	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 5
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-04-19
		PAGINA: 1 de 7

Código de la dependencia.

FECHA	viernes, 28 de mayo de 2021
--------------	-----------------------------

Señores
UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
 BIBLIOTECA
 Ciudad

UNIDAD REGIONAL	Sede Fusagasugá
------------------------	-----------------

TIPO DE DOCUMENTO	Trabajo De Grado
--------------------------	------------------

FACULTAD	Ingeniería
-----------------	------------

NIVEL ACADÉMICO DE FORMACIÓN O PROCESO	Pregrado
---	----------

PROGRAMA ACADÉMICO	Ingeniería Electrónica
---------------------------	------------------------

El Autor(Es):

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS	No. DOCUMENTO DE IDENTIFICACIÓN
Marín Rodríguez	Laura Daniela	1069763959

Director(Es) y/o Asesor(Es) del documento:

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS
Guerrero Guerrero	Andrés Felipe

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca
 Teléfono (091) 8281483 Línea Gratuita 018000976000
 www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
 NIT: 890.680.062-2

*Documento controlado por el Sistema de Gestión de la Calidad
 Asegúrese que corresponde a la última versión consultando el Portal Institucional*



MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 5
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-04-19
	PAGINA: 2 de 7

TÍTULO DEL DOCUMENTO

EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA DE UN BIODIGESTOR ANAERÓBICO COMO UNA ESTRATEGIA QUE PERMITA ESTABLECER LAS CONDICIONES TÉCNICAS Y OPERACIONALES PARA UNA MAYOR PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

SUBTÍTULO

(Aplica solo para Tesis, Artículos Científicos, Disertaciones, Objetos Virtuales de Aprendizaje)

TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

Aplica para Tesis/Trabajo de Grado/Pasantía
Ingeniero electrónico

AÑO DE EDICIÓN DEL DOCUMENTO

28/05/2021

NÚMERO DE PÁGINAS

77

DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS (Usar 6 descriptores o palabras claves)

ESPAÑOL	INGLÉS
1. Digestión anaeróbica	Anaerobic digestion
2. Modelo matemático	Mathematical model
3. AMOCO	AMOCO
4. Comportamiento dinámico	Dynamic behavior
5. Simulación	Simulation
6. Biogás	Biogas



MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 5
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-04-19
	PAGINA: 3 de 7

RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS

(Máximo 250 palabras – 1530 caracteres, aplica para resumen en español):

RESUMEN

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, por medio de cuatro fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Este proceso dinámico se puede analizar mediante modelos matemáticos o llevando a cabo experimentos a escala en reactores, esto, con la finalidad de evaluar las condiciones físicas, operacionales y experimentales para alcanzar la máxima producción de biogás. Por lo tanto, tomando como referencia el proyecto para la creación de un prototipo de biodigestor continuo en la plaza de mercado del municipio de Fusagasugá, se requiere el planteamiento de un modelo dinámico que represente el proceso de DA.

Con base en lo anterior, en el siguiente trabajo se identificaron los factores de relevancia inmersos en la DA y se seleccionó el modelo matemático AMOCO que describe este proceso bioquímico en dos etapas: acidogénesis y metanogénesis. Este modelo dinámico se solucionó por medio del método de solución numérica Runge-Kutta de orden 5 y se simuló en el entorno de programación MATLAB. Posteriormente, se ejecutó la simulación con los parámetros cinéticos y coeficientes de rendimiento de AMOCO obtenidos a partir de la correlación con resultados experimentales reportados que involucraban sustratos como: aguas residuales, ensilaje de maíz, vinazas de tequila y ensilaje de pasto. Lo anterior permitió determinar las condiciones requeridas para mayor producción de biogás y analizar el comportamiento dinámico de las variables de estado, teniendo en cuenta las condiciones operacionales del proceso.

ABSTRACT

Biogas is currently considered as a renewable energy source that can be obtained through the process of anaerobic digestion (AD) of organic matter, by means of four phases: hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis and methanogenesis. This dynamic process can be analyzed by means of mathematical models or by carrying out reactor-scale experiments in order to evaluate the physical, operational and experimental conditions to achieve maximum biogas production. Therefore, taking as a reference the project for the creation of a prototype of a continuous biodigester in the market place of the municipality of Fusagasugá, it is required the approach of a dynamic model that represents the AD process.

Based on the above, the following work identified the relevant factors involved in AD and selected the AMOCO mathematical model that describes this biochemical process in two stages: acidogenesis and methanogenesis. This dynamic model was solved by means of the Runge Kutta numerical solution method of order 5 and simulated in the MATLAB programming environment. Subsequently, the simulation was run with the AMOCO kinetic parameters and yield coefficients obtained from the correlation with reported experimental results involving substrates such as: wastewater, corn silage, tequila vinasse and grass silage. This made it possible to determine the conditions required for higher biogas production and to analyze the dynamic behavior of the state variables, taking into account the operational conditions of the process.



MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 5
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-04-19
	PAGINA: 4 de 7

FUENTES (Todas las fuentes de su trabajo, en orden alfabético)

1. A. A. Salgado, "Modeling and simulation of biogas production based on anaerobic digestion of energy crops and manure," *Master Thesis*, p. 178, 2019.
2. A. Arzate *et al.*, "Anaerobic Digestion Model (AM2) for the Description of Biogas Processes at Dynamic Feedstock Loading Rates," *Chemie-Ingenieur-Technik*, vol. 89, no. 5, pp. 686–695, 2017, doi: 10.1002/cite.201600176.
3. A. Flores Hernández, M. Flores Montiel, J. Reyes Reyes, and C. M. Astorga Zaragoza, "Diseño y modelado de un bioreactor tipo batch y continuo para aplicaciones de control automático," *Apl. a la Microbiol. Ind.*, vol. 1, no. October 2013, pp. 86–92, 2013.
4. A. Jacobo, U. E. Jimenez, and A. Vargas, "Modelo matemático para la digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos," *Memorias del Congr. Nac. Control Automático*, pp. 23–25, 2019, [Online]. Available: www.amca.mx.
5. A. M. C. Lorenzo Acosta Yaniris, "La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I," *Icidca*, 2005, [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>.
6. A. Parra Orobio, P. Torres Lozada, and L. F. Marmolejo Rebellon, "Producción De Metano a Partir De La Digestión Anaerobia De Biorresiduos De Origen Municipal," p. 79, 2014.
7. A. Ruge Ruge, "Prototipo de biorreactor aeróbico para el monitoreo y control del proceso de co-compostaje, a partir de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales y residuos sólidos orgánicos de plaza de mercado," *Prospectiva*, vol. 17, no. 1, pp. 17–24, 2019, doi: 10.15665/rp.v17i1.1673.
8. Alam, O. A. Arika, I. Demir, E. Yuksel, and O. Gunaydin, "Anaerobic Digestions of Dairy Manure – A Review," *Digit. Proceeding ICOCEE – CAPPADOCIA2017*, no. May, pp. 1795–1804, 2017.
9. Alberto and A. Trujillo, "SIMULACIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA COMO UN INSUMO PARA EL DISEÑO DE UN BIODIGESTOR EN LA PLAZA DE MERCADO DE LA CIUDAD DE FUSAGASUGÁ," 2020.
10. Alcaraz-González, F. A. Fregoso-Sanchez, H. O. Mendez-Acosta, and V. Gonzalez-Alvarez, "Robust regulation of alkalinity in highly uncertain continuous anaerobic digestion processes," *Clean - Soil, Air, Water*, vol. 41, no. 12, pp. 1157–1164, 2013, doi: 10.1002/clen.201100736.
11. Angelidaki and W. Sanders, "Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants," *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 3, no. 2, pp. 117–129, 2004, doi: 10.1007/s11157-004-2502-3.
12. Angelidaki *et al.*, "Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays," *Water Sci. Technol.*, vol. 59, no. 5, pp. 927–934, 2009, doi: 10.2166/wst.2009.040.
13. Arenas, A. Dávila, and O. Philco, "Sensores De Temperatura (Industriales)," [Online]. Available: <https://docplayer.es/42573297-Sensores-de-temperatura-industriales.html>.
14. Bastin and D. Dochain, *On-line estimation and adaptive control of bioreactors*, vol. 243. 1991.
15. Bernard *et al.*, "Dynamical Model Development and Parameter Identification for an Anaerobic Wastewater Treatment Process," 2001.
16. C. Chapra and R. P. Canale, *Métodos numéricos para ingenieros*, 5th ed. 2007.



MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 5
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-04-19
	PAGINA: 5 de 7

17. C. Draa, H. Voos, M. Alma, A. Zemouche, and M. Darouach, "LMI-based H_∞ nonlinear state observer design for anaerobic digestion model," *2017 25th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2017*. pp. 678–683, 2017, doi: 10.1109/MED.2017.7984196.
18. C. Draa, H. Voos, M. Darouach, and M. Alma, "A Formal Modeling Framework for Anaerobic Digestion Systems," *Proc. - UKSim-AMSS 17th Int. Conf. Comput. Model. Simulation, UKSim 2015*, no. 2, pp. 426–431, 2016, doi: 10.1109/UKSim.2015.68.
19. Chen, J. J. Cheng, and K. S. Creamer, "Inhibition of anaerobic digestion process: A review," *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 10, pp. 4044–4064, 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.01.057.
20. Chorukova and I. Simeonov, "Mathematical modeling of the anaerobic digestion in two-stage system with production of hydrogen and methane including three intermediate products," *Int. J. Hydrogen Energy*, no. xxxx, pp. 1–9, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.228.
21. D. Alvarado Moreno, "Diseño de un sistema de control de temperatura y pH, en el proceso de digestión anaeróbica para residuos sólidos orgánicos en un bio-reactor tipo BATCH.," p. 119, 2015.
22. Delgadillo Mirquez, M. Machado Higuera, and M. Hernández Sarabia, "Mathematical modelling and simulation for biogas production from organic waste," *Int. J. Eng. Syst. Model. Simul.*, vol. 10, no. 2, p. 97, 2018, doi: 10.1504/ijesms.2018.10013112.
23. DFROBOT, "SEN0169 Analog pH Meter Pro." https://wiki.dfrobot.com/Analog_pH_Meter_Pro_SKU_SEN0169.
24. Diop, E. Chorukova, and I. Simeonov, "Modeling and specific growth rates estimation of a two-stage anaerobic digestion process for hydrogen and methane production," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 12641–12646, 2017, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.2232.
25. Esposito, L. Frunzo, A. Panico, and F. Pirozzi, "Enhanced bio-methane production from co-digestion of different organic wastes," *Environ. Technol. (United Kingdom)*, vol. 33, no. 24, pp. 2733–2740, 2012, doi: 10.1080/09593330.2012.676077.
26. F. Núñez, "Modelamiento y control de proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos y/o aguas residuales," *Univ. Piura*, 2017, [Online]. Available: <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/2986>.
27. Fedailaine, K. Moussi, M. Khitous, S. Abada, M. Saber, and N. Tirichine, "Modeling of the anaerobic digestion of organic waste for biogas production," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 52, no. 1, pp. 730–737, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.05.086.
28. Ficara, S. Hassam, A. Allegrini, A. Leva, F. Malpei, and G. Ferretti, *Anaerobic Digestion Models: a Comparative Study*, vol. 45, no. 2. IFAC, 2012.
29. G. Lopez, "Metodo no convencional de medición de gases en la digestión anaerobia," p. 16, 1999.
30. Hajji, M. Rhachi, M. Garoum, and N. Laaroussi, "The effects of pH, temperature and agitation on biogas production under mesophilic regime," *2016 3rd Int. Conf. Renew. Energies Dev. Countries, REDEC 2016*, pp. 1–4, 2016, doi: 10.1109/REDEC.2016.7577510.
31. Hanna Instruments, "Ficha Técnica del Producto Electrodo de pH para flujo continuo, BNC, 3 m." <https://www.hannacolombia.com/productos/producto/hi-10023-electrodo-de-ph-para-flujo-continuo-bnc-3-m>.
32. Hanna Instruments, "Ficha Técnica del Producto Transmisor pH con salida de 4-20 mA con aislamiento galvánico." <https://www.hannacolombia.com/productos/producto/hi-8614n-transmisor-ph-con-salida-de-4-20-ma-con-aislamiento-galvanico>.



MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 5
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-04-19
	PAGINA: 6 de 7

33. Hassam, E. Ficara, A. Leva, and J. Harmand, "A generic and systematic procedure to derive a simplified model from the anaerobic digestion model No. 1 (ADM1)," *Biochem. Eng. J.*, vol. 99, pp. 193–203, 2015, doi: 10.1016/j.bej.2015.03.007.
34. Holliger *et al.*, "Towards a standardization of biomethane potential tests," *Water Sci. Technol.*, vol. 74, no. 11, pp. 2515–2522, 2016, doi: 10.2166/wst.2016.336.
35. Hotz, "La monitorización del digestor anaerobio ayuda a evitar contratiempos en el proceso y a maximizar la producción de biogás."
36. J. Batstone *et al.*, "The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1).," *Water Sci. Technol.*, vol. 45, no. 10, pp. 65–73, 2002, doi: 10.2166/wst.2002.0292.
37. J. Shin, H. M. Jang, S. G. Shin, and Y. M. Kim, "Thermophilic anaerobic digestion: Effect of start-up strategies on performance and microbial community," *Sci. Total Environ.*, vol. 687, pp. 87–95, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.428.
38. J.-S. ZHANG, K. SUN, M. WU, and L. ZHANG, "Influence of temperature on performance of anaerobic digestion of municipal solid waste," *J. Environ. Sci.*, vol. 18, no. 4, pp. 810–815, 2006, [Online]. Available: http://www.jesc.ac.cn/jesc_en/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20060432&flag=1.
39. K. Izumi, Y. ki Okishio, N. Nagao, C. Niwa, S. Yamamoto, and T. Toda, "Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste," *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 64, no. 7, pp. 601–608, 2010, doi: 10.1016/j.ibiod.2010.06.013.
40. K. López Buriticá, S. Casanova Trujillo, C. Daniel Acosta Medina, and I. Artículo, "Facultad de Ciencias Exactas Y Naturales Análisis del crecimiento microbiano mediante la cinética de Monod y Haldane en un RCTA utilizado para el tratamiento de aguas residuales," *Rev. NOOS Rev. NOOS Vol. Pág. 12 Rev. NOOS*, vol. 2, no. 2, pp. 11–16, 2013.
41. Khalid, M. Arshad, M. Anjum, T. Mahmood, and L. Dawson, "The anaerobic digestion of solid organic waste," *Waste Manag.*, vol. 31, no. 8, pp. 1737–1744, 2011, doi: 10.1016/j.wasman.2011.03.021.
42. L. González and Y. Olaya, "Fundamentos para el diseño de biodigestores," 2009.
43. L. M. Cárdenas, B. A. Parra, P. Torres, and C. H. Vásquez, "Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos Perspectives of Biochemical Methane Potential - BMP test for control the anaerobic digestion process of wastes Perspectivas do t," *Rev. ION*, vol. 29, no. 1, pp. 95–108, 2016, doi: 10.18273/revion.v29n1-2016008.
44. L. M. Palmowski and J. A. Müller, "Influence of the size reduction of organic waste on their anaerobic digestion," *Water Sci. Technol.*, vol. 41, no. 3, pp. 155–162, 2000, doi: 10.2166/wst.2000.0067.
45. L. Prey-predator, "Modelo Depredador- Presa de Lotka-Volterra," 2017.
46. M. Gutiérrez and J. D. Moreno, "Los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales desde una visión no convencional," *Ing. Hidráulica Y Ambient.*, vol. XXXIX, no. 3, pp. 97–107, 2018.
47. M. Hernández-sarabia, "Mathematical modelling and simulation for biogas production from organic waste Mathematical modelling and simulation for biogas production from organic waste Liliana Delgadillo-Mirquez and Maximiliano Machado-Higuera *," no. July, 2018, doi: 10.1504/IJESMS.2018.10013112.
48. M. Hmissi, J. Harmand, V. Alcaraz-Gonzalez, and H. Shayeb, "Evaluation of alkalinity spatial distribution in an up-flow fixed bed anaerobic digester," *Water Sci. Technol.*, vol. 77, no. 4, pp. 948–959, 2018, doi: 10.2166/wst.2017.612.
49. M. I. G. Sánchez, "Diseño de la Camara de Fermentacion de un Biodigestor Anaerobico, Usando la Energia Solar Termica Como Fuente de Calor Modelado Por Elemento Finito," pp. 1–118, 2017.



MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 5
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-04-19
	PAGINA: 7 de 7

50. M. Machado Higuera, "Modelamiento, simulación y control del proceso biológico de digestión anaerobia para la producción de biogás," 2010, [Online]. Available: <http://repositorio.unibague.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12313/338/1/Tesis.pdf>.
51. M. Machado-Higuera, "Una alternativa numerica en la solución de un sistema que modela la producción de biogás," *Revista Mexicana de Métodos Numéricos*, vol. 2, pp. 1–10, 2018, [Online]. Available: https://www.scipedia.com/public/Machado_2017a.
52. M. Nakasima-López, P. Taboada-González, Q. Aguilar-Virgen, and N. Velázquez-Limón, "Adaptación de Inóculos Durante el Arranque de la Digestión Anaerobia con Residuos Sólidos Orgánicos," *Inf. Tecnol.*, vol. 28, no. 1, pp. 199–208, 2017, doi: 10.4067/S0718-07642017000100020.
53. Mateescu and I. Constantinescu, "Comparative analysis of inoculum biomass for biogas potential in the anaerobic digestion," *UPB Sci. Bull. Ser. B Chem. Mater. Sci.*, vol. 73, no. 3, pp. 99–104, 2011.
54. Mursec, P. Vindis, M. Janzekovic, M. Brus, and F. Cus, "Analysis of different substrates for processing into biogas Manufacturing and processing," *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, vol. 37, no. 2, pp. 652–659, 2009.
55. Nwokolo, P. Mukumba, K. Obileke, and M. Enebe, "Waste to energy: A focus on the impact of substrate type in biogas production," *Processes*, vol. 8, no. 10, pp. 1–21, 2020, doi: 10.3390/pr8101224.
56. Parra-Huertas, "Anaerobic digestión: biotechnological mechanisms in waste water treatments and their application in food industry," *Prod. + Limpia*, vol. 10, no. 2, pp. 142–159, 2015, [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1909-04552015000200014.
57. Raposo, M. A. De La Rubia, V. Fernández-Cegrí, and R. Borja, "Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 861–877, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.09.008.
58. "Runge-Kutta Algorithm," *myphysicslab.com*, 2001. <https://www.myphysicslab.com/explain/runge-kutta-en.html>.
59. S. K. Pramanik, F. B. Suja, S. M. Zain, and B. K. Pramanik, "The anaerobic digestion process of biogas production from food waste: Prospects and constraints," *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 8, no. August, p. 100310, 2019, doi: 10.1016/j.biteb.2019.100310.
60. S. U. A. Camberos, K. J. Gurubel, E. N. Sanchez, S. A. Aguirre, and R. G. Perez, "Neuronal Modeling of a Two Stages Anaerobic Digestion Process for Biofuels Production," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 13, pp. 408–413, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.07.313.
61. S. Yang and Y. Pan, "A design simplified of anaerobic digestion mathematic model," *2011 IEEE 3rd Int. Conf. Commun. Softw. Networks, ICCSN 2011*, pp. 442–444, 2011, doi: 10.1109/ICCSN.2011.6014087.
62. Salazar Rojas, N. Vaquerano, and M. Porras, "Cuantificador automático de metano para la estimación del potencial energético de un sustrato celulósico.," 2016.
63. Sánchez-Reyes, M. E. Patiño-Iglesias, J. L. Alcántara-Flores, Y. Reyes-Ortega, M. A. Pérez-Cruz, and E. Ortiz-Muñoz, "DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO (PBM) DE RESIDUOS DE FRUTAS Y VERDURAS EN HOGARES," *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 32, no. 2, pp. 191–198, May 2016, doi: 10.20937/RICA.2016.32.02.05.



	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 5
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-04-19
		PAGINA: 8 de 7

64. Savran, M. R. D. Piñón, and J. S. A. Palacios, "Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores Production of biogas and biofertilizers from biodigester effluents," *Pastos y Forrajes*, vol. 35, no. 2, pp. 219–226, 2012.
65. Schneider, "Dynamic modeling and simulation of biogas production based on anaerobic digestion of gelatine, sucrose and rapeseed oil," 2016, [Online]. Available: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:579-opus-1005495>.
66. SGX SENSORTECH, "IR15 Dual Gas Series Datasheet," 2016. <https://co.mouser.com/ProductDetail/Amphenol-SGX-Sensortech/IR15TT-R?qs=Ey4jopcCj2oLcUq66nHFAA%3D%3D>.
67. "Termoresistencia PT100 con cabezote rosca VIA Catalogo Español www.viaindustrial.com Termoresistencia PT100 con cabezote rosca VIA Catalogo Español www.viaindustrial.com," p. 100.
68. Texas instruments, "Tiva™ C Series TM4C123G LaunchPad Evaluation Board, User's Guide." p. 27, 2013.
69. V. Urrea, "Determinación del potencial bioquímico de metano de residuos cítricos mediante digestión anaerobia," 2019.
70. W. S. Lopes, V. D. Leite, and S. Prasad, "Influence of inoculum on performance of anaerobic reactors for treating municipal solid waste," *Bioresour. Technol.*, vol. 94, no. 3, pp. 261–266, 2004, doi: 10.1016/j.biortech.2004.01.006.

AUTORIZACION DE PUBLICACIÓN

Por medio del presente escrito autorizo (Autorizamos) a la Universidad de Cundinamarca para que, en desarrollo de la presente licencia de uso parcial, pueda ejercer sobre mí (nuestra) obra las atribuciones que se indican a continuación, teniendo en cuenta que, en cualquier caso, la finalidad perseguida será facilitar, difundir y promover el aprendizaje, la enseñanza y la investigación.

En consecuencia, las atribuciones de usos temporales y parciales que por virtud de la presente licencia se autoriza a la Universidad de Cundinamarca, a los usuarios de la Biblioteca de la Universidad; así como a los usuarios de las redes, bases de datos y demás sitios web con los que la Universidad tenga perfeccionado una alianza, son: Marque con una "X":

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)	SI	NO
1. La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer.	X	
2. La comunicación pública, masiva por cualquier procedimiento, medio físico, electrónico y digital	X	



MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 5
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-04-19
	PAGINA: 9 de 7

3. La inclusión en bases de datos y en sitios web sean éstos onerosos o gratuitos, existiendo con ellos previa alianza perfeccionada con la Universidad de Cundinamarca para efectos de satisfacer los fines previstos. En este evento, tales sitios y sus usuarios tendrán las mismas facultades que las aquí concedidas con las mismas limitaciones y condiciones.	X	
4. La inclusión en el Repositorio Institucional con motivos de publicación, en pro de su consulta, visibilización académica y de investigación.	X	

De acuerdo con la naturaleza del uso concedido, la presente licencia parcial se otorga a título gratuito por el máximo tiempo legal colombiano, con el propósito de que en dicho lapso mi (nuestra) obra sea explotada en las condiciones aquí estipuladas y para los fines indicados, respetando siempre la titularidad de los derechos patrimoniales y morales correspondientes, de acuerdo con los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

Para el caso de las Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, de manera complementaria, garantizo(garantizamos) en mi(nuestra) calidad de estudiante(s) y por ende autor(es) exclusivo(s), que la Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía en cuestión, es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi(nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro (aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos de la Tesis o Trabajo de Grado es de mí (nuestra) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.

Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuaré (continuaremos) conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Universidad de Cundinamarca está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca
Teléfono (091) 8281483 Línea Gratuita 018000976000
www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
NIT: 890.680.062-2



MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 5
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-04-19
	PAGINA: 10 de 7

NOTA: (Para Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía):

Información Confidencial:

Esta Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de la investigación que se adelanta y cuyos resultados finales no se han publicado. SI _____ NO X .

En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta tal situación con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.

LICENCIA DE PUBLICACIÓN

Como titular(es) del derecho de autor, confiero(erimos) a la Universidad de Cundinamarca una licencia no exclusiva, limitada y gratuita sobre la obra que se integrará en el Repositorio Institucional, que se ajusta a las siguientes características:

- Estará vigente a partir de la fecha de inclusión en el repositorio, por un plazo de 5 años, que serán prorrogables indefinidamente por el tiempo que dure el derecho patrimonial del autor. El autor podrá dar por terminada la licencia solicitándolo a la Universidad por escrito. (Para el caso de los Recursos Educativos Digitales, la Licencia de Publicación será permanente).
- Autoriza a la Universidad de Cundinamarca a publicar la obra en formato y/o soporte digital, conociendo que, dado que se publica en Internet, por este hecho circula con un alcance mundial.
- Los titulares aceptan que la autorización se hace a título gratuito, por lo tanto, renuncian a recibir beneficio alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente licencia y de la licencia de uso con que se publica.
- El(Los) Autor(es), garantizo(amos) que el documento en cuestión, es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi (nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro(aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos es de mí (nuestro) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.



- e) En todo caso la Universidad de Cundinamarca se compromete a indicar siempre la autoría incluyendo el nombre del autor y la fecha de publicación.
- f) Los titulares autorizan a la Universidad para incluir la obra en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.
- g) Los titulares aceptan que la Universidad de Cundinamarca pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.
- h) Los titulares autorizan que la obra sea puesta a disposición del público en los términos autorizados en los literales anteriores bajo los límites definidos por la universidad en el “Manual del Repositorio Institucional AAAM003”
- i) Para el caso de los Recursos Educativos Digitales producidos por la Oficina de Educación Virtual, sus contenidos de publicación se rigen bajo la Licencia Creative Commons: Atribución- No comercial- Compartir Igual.



- j) Para el caso de los Artículos Científicos y Revistas, sus contenidos se rigen bajo la Licencia Creative Commons Atribución- No comercial- Sin derivar.




Nota:

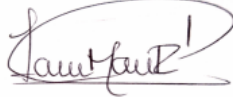
Si el documento se basa en un trabajo que ha sido patrocinado o apoyado por una entidad, con excepción de Universidad de Cundinamarca, los autores garantizan que se ha cumplido con los derechos y obligaciones requeridos por el respectivo contrato o acuerdo.

La obra que se integrará en el Repositorio Institucional, está en el(los) siguiente(s) archivo(s).

Nombre completo del Archivo Incluida su Extensión (Ej. Nombre completo del trabajo.pdf)	Tipo de documento (ej. Texto, imagen, video, etc.)
1. Evaluación de la dinámica de un biodigestor anaeróbico como una estrategia que permita establecer las condiciones técnicas y operacionales para una mayor producción de biogás.	PDF

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 5
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-04-19
		PAGINA: 12 de 7

En constancia de lo anterior, Firmo (amos) el presente documento:

APELLIDOS Y NOMBRES COMPLETOS	FIRMA (autógrafo)
Marín Rodríguez Laura Daniela	

Código Serie Documental (Ver Tabla de Retención Documental).

**EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA DE UN BIODIGESTOR ANAERÓBICO COMO
UNA ESTRATEGIA QUE PERMITA ESTABLECER LAS CONDICIONES
TÉCNICAS Y OPERACIONALES PARA UNA MAYOR PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.**

Laura Daniela Marín Rodríguez

Universidad de Cundinamarca

Ingeniería electrónica

Facultad de ingeniería

Fusagasugá, Colombia

2021

**EVALUACIÓN DE LA DINÁMICA DE UN BIODIGESTOR ANAERÓBICO COMO
UNA ESTRATEGIA QUE PERMITA ESTABLECER LAS CONDICIONES
TÉCNICAS Y OPERACIONALES PARA UNA MAYOR PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de
ingeniero electrónico, auxiliar de investigación proyecto N.66161 Minciencias
convocatoria 829

Laura Daniela Marín Rodríguez

Director:

Dr. Ing. Andrés Felipe Guerrero Guerrero

Línea de investigación:

Transformación de Energías: Energías alternativas

Diseño e instrumentación y control

Universidad de Cundinamarca

Ingeniería electrónica

Facultad de ingeniería

Fusagasugá, Colombia

2021

Agradecimientos

Al concluir esta valiosa etapa de mi vida quiero extender un profundo agradecimiento a Dios por haberme guiado y bendecido infinitamente a lo largo de este camino. De igual forma, agradezco y dedico con todo mi corazón este proyecto a mi madre, por el esfuerzo y amor invaluable durante toda mi formación personal y profesional, así como a mi padre que me brinda su apoyo constante y me impulsa a cumplir todas mis metas. A mi hermana por su acompañamiento incondicional, motivación y certeza de que podría lograrlo.

También agradezco a mis profesores quienes orientaron con sus conocimientos mi formación profesional y me transmitieron valores como la responsabilidad, respeto y compromiso, dejando un huella imborrable en mi vida. En especial, al doctor Andrés Felipe Guerrero por su asesoría, apoyo, acompañamiento e interés constante en todo el desarrollo de este proyecto. Al ingeniero Orlando Harker por la confianza depositada en mí para hacer parte de este grupo de investigación. A la ingeniera Rubiela Bello por brindarme valiosos consejos y al ingeniero Carlos Montufar por creer en mis capacidades y ayudar a encaminar mi vida de estudiante para ser una gran profesional.

Finalmente, doy gracias a mis amigos Santiago Rodríguez y Ricardo por brindarme su amistad y apoyo en mi crecimiento tanto personal como académico a lo largo de estos años.

Resumen

En la actualidad, el biogás es considerado como una fuente de energía renovable que se puede obtener mediante el proceso de digestión anaeróbica de materia orgánica, por medio de cuatro fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis [1]. Este proceso dinámico se puede analizar mediante modelos matemáticos o llevando a cabo experimentos a escala en reactores de tipo continuo y batch, esto, con la finalidad de evaluar las condiciones físicas, operacionales y experimentales para alcanzar la máxima producción de biogás. Por lo tanto, en el marco del proyecto denominado “Prototipo de sistema de generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos orgánicos de la plaza de mercado del municipio de Fusagasugá” se solicita el planteamiento de un modelo dinámico del proceso de digestión anaeróbica sustentado en una simulación que emplee diferentes fuentes de sustrato a fin dimensionar la producción de biogás en un biodigestor anaeróbico continuo.

Con base en estos requerimientos, en el siguiente trabajo de grado se identificaron los factores de relevancia inmersos en la digestión anaeróbica y se seleccionó el modelo matemático AMOCO que describe este proceso bioquímico en dos etapas: acidogénesis y metanogénesis [2]. Este modelo dinámico se solucionó por medio del método de solución numérica Runge-Kutta de orden 5 y se simuló en el entorno de programación MATLAB. Posteriormente, se ejecutó la simulación con los parámetros cinéticos y coeficientes de rendimiento de AMOCO obtenidos a partir de la correlación con resultados experimentales reportados que involucraban sustratos como: aguas residuales, ensilaje de maíz, vinazas de tequila y ensilaje de pasto. Lo anterior permitió determinar las condiciones requeridas para mayor producción de biogás y analizar el comportamiento dinámico de las variables de estado, teniendo en cuenta las condiciones operacionales del proceso.

