at-3016.00186>
 - Hmissi, M., Harmand, J., Alcaraz-Gonzalez, V., & Shayeb, H. (2018). Evaluation of alkalinity spatial distribution in an up-flow fixed bed anaerobic digester. *Water Science and Technology*, 77(4), 948–959. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.612>
 - Machado-Higuera, M. (2018). Una alternativa numerica en la solución de un sistema que modela la producción de biogás. In *Revista Mexicana de Métodos Numéricos* (Vol. 2, pp. 1–10). https://www.scipedia.com/public/Machado_2017a
 - Prey-predator, L. (2017). *Modelo Depredador- Presa de Lotka-Volterra*.
 - Salgado, J. A. A. (2019). Modeling and simulation of biogas production based on anaerobic digestion of energy crops and manure. In *Master Thesis*.

Sobre los autores

- **Laura Daniela Marín Rodríguez:** Auxiliar de investigación del proyecto “Prototipo de sistema de generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos orgánicos de la plaza de mercado del municipio de Fusagasugá”. Ingeniero electrónico de la Universidad de Cundinamarca. ldmarin@ucundinamarca.edu.co
- **Cristian Alberto Arenas Trujillo:** Auxiliar de investigación del proyecto “Prototipo de sistema de generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos orgánicos de la plaza de mercado del municipio de Fusagasugá”. Ingeniero electrónico de la Universidad de Cundinamarca. caarenas@ucundinamarca.edu.co
- **Andrés Felipe Guerrero Guerrero:** Ingeniero Electrónico, Magíster en Ingeniería – Automatización Industrial y Doctor en Ingeniería – Automática de la Universidad Nacional de Colombia. Profesor asistente del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Cundinamarca. afguerrero@ucundinamarca.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2021 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