Finalmente, a partir de los hallazgos del proceso de revisión, se propuso un diseño para experimento en biorreactores tipo batch con el que se analicen relaciones sustrato/inóculo y rangos de temperatura óptimos como insumo para la implementación de un biorreactor continuo en la plaza de mercado de la ciudad de Fusagasugá.

Contenido

Resumen	5
1. Capítulo 1. Contexto.....	12
2. Capítulo 2. Objetivos.....	13
2.1 Objetivo general:	13
2.2 Objetivos específicos:	13
3. Capítulo 3. Marco de referencia.....	14
3.1. Estado del arte	14
3.1.1 A nivel matemático.....	15
3.1.2 A nivel experimental.....	16
3.2. Fundamentos teóricos.....	21
3.2.1 AMOCO O AM2	21
3.2.2 Métodos numéricos Runge-Kutta.....	25
4. Capítulo 4. Metodología.....	26
5. Capítulo 5. Factores predominantes en el proceso de digestión anaeróbica.....	27
5.1 Sustrato.....	27
5.2 Inóculo	28
5.3 Relación Sustrato/Inóculo (S/I).....	29
5.4 Temperatura.....	29
5.5 pH	30
5.6 Alcalinidad.....	31
5.7 Ácidos grasos volátiles (AGVs).....	31
5.8 Amoníaco.....	32
5.9 Relación carbono nitrógeno (C/N).....	32
5.10 Tiempo de retención	33
6. Capítulo 6. Evaluación de la producción de biogás	34
6.1 Desarrollo matemático	34
6.1.1 Solución numérica del modelo dinámico AMOCO	35
6.2 Selección de parámetros para la aplicación de AMOCO	36
6.2.1 Producción de biogás en aguas residuales	37

6.2.2 Producción de biogás en ensilaje de maíz.....	38
6.2.3 Producción de biogás en vinazas de tequila.....	39
6.2.4 Producción de biogás en ensilaje de pasto.....	40
6.3 Simulación	40
6.3.1 Diagrama de procesos.....	41
6.3.2 Respuesta dinámica del modelo AMOCO	42
6.3.2.1 Simulación del sistema con aguas residuales como sustrato.....	42
6.3.2.2 Simulación del sistema con ensilaje de maíz como sustrato.....	44
6.3.2.3 Simulación del sistema con vinazas de tequila como sustrato	46
6.3.2.4 Simulación del sistema con ensilaje de pasto como sustrato	48
7. Capítulo 7. Diseño de experimento en reactores batch para el proceso de DA..	51
7.1 Desarrollo experimental	51
7.1.1 Diseño experimental	51
7.1.2 Selección de instrumentos de medida	53
7.1.2.1 Medición de temperatura:.....	53
7.1.2.2 Medición de pH:.....	54
7.1.3 Implementación.....	55
7.2 Sensores propuestos para el prototipo de biorreactor continuo.....	58
7.2.1 Temperatura	58
7.2.2 pH.....	59
7.2.3 Composición y concentración del biogás.....	60
8. Capítulo 8. Plan de trabajo y Análisis de resultados	62
8.1 Plan de trabajo.....	62
8.1.1 Objetivo específico No.1	62
8.1.2 Objetivo específico No.2	62
8.1.3 Objetivo específico No.3.....	63
8.2 Análisis de resultados	65
8.2.1 Análisis de resultados de objetivo específico No.1	65
8.2.2 Análisis de resultados de objetivo específico No.2	65
8.2.3 Análisis de resultados de objetivo específico No.3.....	67

9. Presupuesto.....	69
10. Conclusiones.....	70
10.1 Conclusiones objetivo específico No.1.....	70
10.2 Conclusiones objetivo específico No.2.....	70
10.3 Conclusiones objetivo específico No.3.....	71
11. Referencias	73

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de simplificaciones del modelo ADM1.	16
Figura 2. Métodos para la cuantificación de CH ₄	20
Figura 3. Metodología de desarrollo.....	26
Figura 4. Comportamiento de μT	30
Figura 5. Error relativo porcentual vs trabajo computacional de los métodos RK.	34
Figura 6. Diagrama de procesos para la simulación del proceso de DA	41
Figura 7. Comportamiento de las variables del modelo AMOCO para la DA con aguas residuales.....	42
Figura 8. Producción de CH ₄ , CO ₂ y comportamiento del pH en un biodigestor anaeróbico alimentado con aguas residuales	44
Figura 9. Comportamiento de las variables del modelo AMOCO para la DA con ensilaje de maíz	44
Figura 10. Producción de CH ₄ , CO ₂ y comportamiento del pH en un biodigestor anaeróbico alimentado con ensilaje de maíz.....	46
Figura 11. Comportamiento de las variables del modelo AMOCO para la DA con vinazas de tequila.....	46
Figura 12. Producción de CH ₄ , CO ₂ y comportamiento del pH en un biodigestor anaeróbico alimentado con vinazas de tequila.....	47
Figura 13. Comportamiento de las variables del modelo AMOCO para la DA con ensilaje de pasto	49
Figura 14. Producción de CH ₄ , CO ₂ y comportamiento del pH en un biodigestor anaeróbico alimentado con ensilaje de pasto.....	50
Figura 15. Esquema de experimento	52
Figura 16. Ductos metálicos ubicados en tapón de caucho	52
Figura 17. Método volumétrico para determinar el potencial bioquímico de metano. 53	
Figura 18. Termistor NTC 10 k Ω a utilizar en el experimento.....	54
Figura 19. Sensor de pH analógico con electrodo industrial	54
Figura 20. Sistema implementado para medición de biogás.....	55
Figura 21. Biodigestores tipo Batch.....	57
Figura 22. Sensor PT-100 de 3 hilos.....	59

Figura 23. Transmisor de pH HI8614LN.....	59
Figura 24. Electrodo de pH para flujo continuo.	60
Figura 25. Sensor de gas IR15TT-R.	61

Índice de tablas

Tabla 1. Composición del biogás.	15
Tabla 2. Tiempo de retención.	33
Tabla 3. Condiciones para un bioproceso de digestión anaeróbica óptimo	33
Tabla 4. Parámetros de estimación y coeficientes de rendimiento de AMOCO.	36
Tabla 5. Parámetros del modelo dinámico AMOCO para aguas residuales.	37
Tabla 6. Parámetros del modelo dinámico AMOCO para ensilaje de maíz.	39
Tabla 7. Parámetros del modelo dinámico AMOCO para vinazas de tequila.	39
Tabla 8. Parámetros del modelo dinámico AMOCO para ensilaje de pasto.	40
Tabla 9. Condiciones experimentales propuestas.	55
Tabla 10. Cantidades sustrato inóculo utilizados en el experimento	56
Tabla 11. Elementos para experimento en reactores batch	56
Tabla 12. Relación de experimentos implementados previamente	57
Tabla 13. Cantidades de sustrato e inóculo utilizados en el experimento	58
Tabla 14. Especificaciones técnicas del transmisor de pH.	60
Tabla 15. Especificaciones técnicas del sensor de gas.	61
Tabla 16. Cronograma de actividades.	64
Tabla 17. Presupuesto del proyecto financiado por Minciencias.	69
Tabla 18. Presupuesto estimado para el proyecto de grado presentado	69

1. Capítulo 1. Contexto

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 [3]. 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 [1]. 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. Lo anterior, bajo el marco del proyecto denominado “Prototipo de sistema de generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos orgánicos de la plaza de mercado del municipio de Fusagasugá”. Este proyecto se encuentra en ejecución bajo la dirección de la Universidad de Cundinamarca con la participación de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y financiado por Minciencias con fondos de regalías del departamento de Cundinamarca.

La realización del prototipo de biodigestor continuo se distribuye en cuatro fases: La primera etapa consiste en la realización del diagnóstico y evaluación de la plaza de mercado de la ciudad de Fusagasugá, para determinar el promedio de RSO generados semanalmente. En la segunda fase se pretende establecer la composición del sustrato orgánico y la fuente de inóculo adecuada, con la finalidad de determinar los parámetros óptimos para la producción de biogás en el proceso de digestión anaeróbica. La tercera fase se enfoca en la creación de un biodigestor continuo con los correspondientes módulos de instrumentación y control para el monitoreo de variables de la digestión anaeróbica. Por último, la cuarta fase plantea la elaboración de un sistema de generación y distribución de energía eléctrica a partir del biogás que se produce en el proceso de digestión anaeróbica.

Con base en lo anterior, para la implementación del biodigestor continuo, en este trabajo se hará énfasis en la continuación de la fase dos, iniciada por Cristian Arenas [4], la cual estará apoyada de la revisión de antecedentes experimentales que permitan identificar las condiciones operacionales, así como las fuentes inoculares y el sustrato que determinen la mayor producción de biogás. Sin embargo, para el desarrollo de este proyecto se identifica ausencia de información experimental y datos limitados de producción de biogás reportados en la literatura que involucren fuentes inoculares y sustrato empleado en la DA.

2. Capítulo 2. Objetivos

2.1 Objetivo general:

Desarrollar una evaluación del comportamiento dinámico de un biodigestor anaeróbico incluyendo diferentes fuentes de sustrato, y criterios operacionales con el fin de establecer las condiciones técnicas para una mayor producción de biogás.

2.2 Objetivos específicos:

1. Identificar los factores predominantes en el proceso de digestión anaeróbica con base en una revisión bibliográfica que incluya modelos matemáticos propuestos y condiciones experimentales verificadas.
2. Establecer una metodología que integre el modelo matemático AMOCO con parámetros ajustados experimentalmente a fin de dimensionar la producción de biogás de diferentes tipos de sustrato en el proceso de DA.
3. Diseñar un experimento en reactores tipo batch en el que se establezcan los parámetros de evaluación para el proceso de DA con el fin de seleccionar los dispositivos de medida para reactores por lotes y continuos.

3. Capítulo 3. Marco de referencia

3.1. Estado del arte

En el proceso bioquímico de digestión anaeróbica (DA), bajo la ausencia de oxígeno, diversas poblaciones bacterianas transforman material orgánico como carbohidratos, lípidos y proteínas en azúcares, ácidos grasos volátiles (AGVs) y aminoácidos con la finalidad de obtener biogás, compuesto por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) [5]. El proceso de digestión anaeróbica involucra cuatro fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, en dichas etapas se busca garantizar la estabilidad del proceso para prevenir el exceso de elementos inhibidores que pueden generar niveles de pH (potencial de Hidrógeno) bajos y en consecuencia afectar la generación de biogás [1].

La primera etapa se encarga de hidrolizar los sustratos complejos, es decir, celulosa, proteínas y lípidos en elementos solubles (azúcares, aminoácidos y grasas) por el efecto de enzimas extracelulares de los microorganismos [6]. Esta fase guarda una estrecha relación con la temperatura de operación y el pH de la mezcla debido a que estos factores pueden influir en la velocidad de reducción de los elementos [3]. La acidogénesis es la etapa de la fermentación, los compuestos solubles son fermentados en AGVs: acético, propiónico, butírico, alcoholes, dióxido de carbono, entre otros; para ser empleados como alimento bacteriano en las siguientes fases del proceso de D.A [6][3].

Posteriormente, se desarrolla la fase de la acetogénesis, la cual se encarga de oxidar por medio de una población de organismos acetógenos los productos generados en la acidogénesis o fermentación en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono (Díaz-Báez, et al., 2002). Finalmente, tiene lugar la etapa de la metanogénesis, es relevante destacar que González y Olaya [6] afirman que en esta fase el pH se sitúa en la región alcalina, con valores que oscilan en el rango de 6.9 a 7.4 unidades.

En este ciclo, los microorganismos metanogénicos se alimentan de los productos de las etapas previas para generar biogás constituido por metano, dióxido de carbono y otros compuestos [3] en diferentes porcentajes como se evidencia en la Tabla 1. Con base en lo anterior, el biogás se considera como energía renovable obtenida de la degradación de material orgánico proveniente de desechos de animales, residuos sólidos orgánicos, aguas residuales, entre otros [1].

Tabla 1. Composición del biogás. Fuente: [7]

Componente	Fórmula	Porcentaje de concentración
Metano	CH_4	40-70%
Dióxido de carbono	CO_2	30-60%
Hidrógeno	H_2	0.1%
Nitrógeno	N_2	0.5%
Monóxido de Carbono	CO	0.1%
Oxígeno	O_2	0.1%
Sulfuro de Hidrógeno	H_2S	0.1%

El proceso de digestión anaeróbica puede ser analizado desde diferentes enfoques, esta sección se dividirá en dos de ellos: a nivel matemático y a nivel experimental.

3.1.1 A nivel matemático

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 [8][9].

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 [9]. Con base en este modelo se han realizado diversas simplificaciones de gran aplicabilidad como las que se presentan en la Figura 1. Uno de los modelos matemáticos más representativo es AMOCO, caracterizado por su simplicidad y precisión [10].

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 [2][1]. De este modo, Bernard et al [2] 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) [2].

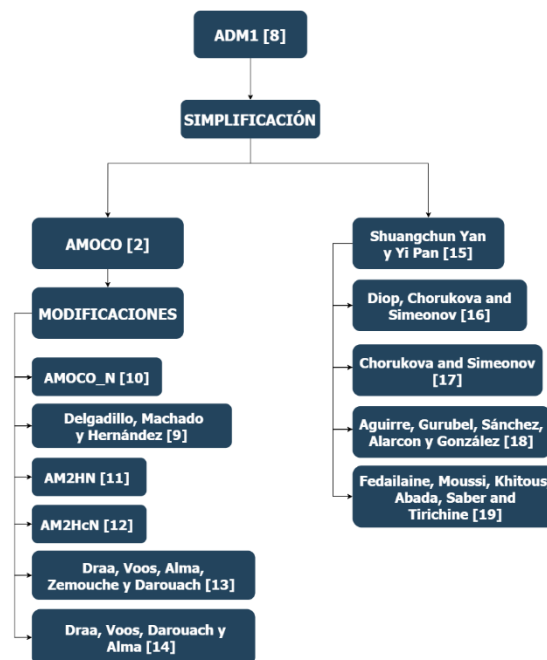


Figura 1. Diagrama de simplificaciones del modelo ADM1. Fuentes: [8][2][10][9][11][12][13][14][15][16][17][18][19]

3.1.2 A nivel experimental

El proceso de digestión anaeróbica se lleva a la práctica en un reactor, definido como un tanque en el que se producen a la par múltiples reacciones biológicas en un medio líquido [20]. En la práctica se pueden encontrar biorreactores que cuentan con alimentación continua del sustrato y reactores por lotes o tipo batch en los cuales se deposita al inicio del proceso y por única vez una cantidad de materia orgánica que será fermentada [21]. En los reactores tipo batch es posible realizar ensayos a escala, uno de los más destacados es el de Potencial Bioquímico de Metano (PBM) que permite determinar la biodegradabilidad anaeróbica y la producción de metano (CH₄) [5]. Este experimento fue propuesto por Owen et al., en el año 1979 y aunque ha tenido

varias modificaciones, su implementación radica en añadir uno o diversos sustratos e inóculo en un reactor bajo condiciones operacionales establecidas de temperatura, agitación, ajuste de pH, captura de CO₂ (Dióxido de carbono), réplicas del experimento, entre otras [5]. Los factores fundamentales en el ensayo PBM son: sustrato orgánico, inóculo, condiciones experimentales y condiciones operacionales [5].

Los sustratos pueden ser residuos sólidos orgánicos, residuos del sector agroindustrial, residuos de origen animal, entre otros; su composición y concentración podrían ocasionar un alto porcentaje de residuos suspendidos y en consecuencia generar procesos de inhibición que afectan la producción de (CH₄) [5]. En este sentido, en [22] manifiestan que el ensayo PBM puede ser influenciado por el tamaño de partícula por lo que recomiendan estandarizar dicho tamaño para aumentar la reproducibilidad del experimento. De igual forma, en [23] afirman que el tamaño de la partícula impacta en gran proporción los ensayos PBM porque los microorganismos solo pueden descomponer sustancias presentes en la superficie de los residuos sólidos orgánicos, es decir, influye en la relación superficie-volumen de cada partícula.

Con base en lo anterior y la implementación de RSO como sustrato es conveniente realizar un pretratamiento con el propósito de obtener partículas menores o iguales a 10 mm, a fin de evitar obstrucciones de material orgánico que puedan dificultar el proceso de D.A [24]. El pretratamiento de las partículas genera dos efectos: el primero exhibe que, si el sustrato tiene alto contenido en fibra y baja degradación, la fragmentación provocará un incremento de la producción de biogás y el segundo indica que esto puede conducir a un proceso de DA más rápido [22].

Sin embargo, la reducción de la partícula no debe ser excesiva porque puede producir una carga acumulada de ácidos grasos volátiles (AGVs) y en consecuencia una disminución de la producción de CH₄ [25]. Por otro lado, un factor relevante para el manejo del sustrato es su nivel de frescura, por tanto, debe utilizarse tan pronto como sea posible, si se retrasa su uso, el sustrato debe refrigerarse a 4°C por un máximo de 5 días; para un lapso más extenso se debe congelar y almacenar a -20°C. Luego del proceso de congelamiento, para descongelarlo se debe incrementar gradualmente la temperatura hasta lograr 4°C y posteriormente aumentar lentamente hasta alcanzar la temperatura ambiente [26].

Otro aspecto fundamental en el desarrollo experimental del proceso de digestión anaeróbica junto al sustrato es el inóculo. Los inóculos microbianos pueden ser lodos activos procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales, desechos de origen animal como el estiércol bovino, rumen, extracto de suelos, entre otros [27][5]. Respecto a este aspecto, Parra Orobio et al [28] indican que uno de los inconvenientes

con la utilización de lodos en los ensayos PBM es el crecimiento de los microorganismos durante los experimentos, condición que afectará la estimación final del PBM.

En los ensayos del PBM, el inóculo se incuba bajo condiciones de pH neutro y rangos de temperatura definidos, el rol que toma el sustrato es servir como suministro de carbono y energía para la población bacteriana [24]. Por lo tanto, su relevancia radica en que el inóculo utilizado debe poseer la población bacteriana necesaria para que se efectúe correctamente la biodegradación del sustrato y en el aporte de macro y micronutrientes, vitaminas y capacidad de atenuar el pH [29]. Adicionalmente, es oportuno resaltar que se debe verificar que el inóculo mantenga fresca y que posea una formación microbiana que pueda asegurar la descomposición de la materia orgánica [28]. Tomando como referencia los parámetros mencionados anteriormente, la relación sustrato/inóculo (S/I) se expone en términos de SV ($gSV_{sustrato}/gSV_{inóculo}$) o en términos de DQO ($gDQO_{sustrato}/gDQO_{inóculo}$) [5].

A continuación, se destacan las condiciones operacionales en cuanto al desarrollo experimental del ensayo PBM. La temperatura es una variable física de gran importancia en el proceso de DA debido a que influye en la degradación del material orgánico, en el crecimiento de los microorganismos, puede afectar significativamente la conversión, estabilidad y producción de metano y tiene un rol fundamental, específicamente en la fase de hidrolítica y metanogénica [3][30]. El rango de temperatura de operación en un proceso de DA se clasifica en: psicrófilo (10-20°C), mesofílico (35-37°C) y termofílico (55-60°C) [31]. Zhang Ji-shi et al [30] consideran que el régimen de temperatura termofílico, aproximadamente 55°C es adecuado para el crecimiento de los microorganismos formadores de metano, lo cual es evidenciado en el incremento de biogás. De igual forma, en [31] exponen que el rango termofílico mejora la velocidad de reacción en el proceso de DA, lo que permite que mejore la producción de biogás y la destrucción de sólidos. Sin embargo, el rango mesofílico es apropiado para la producción de biogás, evidenciando que al aumentar la temperatura de 37 °C a 40 °C se presenta un mejor rendimiento, el cual es reflejado en el porcentaje de biogás obtenido [32].

Por otro lado, la agitación, genera en un biodigestor la homogenización de la mezcla, lo cual incrementa el contacto entre las bacterias y el sustrato y por tanto, mejora la descomposición de la materia orgánica, evitando así la formación de partículas en suspensión [32]. Se ha demostrado que la agitación mejora hasta en un 62% la producción de biogás en la fase de la metanogénica, en contraste, cuando no hay agitación se produce la creación de una cubierta en la superficie del biodigestor que obstaculiza la desgasificación del sustrato [32]. No obstante, en [5] indican que la agitación ininterrumpida puede ocasionar daños en las relaciones sintróficas que se

constituyen entre las diferentes poblaciones bacterianas que interceden en el proceso de DA. Adicionalmente, una condición operacional que debe tenerse en cuenta es el uso de réplicas, esto se define como la realización de un experimento en el que se repiten las condiciones experimentales y operacionales del experimento original, su importancia radica en que asegura la reproducibilidad del experimento y análisis de los resultados [5]. El número de réplicas del experimento del PBM, según [33] debe ser al menos de tres para garantizar la confiabilidad del estudio estadístico de los datos adquiridos en el proceso de DA. Pese a esto, [5] plantea que se acepta la realización de montajes experimentales duplicados verificando que haya un resultado similar en la curva de CH₄.

En las condiciones operacionales de los ensayos PBM, también se destacan las variables químicas como el pH y la captura de CO₂. El pH (potencial de Hidrógeno) es un parámetro clave en la DA debido a que determina la inhibición y toxicidad de los microorganismos, procesos que pueden representar un alto impacto en la producción de biogás [6]. Para los ensayos PBM, el pH debe mantener un valor neutro, es decir, en el rango de 7 y 7.8 unidades para así garantizar la actividad de las bacterias con mayor sensibilidad, la población metanogénica [5]. Para realizar el ajuste de pH, [32] y [5] exponen la utilización de sales de sodio como carbonato, bicarbonato, hidróxido, entre otros; su función radica en garantizar la neutralización de los AGVs y por lo tanto evitar problemas de acidificación.

Por último, las condiciones experimentales son aquellas que permiten definir el método de cuantificación del metano que se utilizará en el ensayo. En la Figura 2. se observan los métodos de cuantificación de metano reportados en la literatura. La implementación del método volumétrico para determinar el porcentaje de CH₄ producido involucra el uso de una sustancia desplazante, como el hidróxido de sodio (NaOH), que debe tener un pH superior a 12 unidades para asegurar que se capture el CO₂ generado en la DA [5].

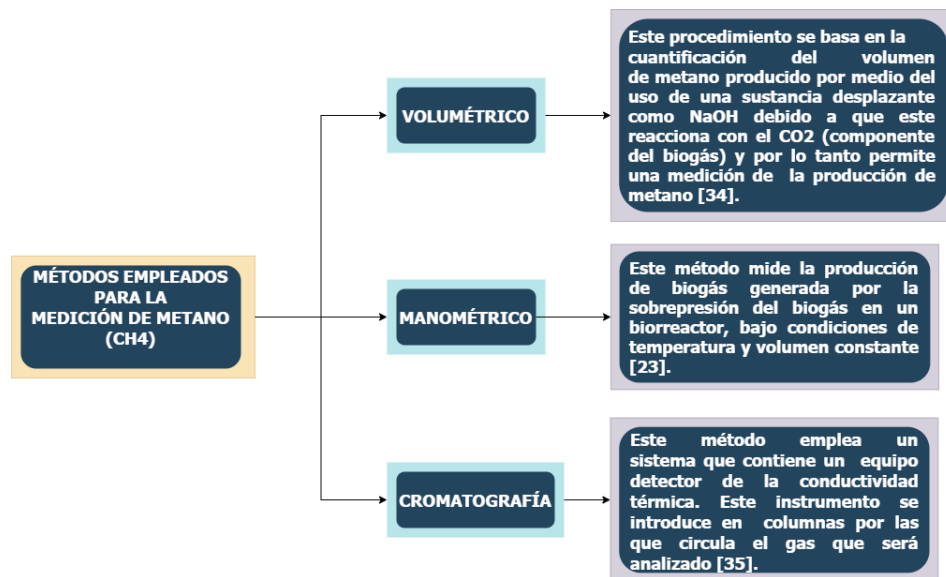


Figura 2. Métodos para la cuantificación de CH₄. Fuentes: [34][23][35]

En conclusión, en el proceso bioquímico de digestión anaeróbica se presenta la interacción de diversas poblaciones bacterianas y sustratos, con la finalidad de obtener biogás, que es una fuente de energía renovable. Este proceso se puede desarrollar matemáticamente por medio de múltiples modelos dinámicos multivariables como el ADM1 (Anaerobic Digestion Model No.1) [10], el cual presenta alta complejidad al involucrar un sistema con 32 variables de estado. Adicionalmente, se expone el modelo AMOCO [2], que es de gran aplicabilidad debido a que posee precisión y simplicidad empleando un balance de masas de dos pasos (acidogénesis y metanogénesis) que involucra únicamente seis ecuaciones diferenciales. La digestión anaeróbica se puede poner en marcha en un biorreactor, uno de los ensayos más relevantes es el del Potencial Bioquímico de Metano (PBM) que permite cuantificar la producción del metano [5].

Los principales factores que se deben tener en cuenta en un experimento para determinar el PBM son: la utilización de un sustrato orgánico con partículas menores o iguales a 10 mm para evitar procesos de inhibición de las bacterias. Los rangos de temperatura de operación recomendados para este proceso son: mesófilico (35-37°C) que presenta un mejor rendimiento en la producción de biogás y el rango termófilico (55-60°C) que es adecuado para el crecimiento de las poblaciones bacterianas productoras de metano [32][30]. El pH debe mantenerse neutro (entre 7 y 7.8 unidades) para garantizar la actividad de los microorganismos metanogénicos, por último, en cuanto a condiciones experimentales para la medición del metano se proponen los métodos volumétrico, manométrico y de cromatografía [5].

3.2. Fundamentos teóricos

3.2.1 AMOCO O AM2

Es un modelo matemático propuesto por Oliver Bernard et al. en el año 2001 [2] que describe la digestión anaeróbica en dos etapas: acidogénesis y metanogénesis, asimismo, incluye los equilibrios electroquímicos con la finalidad de estudiar la alcalinidad del sistema [1]. Los parámetros cinéticos y coeficientes de rendimiento reportados en este modelo son ajustados experimentalmente en una aplicación de la DA con la utilización de aguas residuales obtenidas de una destilería de vino como sustrato [2]. A continuación, se exponen sus reacciones biológicas:

- Etapa de acidogénesis: La población bacteriana acidogénica X_1 consume el sustrato orgánico S_1 y produce dióxido de carbono CO_2 y ácidos grasos volátiles [2].



Donde $r_1 = \mu_1(S_2)X_1$ corresponde a la tasa de reacción en la fase acidogénica [1].

- Etapa de metanogénesis: La población bacteriana metanogénica X_2 utiliza los AGVs como sustrato para crecer, y así producir dióxido de carbono CO_2 y metano CH_4 [2].



Donde $r_2 = \mu_2(S_2)X_2$ corresponde a la tasa de reacción en la fase metanogénica [1].

El balance de masas propuesto para un RCTA (Reactor continuo de tanque agitado) se presenta en un set de seis ecuaciones diferenciales [2]:

- **Balance de masas para las poblaciones bacterianas X_1 y X_2**

$$\frac{dX_1}{dt} = [\mu_1(S_1) - \alpha D]X_1 \quad (3)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = [\mu_2(S_2) - \alpha D]X_2 \quad (4)$$

Donde:

X_1, X_2 : población bacteriana acidogénica y metanogénica respectivamente [g/L] [2].

$\mu_1(S_1)$: tasa de crecimiento bacteriano específico en la fase acidogénica [1/d], para este proceso se toma como referencia la cinética de monod [2][36]. El parámetro $u_{1,max}$ corresponde a la velocidad específica de crecimiento máximo, asociada a S_1 y K_{S1} expone la constante de saturación media, asociada al sustrato S_1 [1].

$$\mu_1(S_1) = u_{1,max} \frac{S_1}{S_1 + K_{S1}} \quad (5)$$

$\mu_2(S_2)$: tasa de crecimiento bacteriano específico en la fase metanogénica [1/d]. Para situaciones en las que el crecimiento de la población bacteriana presenta inhibición a altas concentraciones del sustrato se toma como referencia la cinética de Haldane [37]. El parámetro $u_{2,max}$ corresponde a la velocidad específica de crecimiento máximo, asociada a S_2 , K_{S2} y K_{I2} son las constante de inhibición, asociadas al sustrato S_2 [1][2].

$$\mu_2(S_2) = u_{2,max} \frac{S_2}{S_2 + \frac{S_2^2}{K_{I2}} + K_{S2}} \quad (6)$$

α : Representa el parámetro de heterogeneidad de la mezcla en el biorreactor. Si $\alpha = 0$ hace referencia a un biorreactor ideal de lecho fijo, por el contrario, si $\alpha = 1$ indica que es un RCTA (Reactor continuo de tanque agitado) [2].

D : Este parámetro corresponde a la tasa de dilución, la cual está dada por la relación entre el caudal de entrada (Q) y el volumen efectivo del biorreactor (V) [38].

- **Balance de masas para los sustratos S_1 y S_2**

$$\frac{dS_1}{dt} = D(S_{1,in} - S_1) - k_1 \cdot \mu_1(S_1) \cdot X_1 \quad (7)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = D(S_{2,in} - S_2) + k_2 \cdot \mu_1(S_1) \cdot X_1 - k_3 \cdot \mu_2(S_2) \cdot X_2 \quad (8)$$

Donde:

S_1 : Variable que representa la concentración de sustrato orgánico [g/L] [2].

$S_{1,in}$: Parámetro para la concentración sustrato orgánico en la entrada del biorreactor [g/L] [36].

S_2 : Concentración total de AGVs [mmol/L] [2].

$S_{2,in}$: Parámetro para la concentración de AGVs en la entrada del reactor [mmol/L] [36].

- k_1 : Coeficiente estequiométrico para la degeneración del sustrato [2][39].
 k_2 : Coeficiente estequiométrico asociado a la producción de AGVs [mmol/g] [2].
 k_3 : Coeficiente estequiométrico para el consumo de AGVs [mmol/g] [2].

- **Balance de masas para la alcalinidad (Z) y el carbono inorgánico (C)**

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

$$\frac{dC}{dt} = D(C_{in} - C) + k_4 \cdot \mu_1(S_1) \cdot X_1 + k_5 \cdot \mu_2(S_2) \cdot X_2 - k_L a [C + S_2 - Z - K_H P_C] \quad (10)$$

Donde:

Z : Variable correspondiente a la alcalinidad en el biorreactor, es definida como la suma de ácidos disociados en la fase líquida [10]. Sus unidades son [mmol/L] [2].

Z_{in} : Concentración de la alcalinidad a la entrada del biorreactor [mmol/L] [36].

C : Variable para el carbono inorgánico, su unidad de medida es [mmol/L] [2]. Es empleado para establecer la calidad de las aguas de un sitio específico, dado que se cuantifica con la acidificación de una muestra de agua que llevará a la estabilidad del CO_2 (dióxido de carbono) [1].

C_{in} : Concentración del carbono inorgánico a la entrada del biorreactor [mmol/L] [2].

k_4 : Coeficiente estequiométrico relacionado con la producción de CO_2 [mmol/g] [2].

k_5 : Coeficiente estequiométrico relacionado con la producción de CO_2 [mmol/g] [2].

- **Tasa de producción de CH_4 y CO_2**

$$q_M = k_6 \mu(S_2) X_2 \quad (11)$$

$$q_C = k_L a [C + S_2 - Z - K_H P_C] \quad (12)$$

Donde:

q_M : Tasa de producción de metano [mmol /L· d] [10].

k_6 : Coeficiente estequiométrico relacionado con la producción de CH_4 [mmol/g] [2].

q_C : Tasa de producción para dióxido de carbono [mmol /L· d] [10].

$k_L a$: Factor de transferencia de líquido a gas [1/d] [10].

K_H : Constante de Henry para CO_2 [mmol/ L · atm] [10].

P_C : Presión parcial del gas [1].

- Potencial de Hidrógeno (pH)

$$pH = -\log_{10} \left(K_b \frac{C - Z + S_2}{Z - S_2} \right) \quad (13)$$

Donde:

K_b : Constante de afinidad de la reacción química de bicarbonato y dióxido de carbono disuelto [mol/L] [2][36].

- AMOCO con decaimiento del crecimiento

Una de las primeras modificaciones que presenta el modelo dinámico AMOCO o AM2 es la introducción de un parámetro de decaimiento (k_d) [10]. Esto, a causa de que Elena Ficara et. al [10] expusieran que la regresión lineal simple de mínimos cuadrados planteada en [2] fracasó con un tiempo de retención hidráulica alto debido a la inexistencia de un parámetro de descomposición para la tasa de crecimiento de las poblaciones bacterianas. Por lo tanto, este parámetro de decaimiento para las biomásas X_1 y X_2 es considerado como el 10% de las tasas máximas de crecimiento bacteriano $u_{1,max}$ y $u_{2,max}$ respectivamente, en las ecuaciones (14) y (15) se presentan las modificaciones [10].

$$\frac{dX_1}{dt} = [\mu_1(S_1) - \alpha D - k_d]X_1 \quad (14)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = [\mu_2(S_2) - \alpha D - k_d]X_2 \quad (15)$$

3.2.2 Métodos numéricos Runge-Kutta

La aplicación de los métodos Runge-Kutta tiene como propósito evitar el desarrollo matemático de derivadas $f(x,y)$ mediante el cálculo de $F(t,y)$ en más puntos, teniendo en cuenta el porcentaje de error y la complejidad que puedan llegar a alcanzar las soluciones numéricas [40][41]. Los métodos Runge-Kutta en los que se emplean orden 2,3 y 4 se solucionan por medio del cálculo de $F(t,y)$ en 2, 3 y 4 puntos correspondientemente [40]. Sin embargo, para métodos de orden mayor a 4, el cálculo de $F(t,y)$ debe realizarse en uno o dos puntos adicionales al orden que posea el método solución numérica [40]. La formulación matemática generalizada se expone a continuación:

$$y_{i+1} = y_i + \phi(x_i, y_i h)h \quad (16)$$

Donde $\phi(x_i, y_i h)$ es la función incremento y se puede explicar como una pendiente representativa en el intervalo [41]. Con base en lo anterior, cuando se requieren soluciones de ecuaciones diferenciales con mayor exactitud es preciso aplicar el método de orden superior o Butcher [41]. Las ecuaciones de este método numérico para un proceso multivariable se exponen a continuación [41][42].

$$\overline{x_{n+1}} = \overline{x_n} + \frac{h}{90}(7\overline{a} + 32\overline{c} + 12\overline{d} + 32\overline{e} + 7\overline{f}) \quad (17)$$

$$\overline{a} = (t_n, \overline{x_n}) \quad (18)$$

$$\overline{b} = \left(t_n + \frac{h}{4}, \overline{x_n} + \frac{h}{4}\overline{a} \right) \quad (19)$$

$$\overline{c} = \left(t_n + \frac{h}{4}, \overline{x_n} + \frac{h}{8}(\overline{a} + \overline{b}) \right) \quad (20)$$

$$\overline{d} = \left(t_n + \frac{h}{2}, \overline{x_n} - \frac{h}{2}\overline{b} + h\overline{c} \right) \quad (21)$$

$$\overline{e} = \left(t_n + \frac{3h}{4}, \overline{x_n} + \frac{3h}{16}\overline{a} + \frac{9h}{16}\overline{d} \right) \quad (22)$$

$$\overline{f} = \left(t_n + h, \overline{x_n} - \frac{3h}{7}\overline{a} + \frac{2h}{7}\overline{b} + \frac{12h}{7}\overline{c} - \frac{12h}{7}\overline{d} + \frac{8h}{7}\overline{e} \right) \quad (23)$$

4. Capítulo 4. Metodología

En este capítulo se presenta la metodología orientada a la evaluación del comportamiento dinámico de un biodigestor anaeróbico, a fin de establecer las condiciones técnicas que determinen la mejor producción de biogás. Para ello, se plantean tres etapas que direccionan la ejecución y cumplimiento de los objetivos específicos: en la primera etapa se pretende identificar los factores predominantes en el proceso de DA a nivel matemático y experimental. En la segunda fase se establecerá una metodología que integre el modelo AMOCO con parámetros ajustados experimentalmente obtenidos de una revisión bibliográfica, a fin de dimensionar la producción de biogás con la aplicación diferentes sustratos. Por último, se realizará el diseño del experimento en reactores batch con el propósito de seleccionar los instrumentos de medida (sensores) para reactores tipo batch y continuos. La metodología planteada se expone gráficamente en la Figura 3., allí se relacionan los objetivos y las actividades respectivas.

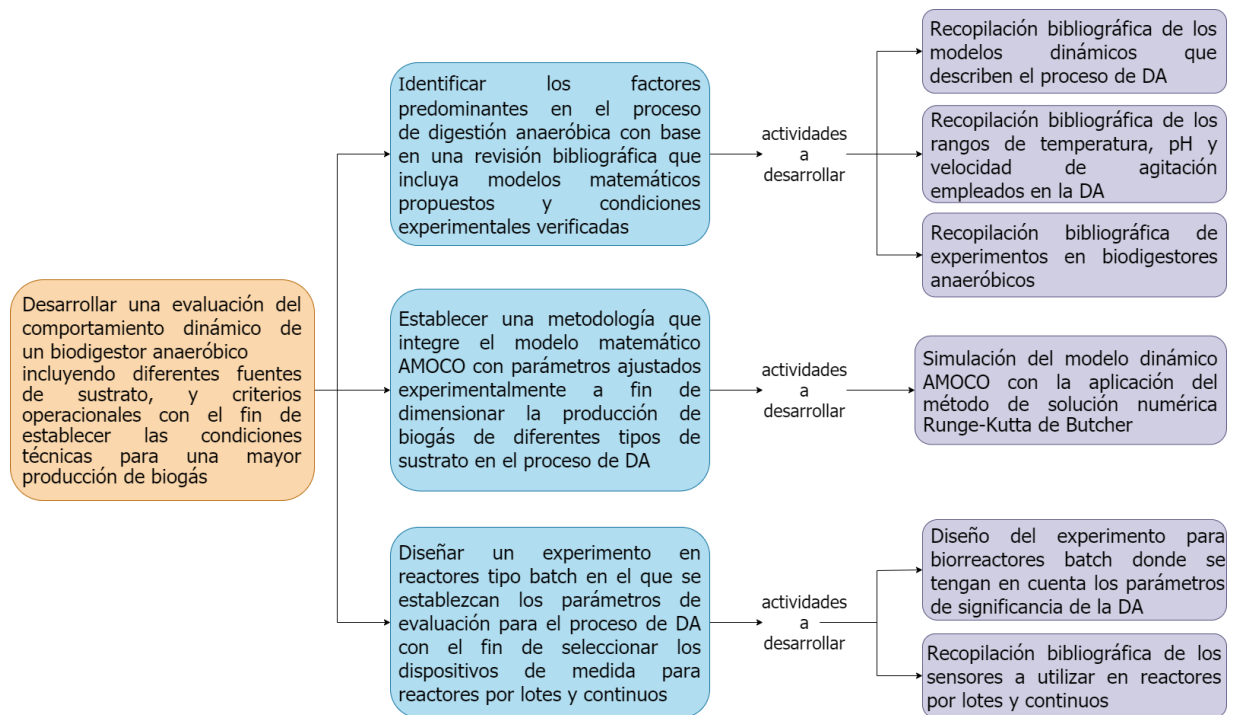


Figura 3. Metodología de desarrollo. Fuente: Elaboración propia.

5. Capítulo 5. Factores predominantes en el proceso de digestión anaeróbica

El proceso de digestión anaeróbica es una compleja agrupación de reacciones bioquímicas a través de las cuales los microorganismos degradan el material orgánico para obtener biogás, constituido principalmente por metano y dióxido de carbono [36]. Estas reacciones se producen en cuatro etapas consecutivas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, que se pueden analizar por medio del desarrollo experimental en biorreactores anaeróbicos por lotes o continuos, a fin de evaluar el comportamiento real de sustratos, inóculos y condiciones operacionales del bioproceso [5].

Asimismo, el modelado matemático de la DA permite comprender la dinámica del sistema para predecir el comportamiento de las variables implicadas en el proceso y la producción de biogás que se pueda llegar a alcanzar [36]. Esto, se ve reflejado como una ventaja en cuanto a costos, tiempo y la prevención de riesgos de inestabilidad o inhibición que puedan presentarse y afectar la eficiencia del desarrollo experimental [36]. Por lo tanto, tomando como referencia la documentación bibliográfica revisada relacionando reportes experimentales y análisis matemáticos del modelo DA se identifican una serie de factores predominantes en el proceso de digestión anaeróbica que serán presentados en este capítulo.

5.1 Sustrato

La principal composición nutricional del sustrato (materia orgánica) que va a alimentar el biodigestor corresponde a la cantidad de proteínas, carbohidratos y lípidos que lo integran [43]. Los sustratos abundantes en proteínas y lípidos tienen mayor potencial de producción de metano en comparación con los sustratos ricos en carbohidratos, pese a esto, la degradación de las grasas expulsa ácidos de cadena larga que pueden afectar a los microorganismos y generar un desequilibrio del pH [43]. Por otro lado, las diferentes variedades de sustratos afectan directamente la dinámica del sistema debido a que, para sustratos particulados, es decir, de lenta biodegradación, la fase de limitación es la hidrólisis [36][44]. Por el contrario, para los sustratos solubles o de fácil degradación la etapa limitante en la DA es la metanogénesis, dado que la velocidad de crecimiento bacteriano se evidencia en acumulación de AGVs y por ende en inhibición de la actividad metanogénica de los microorganismos [44][45].

Por ello, previo a iniciar la digestión anaeróbica, se hace necesaria la caracterización del tipo de sustrato utilizado por el contenido de carbohidratos, proteínas, lípidos y fibra [46]. Asimismo, en la caracterización fisicoquímica se establecen las variables: pH, alcalinidad total, AGVs, humedad, DQO (Demanda química de oxígeno), sólidos totales y volátiles, entre otros [28]. Es relevante tener en cuenta que en un proceso experimental, la concentración inicial y los sólidos totales de la materia orgánica pueden afectar de manera determinante la DA y la generación de metano [46].

Mursec et al. [47] evidencian que se alcanza la mayor producción de biogás con la utilización de ensilaje de girasol como sustrato en contraste con los otros tipos de sustrato evaluados: sorgo, amaranto, alcachofa y remolacha.

5.2 Inóculo

La inoculación es un proceso que se basa en agregar población microbiana (inóculo) proveniente de un tratamiento anaeróbico al sustrato orgánico contenido en el biorreactor, lo que producirá que los microorganismos estén en un medio controlado a nivel biológico, químico y físico que les permite ajustarse al sustrato y llegar a un punto de equilibrio para iniciar la digestión [48]. Mateescu y Constantinescu [49] afirman que según estudios experimentales, el tipo y calidad del inóculo adicionado al sustrato tiene un rol significativo en la DA porque puede mejorar la degradación de la biomasa. A partir de esto, las fuentes de inóculo más utilizadas corresponden a lodo anaeróbico, excremento de animales, lodos industriales, lodos granulares y rumen; una opción para aumentar la diversidad bacteriana es mezclar inóculos de diferentes fuentes [26]. En relación con lo anterior, Mateescu y Constantinescu [49] apoyados de resultados experimentales, evidencian que hay una mejor carga de bacterias metanogénicas con lodos de depuradora, en contraste con el excremento de ganado. Este inóculo de origen animal tiene alta presencia de microorganismos acidogénicos que producen inhibición en la fase metanogénica, por lo que se determina que los lodos de depuradora son los más indicados para la DA [49].

De manera que, es relevante tener en cuenta los valores indicativos que presenta Holliger et al. [26] para seleccionar un inóculo de buena calidad:

- pH: > 7.0 unidades y < 8.5 unidades
- AGVs: < $1.0 \text{ g}_{CH_3COOH} \cdot L^{-1}$
- NH_4^+ : < $2.5 \text{ g}_{N-NH_4} \cdot L^{-1}$
- Alcalinidad: > $3 \text{ g}_{CaCO_3} \cdot L^{-1}$

5.3 Relación Sustrato/Inóculo (S/I)

En cuanto a la relación sustrato/inóculo para la DA, la cantidad de inóculo debe ser mayor en comparación con el sustrato añadido a la mezcla, como lo demuestran Sánchez et al. [50] en su experimento al obtener un valor mayor de PBM con la aplicación de una relación sustrato/inóculo (S/I) 1:3, en contraposición con el reactor configurado con una relación 1:2.

5.4 Temperatura

La temperatura es uno de los parámetros de mayor influencia en el proceso de DA debido a que afecta la subsistencia de las poblaciones bacterianas e interviene en sus actividades metabólicas [29]. Los rangos de temperatura para una digestión anaeróbica óptima son: mesofílico (35-37°C) y termofílico (entre 55° y 65°C) [31], Mahbub et al. [51] indican que los metanógenos mesofílicos son de lento crecimiento, su tiempo de reproducción puede tardar hasta 30 días y pueden resistir una serie más amplia de temperaturas. Mientras que, los metanógenos termofílicos crecen rápidamente, su tiempo de reproducción puede ser de 10 a 15 días y su valor más ajustado es en 55°C [51]. De manera que, el proceso termofílico requiere de mayor atención debido a que las bacterias son más sensibles a los cambios de concentración de sustrato y variaciones de temperatura comparado con la población bacteriana mesofílica [52].

Por lo tanto, es importante que la temperatura se mantenga en el rango óptimo de operación para la DA, puesto que si la temperatura sufre alteraciones, no se podrá mantener la población bacteriana metanógena estable lo que producirá inhibición bacteriana [53]. Por el contrario, la temperatura mesofílica tiene ventajas en cuanto a la reducción de costo de energía, mayor estabilidad y menor sensibilidad a sustancias tóxicas como los ácidos grasos de cadena larga y el amonio [5][54]. Bastin y Dochain [20] indican que la temperatura puede ser modelada matemáticamente por medio de la ley de Arrhenius, que se presenta a continuación:

$$\mu(T) = \begin{cases} a_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) - a_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) - b, & \text{si } T_1 \leq T \leq T_2 \\ 0, & \text{si } T < T_1 \text{ o } T > T_2 \end{cases} \quad (24)$$

Donde: E_1 y E_2 son energías de activación, R es la constante de gas y a_1, a_2 y b son constantes. Esta formulación, expone que la tasa de crecimiento específico aumenta con la temperatura hasta un valor máximo de T_2 , como se evidencia en la Figura 4.[20].

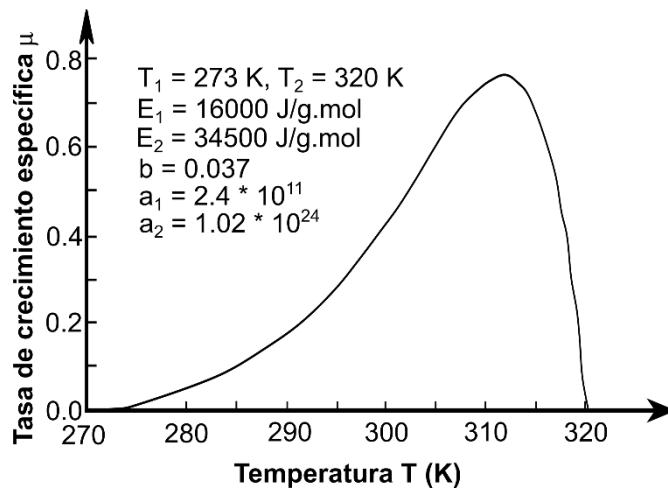


Figura 4. Comportamiento de $\mu(T)$. Fuente: [20]

5.5 pH

El pH es un parámetro de monitoreo y diagnóstico en el modelado y experimentación de la DA, puesto que las poblaciones bacterianas necesitan en el reactor un hábitat de pH estable y con valores próximos a la zona neutra para efectuar su actividad enzimática [36][55]. El valor de pH para un proceso de digestión anaeróbica eficiente oscila entre 6 y 8 unidades [2], no obstante, Ricardo Parra [45] indica que esto no se debe generalizar debido a la influencia de las propiedades fisicoquímicas del sustrato en el pH. De la misma forma, en el proceso incide el rango óptimo específico para las bacterias acidogénicas (5.5 - 6.5) y para las bacterias metanogénicas (7.8 - 8.2) [36]. Es relevante comprender que los microorganismos metanogénicos son más sensibles a los niveles de acidificación que haya en el reactor, lo que puede generar inhibición en el crecimiento bacteriano [51].

Lenin Núñez [36] plantea que con valores de pH bajos hay una disminución de la actividad de la población bacteriana metanogénica, lo que ocasiona el aumento de la presión parcial del hidrógeno y en consecuencia, genera la acumulación de los AGVs que produce inhibición en las bacterias metanógenas. Para dar solución a esto, Yaniris Lorenzo y Cristina Obaya [52] exponen que algunos métodos para regular el pH en la DA son disminución de la tasa de carga orgánica empleada y la adición de alcalinizantes a fin de prevenir procesos de acidificación. Por otro lado, cuando los valores de pH son altos, se propicia el incremento de amoníaco, que en condiciones elevadas actúa como un inhibidor para el crecimiento de las bacterias [36]. Así como los AGVs influyen el comportamiento del pH en la digestión anaeróbica, también lo hace la alcalinidad que se presente en el sistema y el contenido de dióxido de carbono producido [45]. La alcalinidad, actúa como un controlador del pH en la DA debido a su

capacidad buffer, propiedad para estabilizar el pH cuando se producen cambios bruscos, estas variaciones se presentan cuando ya existen procesos de inestabilidad en el sistema, lo que indica que el pH no es parámetro temprano que indique desequilibrio en el proceso [36][45].

5.6 Alcalinidad

La alcalinidad, es el sistema químico encargado de ajustar el pH durante la digestión anaeróbica y es un indicador más preciso de inestabilidad del proceso, en comparación con el pH [36][52]. Esto se produce porque el pH se expresa en escala logarítmica y la alcalinidad en escala lineal, de manera que, una pequeña reducción del pH conlleva a un consumo de alcalinidad alto [45]. Hotz [56] expone que la alcalinidad en el reactor se consume durante la producción de ácidos grasos volátiles (etapa acidogénica), sin embargo, cuando las bacterias metanogénicas transforman los AGVs en metano se origina la alcalinidad de bicarbonato (etapa metanogénica). Ricardo Parra [45] sugiere que los valores de alcalinidad superiores a 6500 mg/L y los valores mayores a 7.4 unidades de pH advierten que la actividad de los microorganismos está afectada.

5.7 Ácidos grasos volátiles (AGVs)

En el proceso bioquímico de digestión anaeróbica, los ácidos grasos volátiles o AGVs están compuestos principalmente por los ácidos acético, butírico y propiónico, y en menores proporciones por los ácidos valérico, isovalérico, isobutírico y capríónico. Estos ácidos son producidos durante la acidogénesis y se emplean como sustrato en la etapa metanogénica del proceso [36]. Lenin Núñez [36] indica que la concentración de AGVs es el índice más usado para el seguimiento y control puesto que es un indicador del comportamiento interno del proceso de DA. La acumulación de los AGVs indica alteración en la actividad de las poblaciones bacterianas y puede desencadenar variaciones en el pH y procesos de inhibición [3]. Dicha acumulación puede ser causada por sobrecarga orgánica, esto hace que la cantidad de AGVs generados en la acidogénesis sea mayor de la que pueden digerir las bacterias acetogénicas y metanogénicas en un tiempo determinado [36][3]. Otros factores que pueden producir acumulación de estos compuestos son las variaciones de temperatura o la presencia de sustancias tóxicas [3].

5.8 Amoníaco

La producción de amoníaco resulta de la degradación de la materia nitrogenada en forma de proteínas y corresponde a uno de los parámetros de mayor influencia en la inhibición de la digestión anaeróbica [45][57]. De modo que, la población bacteriana más sensible y que tiene mayor probabilidad de inhibir su crecimiento por el amoníaco es la población metanogénica [57]. Ye Chen et al. [57] indican que las concentraciones de amoníaco menores a 200 mg/L son apropiadas para la DA debido a que el nitrógeno es un componente esencial para las bacterias. Sin embargo, Yeison Olaya et al. [6] exponen que los niveles de amoníaco pueden mantenerse por debajo de 2000 mg/L para un buen funcionamiento del sistema. Por otro lado, Ye Chen et al. [57] plantea que un proceso de DA que presenta valores de concentración de amoníaco altos, tiene facilidad de inhibición y manifiesta menor estabilidad con temperatura en el rango termofílico en comparación con el rango mesofílico.

5.9 Relación carbono nitrógeno (C/N)

El carbono y el nitrógeno son alimentos esenciales para los microorganismos metanogénicos, el carbono corresponde a la fuente de energía, mientras que el nitrógeno se emplea para generar nuevas células [53]. Esto indica que, la relación C/N de la materia orgánica puede influir en la estabilidad del sistema, dado que, mantiene el equilibrio de nutrientes para el desarrollo de las bacterias, sin este equilibrio la relación se considera como un parámetro que limita la DA [46][54]. Autores como Yeison Olaya et al. [6], Azeem Khalid et al. [46], Mahbub Alam et al. [51], Moisés García [53] y Sagor Kumar et al. [54] sugieren que la relación óptima de C/N en la materia orgánica debe estar entre 30:1 y 20:1.

Una elevada relación C/N indica que, para suplir su necesidad de proteínas, la población bacteriana metanogénica ingerirá rápidamente el nitrógeno, por lo que, no habrá nitrógeno para reaccionar con el carbono y en consecuencia disminuirá o se detendrá la producción de biogás [53][58]. Por el contrario, una baja relación C/N evidencia que, al liberarse nitrógeno, este se acumulará en forma de amoníaco y producirá que el pH aumente, si este valor sobrepasa las 8.5 unidades habrá un efecto tóxico para los metanógenos [51][53][58]. Una alternativa para mejorar la relación C/N es realizar codigestión de materia orgánica con excremento animal, lodos activados y aguas residuales [46][54].

5.10 Tiempo de retención

Es el tiempo que debe permanecer la materia orgánica en el biodigestor para completar su proceso de degradación y está relacionado con la temperatura, como se presenta en la Tabla 2. [6].

Tabla 2. Tiempo de retención. Fuente:[6]

Temperatura	Tiempo de retención
Psicrofílico	Mayor a 40 días
Mesofílico	10 - 40 días
Termofílico	Menor a 10 días

Con base en la información presentada en el desarrollo de este capítulo, se establece que los factores que pueden influenciar de forma significativa la DA son: sustrato, inóculo, relación S/I, temperatura, pH, alcalinidad, AGVs, amonio, relación C/N y el tiempo de retención de la mezcla. Por lo tanto, en la Tabla 3. se expone un resumen de los hallazgos de mayor relevancia para un proceso de digestión anaeróbica óptimo.

Tabla 3. Condiciones para un bioproceso de digestión anaeróbica óptimo

Parámetro	Condición óptima
Sustrato	Ensilaje de girasol
Inóculo	Utilización de lodos anaerobios
Relación S/I	Relación 1:3
Temperatura	Rango mesofílico: 35 – 37°C Rango termofílico: 55 – 60°C
pH	Variaciones en el rango de 6 a 8 unidades
Alcalinidad	Concentraciones menores a 6500 mg/L
AGVs	Concentración menor a 25 mmol/L
Amoníaco	Concentraciones menores a 200 mg/L
Relación C/N	Relación entre 30:1 y 20:1
Tiempo de retención	10 – 40 días para temperatura mesofílica Menor a 10 días para temperatura termofílica

6. Capítulo 6. Evaluación de la producción de biogás

En este capítulo se presenta la metodología que integra el modelo matemático AMOCO con parámetros ajustados experimentalmente obtenidos de una revisión bibliográfica, este procedimiento se desarrolla mediante la solución numérica del modelo, simulación y evaluación del comportamiento de las variables de estado. Lo anterior, con el fin de dimensionar la 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.

6.1 Desarrollo matemático

La solución del modelo dinámico AMOCO se puede efectuar por medio de la implementación de métodos numéricos, puesto que, permiten la resolución de ecuaciones diferenciales numéricamente [41]. Por tanto, se obtendrá una respuesta aproximada del comportamiento real del proceso de DA en el reactor. Tomando como referencia los métodos de solución numérica presentados en la Figura 5., se selecciona el método de Butcher o Runge-Kutta de quinto orden, considerando que se busca alcanzar mayor exactitud con un trabajo computacional igual que otros métodos de orden superior [41].

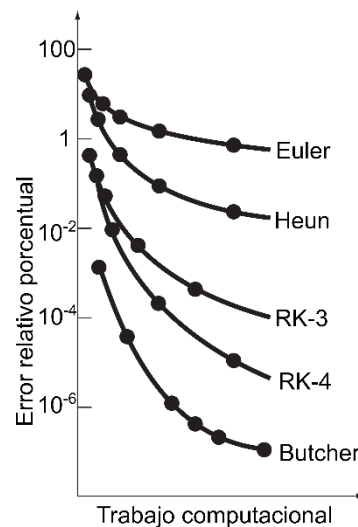


Figura 5. Error relativo porcentual vs trabajo computacional de los métodos RK.

Fuente: [41]

6.1.1 Solución numérica del modelo dinámico AMOCO

En esta sección se expone la solución de las ecuaciones diferenciales ordinarias autónomas de primer orden y no lineales [1] que integran el modelo AMOCO con la introducción del decaimiento bacteriano para X_1 y X_2 . Adicionalmente, la resolución de los puntos de evaluación (a, b, c, d, e, f) para cada ecuación con el método Runge-Kutta de quinto orden se presenta en el siguiente documento: [ENTREGABLES\Entregable 5\Solución AMOCO RK5.pdf](#)

- Población bacteriana acidogénica X_1 :

$$\frac{dX_1}{dt} = \left[\frac{u_{1,\max} S_1}{S_1 + K_{S1}} - \alpha D - k_{d1} \right] X_1 \quad (25)$$

$$\overline{x_{1(n+1)}} = \overline{x_{1(n)}} + \frac{h}{90} (7\bar{a} + 32\bar{c} + 12\bar{d} + 32\bar{e} + 7\bar{f}) \quad (26)$$

- Población bacteriana metanogénica X_2 :

$$\frac{dX_2}{dt} = \left[\frac{u_{2,\max} S_2}{S_2 + \frac{S_2^2}{K_{I2}} + K_{S2}} - \alpha D - k_{d2} \right] X_2 \quad (27)$$

$$\overline{x_{2(n+1)}} = \overline{x_{2(n)}} + \frac{h}{90} (7\bar{a} + 32\bar{c} + 12\bar{d} + 32\bar{e} + 7\bar{f}) \quad (28)$$

- Sustrato orgánico S_1 :

$$\frac{dS_1}{dt} = D(S_{1,in} - S_1) - k_1 \cdot \frac{u_{1,\max} S_1}{S_1 + K_{S1}} \cdot X_1 \quad (29)$$

$$\overline{s_{1(n+1)}} = \overline{s_{1(n)}} + \frac{h}{90} (7\bar{a} + 32\bar{c} + 12\bar{d} + 32\bar{e} + 7\bar{f}) \quad (30)$$

- Sustrato metanogénico S_2 (Ácidos Grasos Volátiles):

$$\frac{dS_2}{dt} = D(S_{2,in} - S_2) + k_2 \cdot \frac{u_{1,\max} S_1}{S_1 + K_{S1}} \cdot X_1 - k_3 \cdot \frac{u_{2,\max} S_2}{S_2 + \frac{S_2^2}{K_{I2}} + K_{S2}} \cdot X_2 \quad (31)$$

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

- *Alcalinidad (Z):*

$$\frac{dZ}{dt} = D(Z_{in} - Z) \quad (33)$$

$$\overline{Z_{(n+1)}} = \overline{Z_{(n)}} + \frac{h}{90} (7\bar{a} + 32\bar{c} + 12\bar{d} + 32\bar{e} + 7\bar{f}) \quad (34)$$

- *Carbono inorgánico (C):*

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dt} = D(C_{in} - C) + k_4 \cdot \frac{u_{1,max} S_1}{S_1 + K_{S1}} \cdot X_1 + k_5 \cdot \frac{u_{2,max} S_2}{S_2 + \frac{S_2^2}{K_{I2}} + K_{S2}} \cdot X_2 \\ - k_L a [C + S_2 - Z - K_H P_c] \end{aligned} \quad (35)$$

$$\overline{C_{(n+1)}} = \overline{C_{(n)}} + \frac{h}{90} (7\bar{a} + 32\bar{c} + 12\bar{d} + 32\bar{e} + 7\bar{f}) \quad (36)$$

6.2 Selección de parámetros para la aplicación de AMOCO

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. En la Tabla 4. se presentan los parámetros cinéticos y coeficientes de rendimiento requeridos para ejecutar la simulación.

*Tabla 4. Parámetros de estimación y coeficientes de rendimiento de AMOCO.
Fuente: [2]*

Variable	Significado	Unidad
μ_{1max}	Tasa máxima de crecimiento bacteriano acidogénico	d^{-1}
μ_{2max}	Tasa máxima de crecimiento bacteriano metanogénico	d^{-1}

K_{S1}	Constante de saturación media asociada al sustrato orgánico (S1)	g/L
K_{S2}	Constante de saturación media asociada a los AGVs (S2)	mmol/L
K_{I2}	Constante de inhibición para los AGVs	mmol/L
k_1	Coefficiente estequiométrico para la degradación del sustrato (S1)	g/g
k_2	Coefficiente estequiométrico para la producción de AGVs	mmol/g
k_3	Coefficiente estequiométrico para el consumo de AGVs	mmol/g
k_4	Coefficiente estequiométrico para la producción de CO_2	mmol/g
k_5	Coefficiente estequiométrico para la producción de CO_2	mmol/g
k_6	Coefficiente estequiométrico para la producción de CH_4	mmol/g

A continuación, se exponen los parámetros seleccionados para el desarrollo del modelo matemático AMOCO con la utilización de diferentes tipos de sustrato y las condiciones operacionales puestas en práctica para cada procedimiento experimental de la DA.

6.2.1 Producción de biogás en aguas residuales

Bernard et al. [2] reportaron los parámetros para el desarrollo del modelo matemático AMOCO presentados en la Tabla 5. Estos datos son ajustados a partir de la información experimental obtenida de un proceso de DA con la aplicación de aguas residuales provenientes de una destilería de vino industrial como sustrato. Este procedimiento experimental se lleva a cabo en un reactor de tanque continuo agitado (RTCA) durante 70 días y la temperatura de operación se encuentra en el rango mesofílico (35°C), se asumen dos poblaciones bacterianas con características homogéneas y que la biomasa presenta una distribución uniforme en el tanque.

Tabla 5. Parámetros del modelo dinámico AMOCO para aguas residuales. Fuente: [2]

Parámetro	Valor	Unidad
μ_{1max}	1.2	d ⁻¹
μ_{2max}	0.74	d ⁻¹
K_{S1}	7.1	g/L
K_{S2}	9.28	mmol/L
K_{I2}	256	mmol/L

k_1	42.14	g/g
k_2	116.5	mmol/g
k_3	26	mmol/g
k_4	50.6	mmol/g
k_5	343.6	mmol/g
k_6	453	mmol/g
$S_{1(0)}$	1.5	g/L
$S_{2(0)}$	3	mmol/L
$X_{1(0)}$	0.5	g/L
$X_{2(0)}$	0.5	g/L
$Z_{(0)}$	63	mmol/L
$C_{(0)}$	65	mmol/L
$S_{1,in}$	10	g/L
$S_{2,in}$	87.5	mmol/L
Z_{in}	87.5	mmol/L
C_{in}	9	mmol/L
K_{La}	19.8	d ⁻¹
K_H	27	mmol/L·atm
K_b	6.53e-7	mmol/L
D	0.395	d ⁻¹
T	35	°C
P_T	1.003	atm

6.2.2 Producción de biogás en ensilaje de maíz

En la Tabla 6. se muestran los parámetros cinéticos y coeficientes de rendimiento del modelo matemático AMOCO propuestos por Arzate [59]. Estos, son ajustados con los resultados experimentales obtenidos del proceso de DA con ensilaje de maíz, el desarrollo experimental se realizó en dos reactores de 50 L asumiendo que son agitados continuamente y que la biomasa está distribuida uniformemente, con un tiempo total de digestión de 80 y 92 días, respectivamente, en condiciones mesofílicas [59]. Los parámetros iniciales y de entrada del modelo se adoptan de la investigación de Bernard et al. [2] en una planta de tratamiento de aguas residuales de una destilería de vino, puesto que, no se cuenta con información de parámetros para el proceso de DA efectuado con ensilaje de maíz [59].

Tabla 6. Parámetros del modelo dinámico AMOCO para ensilaje de maíz. Fuente: [59]

Parámetro	Valor	Unidad
μ_{1max}	4.2	d^{-1}
μ_{2max}	1.0	d^{-1}
K_{S1}	469.1	g/L
K_{S2}	34.5	mmol/L
K_{I2}	250	mmol/L
k_1	3.14	g/g
k_2	155	mmol/g
k_3	300	mmol/g
k_4	80.6	mmol/g
k_5	3.6	mmol/g
k_6	350	mmol/g

6.2.3 Producción de biogás en vinazas de tequila

Alcaraz González et al. [60] plantean los valores de los parámetros para el modelo AMOCO mostrados en la Tabla 7., estos son ajustados con los datos obtenidos experimentalmente en una aplicación de la digestión anaeróbica con el uso de vinazas de tequila. El proceso experimental se realizó en un reactor de lecho fijo, inoculado con lodos granulares, la temperatura de operación se mantiene en el rango mesofílico (37°C) y el tiempo de retención es de 35 días.

Tabla 7. Parámetros del modelo dinámico AMOCO para vinazas de tequila. Fuente: [60]

Parámetro	Valor	Unidad
μ_{1max}	1.96	d^{-1}
μ_{2max}	2.86	d^{-1}
K_{S1}	6.37	g/L
K_{S2}	49.64	mmol/L
K_{I2}	416.77	mmol/L
k_1	28.35	g/g
k_2	86.45	mmol/g
k_3	165.11	mmol/g
k_4	50.16	mmol/g
k_5	336.64	mmol/g
k_6	453	mmol/g

6.2.4 Producción de biogás en ensilaje de pasto

En la Tabla 8. se presentan los parámetros del modelo matemático AMOCO reportados por Arzate [59] para un proceso de digestión anaeróbica que emplea como sustrato ensilaje de pasto. El ajuste de los parámetros cinéticos y coeficientes de rendimiento se realiza con base en simulaciones del modelo ADM1; las cuales fueron ejecutadas con datos obtenidos de un procedimiento experimental en un biorreactor continuo de 50 L, con un tiempo de retención de 37 días y en condiciones mesofílicas [59].

Tabla 8. Parámetros del modelo dinámico AMOCO para ensilaje de pasto. Fuente: [59]

Parámetro	Valor	Unidad
μ_{1max}	0.7	d^{-1}
μ_{2max}	0.74	d^{-1}
K_{S1}	1.3	g/L
K_{S2}	34.4	mmol/L
K_{I2}	991.3	mmol/L
k_1	24	g/g
k_2	220.7	mmol/g
k_3	874	mmol/g
k_4	90	mmol/g
k_5	200	mmol/g
k_6	488.2	mmol/g
$k_{d1,2}$	4.4	%

6.3 Simulación

La simulación del proceso de DA se realiza con base en la resolución del modelo dinámico AMOCO con decaimiento por medio del método Runge-Kutta de quinto orden, en el entorno de programación MATLAB. Con este procedimiento se busca evaluar la producción de biogás en un biorreactor continuo y establecer el comportamiento de las poblaciones bacterianas, los sustratos, la alcalinidad, el carbono inorgánico y el pH con la aplicación de diferentes sustratos. Para ello, se asume un reactor de tanque continuo agitado (RTCA), temperatura en el rango mesofílico y tiempo de retención de 40 días. En los archivos de programa .m se establece un espacio muestral de 4000 puntos con un paso de 0.01, esto, con la finalidad de simular los 40 días de digestión y así obtener las gráficas que describen la tendencia de las variables de estado en el tiempo. En las siguientes subsecciones se presenta el procedimiento para realizar la simulación y los resultados obtenidos.

6.3.1 Diagrama de procesos

En la Figura 6. se exhibe el procedimiento para llevar a cabo la simulación del proceso de DA mediante la resolución del modelo matemático AMOCO. De tal forma que, en la primera fase se desarrolla la solución numérica y se efectúa una revisión bibliográfica de experimentos, a continuación, se realiza el software de simulación en MATLAB en donde se ajustan los datos del modelo extraídos de la literatura para cada sustrato seleccionado. Finalmente, se analiza el comportamiento de las variables inmersas en la dinámica y se evalúa la producción de metano y dióxido de carbono.

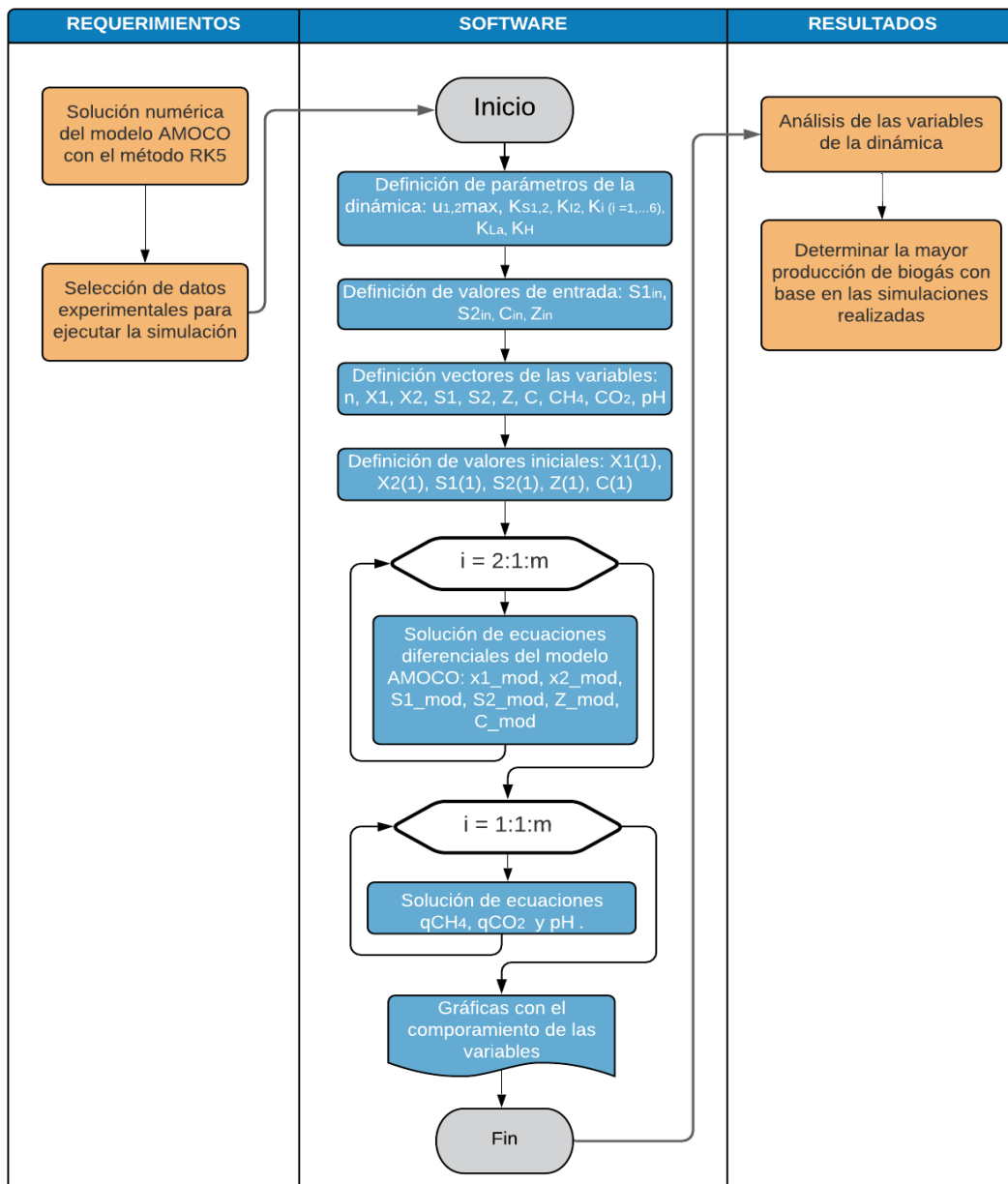


Figura 6. Diagrama de procesos para la simulación del proceso de DA

6.3.2 Respuesta dinámica del modelo AMOCO

En esta sección se expone la respuesta dinámica de las simulaciones del modelo matemático AMOCO, teniendo en cuenta la aplicación de diversas fuentes de sustrato al proceso de DA, estas son: aguas residuales, ensilaje de maíz, vinazas de tequila y ensilaje de pasto. Para el siguiente análisis, se toman como referencia las tendencias que presentan las variables simuladas con la aplicación de aguas residuales, a partir de la información extraída de Bernard et al. [2]. Debido a que estos parámetros cinéticos y coeficientes de rendimiento del modelo fueron ajustados experimentalmente con el fin de obtener un alto grado de similitud entre el modelado matemático y el comportamiento real del sistema.

6.3.2.1 Simulación del sistema con aguas residuales como sustrato

En la Figura 7 se expone el comportamiento de las variables inmersas en el proceso de DA según el modelo dinámico AMOCO. De acuerdo con lo anterior, las gráficas de X1 y X2 corresponden a las poblaciones bacterianas, acidogénica y metanogénica, respectivamente, mientras que, S1 es la variable del sustrato orgánico (aguas residuales) y S2 representa los AGVs producidos.

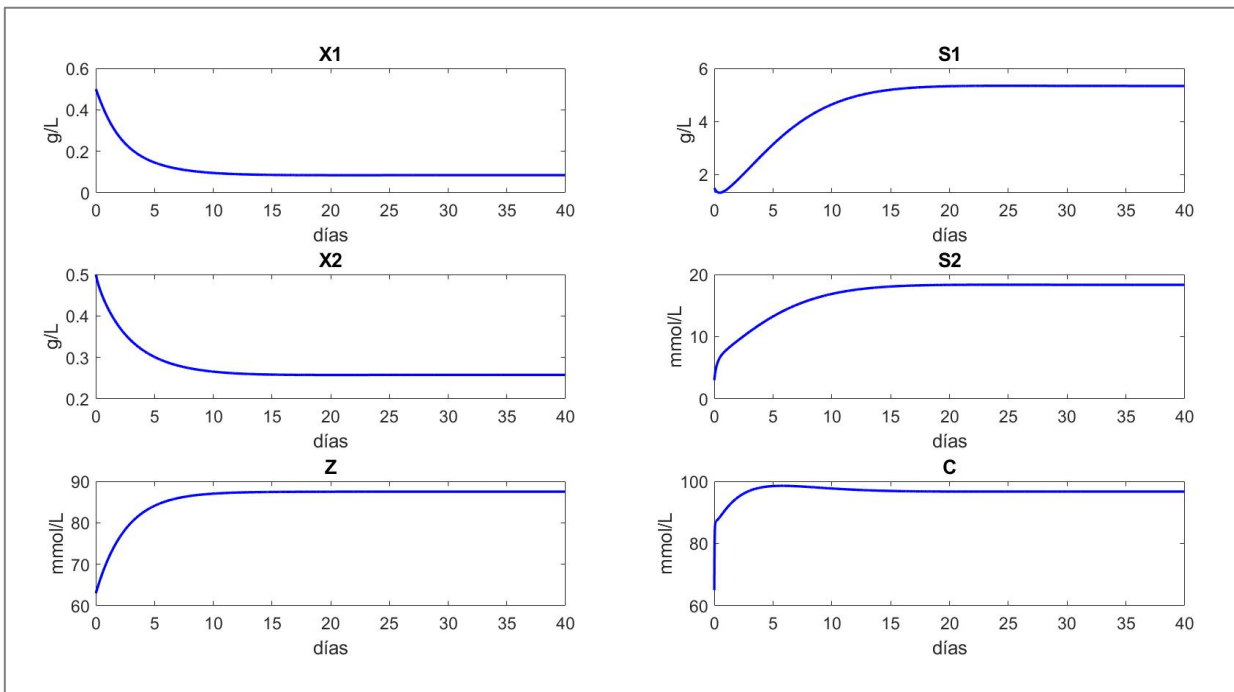


Figura 7. Comportamiento de las variables del modelo AMOCO para la DA con aguas residuales

Las tendencias de la simulación muestran que en el día 1 de digestión hay una disminución del sustrato debido a la alta concentración de microorganismos X1 que lo consumen. Sin embargo, una vez se empieza a realizar la carga orgánica diaria de sustrato (S1), la cual estabiliza en el día 20 con un valor de 5.3 g/L, el comportamiento de las poblaciones bacterianas es una disminución en su descenso hasta lograr la estabilización en el día 15 con un valor de 86.16 mg/L para X1 y 258.6 mg/L para X2. Cabe resaltar que la dinámica de S2 presenta un cambio en su estado transitorio luego del día 2 comparado con su tendencia inicial y alcanza el estado estable aproximadamente en el día 20 con un valor de 18.33 mmol/L.

En cuanto a la alcalinidad del sistema, la respuesta dinámica presentada es igual para todas las simulaciones, puesto que, su formulación depende únicamente de la concentración inicial de dicha variable; los parámetros iniciales y de entrada para determinar los parámetros de estimación y coeficientes de rendimiento de AMOCO con los sustratos adicionales de igual forma se extraen de [2]. Con base en esto, se obtiene un comportamiento ajustado a un sistema de primer orden que evidencia estabilidad en el día 15 con un valor 87.437 mmol/L. Por otro lado, la respuesta del carbono inorgánico indica que hay propensión al crecimiento en el estado transitorio y luego, alcanza la estabilidad en el día 20 con un valor de 96.7 mmol/L.

En relación con la producción de metano, dióxido de carbono y el pH estimado en el proceso, se puede observar en la Figura 8. que el transitorio de la variable CH₄ presenta un sobreimpulso en el día 1. Esto puede ser explicado por una elevada cantidad inicial de bacterias que producirán metano, sin embargo, esta tendencia en el estado transitorio no representa el comportamiento real del proceso, debido a que la producción empieza unos días después. El valor de metano obtenido en estado permanente con la utilización de aguas residuales como sustrato es de 54.79 mmol/L*d en el día 12. Por otro lado, la producción de CO₂ es más baja en comparación con el CH₄ al estabilizarse en el día 15 con un valor constante de 2.02 mmol/L*d.

Por último, el pH se encuentra en su rango óptimo para el proceso de digestión anaeróbica indicado por Bernard et al.[2], evidenciando un rápido alcance al estado permanente (día 5) con un valor de 6.59 unidades.

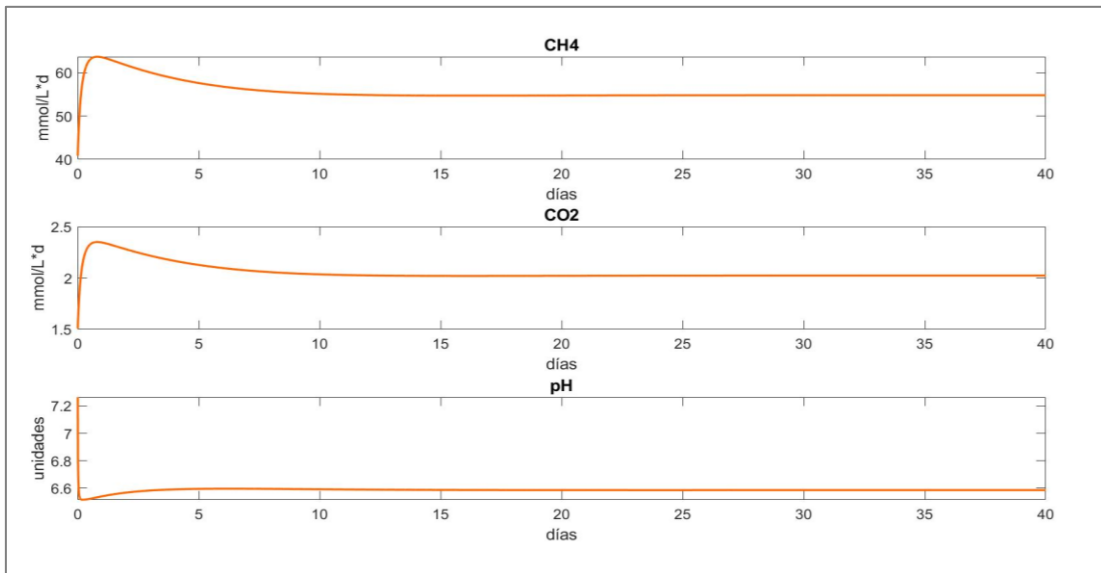


Figura 8. Producción de CH₄, CO₂ y comportamiento del pH en un biodigestor anaeróbico alimentado con aguas residuales

6.3.2.2 Simulación del sistema con ensilaje de maíz como sustrato

A continuación, en la Figura 9. se presenta la respuesta dinámica de las seis variables de estado que incluye el modelo AMOCO o AM2 para describir el proceso de digestión anaeróbica.

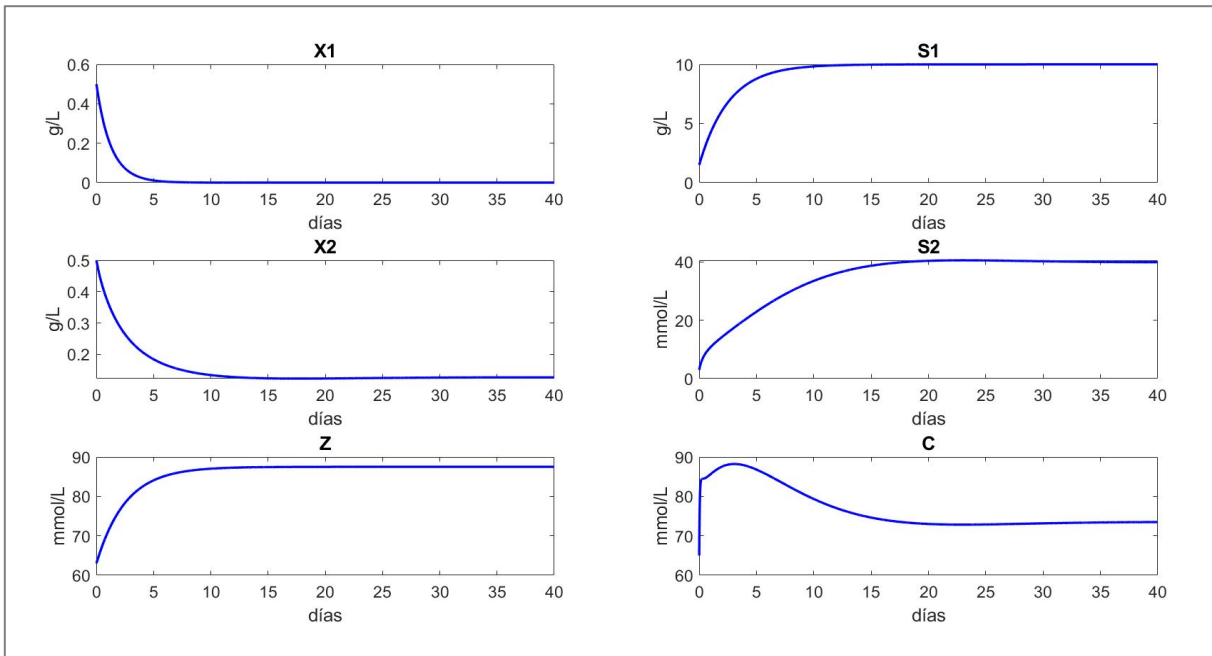


Figura 9. Comportamiento de las variables del modelo AMOCO para la DA con ensilaje de maíz

Los microorganismos X1 y X2 junto a los sustratos S1 y S2 evidencian en su comportamiento una representación del modelo depredador-presa [61], puesto que, el decaimiento de las bacterias (depredador) implicará un aumento de los sustratos (presa o alimento). De este modo, las poblaciones bacterianas decrecen exponencialmente hasta que alcanzan su estado permanente, X1 (bacterias acidogénicas) en el día 6 con un valor de 5.364 mg/L, mientras que, X2 (bacterias metanogénicas) en el día 13 con 125.9 mg/L. En consecuencia, los sustratos tienen tendencia de crecimiento en el estado transitorio hasta entrar en la zona de estabilidad, S1 (sustrato orgánico) la alcanza el día 12 con 9.921 g/L, no obstante, S2 (AGVs) tiene una respuesta más lenta con un valor de 40.15 mmol/L en el día 30 de digestión.

Por otra parte, la ecuación diferencial que describe la alcalinidad no está sujeta al comportamiento bacteriano, cantidad de sustrato o a la tendencia que presente el carbono inorgánico lo que provoca que la dinámica no varíe con la aplicación de diferentes sustratos. En relación con el comportamiento que se observa para la variable de carbono inorgánico se puede determinar que tiene una respuesta más lenta y con una concentración menor que el carbono inorgánico analizado previamente, dado que, estabiliza en el día 30 con un valor de 73.129 mmol/L.

Con respecto a la producción de CH₄, CO₂ y el comportamiento del pH, se puede observar en la Figura 10. que la respuesta dinámica del metano en el estado transitorio tiene un pico de producción en el día 1, que alcanza un valor de 30.26 mmol/L*d. Asimismo, el sistema estabiliza aproximadamente en el día 25 con una estimación de 21.7 mmol/L*d. En cuanto al CO₂ también hay un sobreimpulso de producción más acentuado en el día 1, pero de menor valor en comparación con la tasa de CO₂ analizada con la aplicación aguas residuales (Figura 7). Este punto máximo de producción alcanza un valor de 1.12 mmol/L*d, mientras que, la estabilidad se logra en el día 25 con un valor de 0.80 mmol/L*d.

Por otro lado, el nivel de pH se mantiene en la ventana adecuada (6-8 unidades) para un proceso de digestión anaerobia óptimo, contando con un máximo de 6.57 unidades en el estado transitorio en el día 3 y un valor de 6.44 unidades en estado estable para el día 19 de digestión.

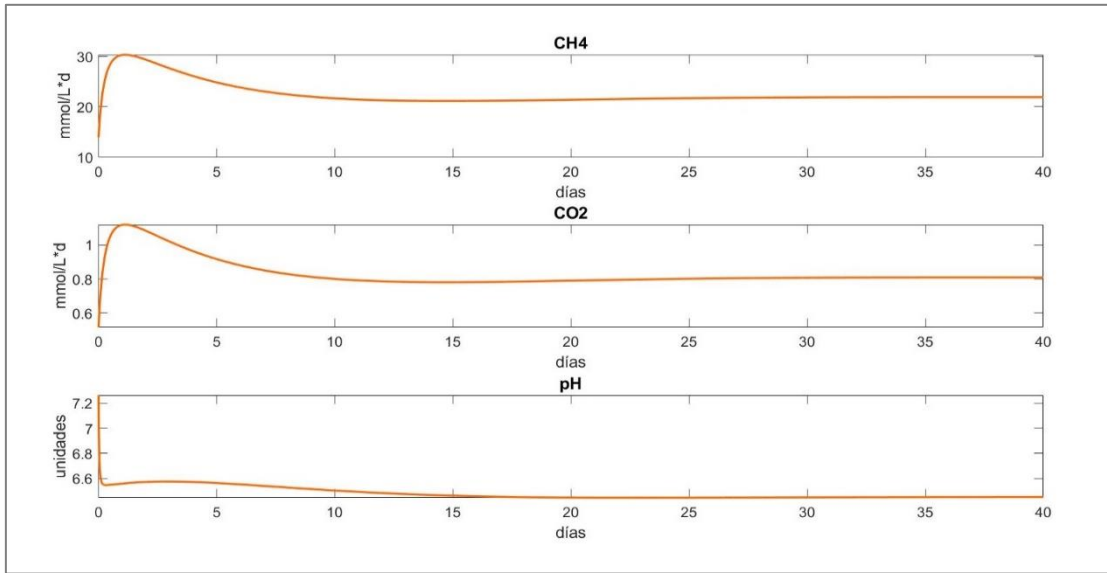


Figura 10. Producción de CH₄, CO₂ y comportamiento del pH en un biodigestor anaeróbico alimentado con ensilaje de maíz

6.3.2.3 Simulación del sistema con vinazas de tequila como sustrato

En la Figura 11. se puede observar el comportamiento de las variables que describen la DA de acuerdo con el modelo AMOCO propuesto por Bernard et al [2], considerando como fuente de sustrato las vinazas de tequila.

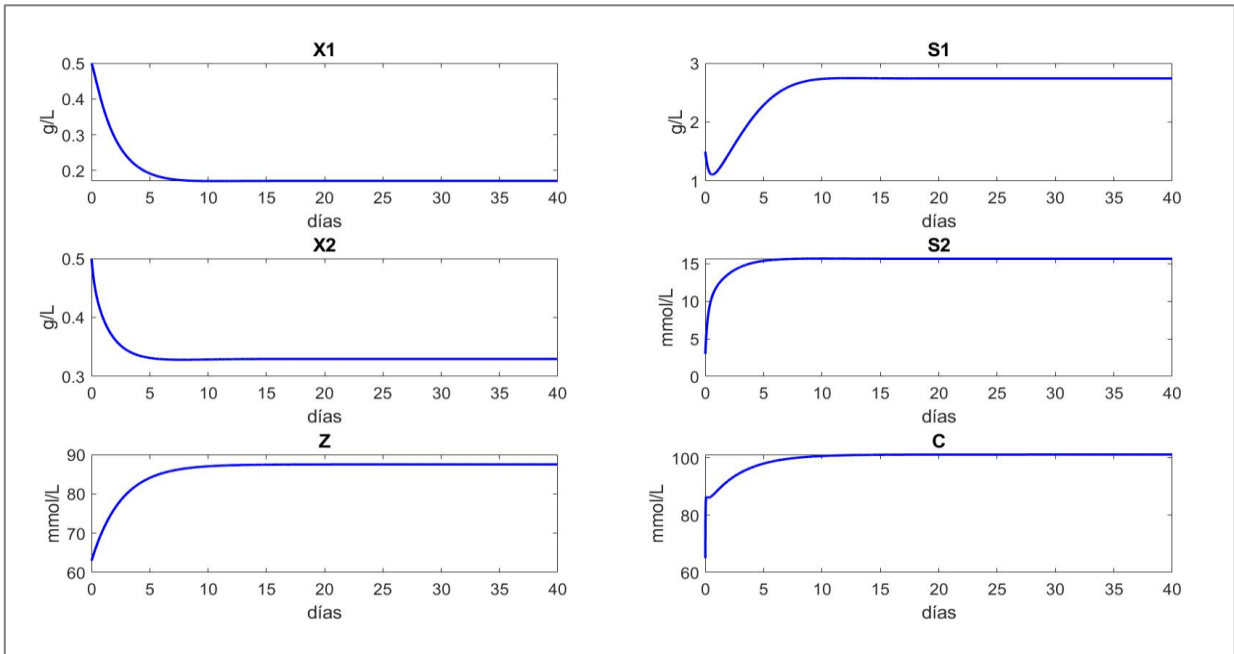


Figura 11. Comportamiento de las variables del modelo AMOCO para la DA con vinazas de tequila

El comportamiento de las poblaciones bacterianas X1-X2 y los sustratos S1-S2 demuestra que un descenso de los microorganismos corresponde con un aumento del sustrato (alimento), puesto que, la alimentación del biorreactor simulado es continua. La respuesta dinámica de X1 y X2 decrece exponencialmente hasta entrar a la región de estabilidad, para X1 se logra en el día 9 con 0.17 g/L, mientras que, X2 lo hace en el día 12 con una concentración de 0.329 g/L. Respecto al sustrato orgánico (S1), en el transitorio se observa una disminución en su concentración sobre el día 1, sin embargo, en los siguientes días la tendencia es creciente y llega a la estabilidad en el día 17 con un valor de 2.74 g/L. Los AGVs (S2) poseen una respuesta típica de un sistema de primer orden que entra en estado permanente en el día 9 con una concentración de 15.68 mmol/L.

Con referencia a la dinámica que presenta la alcalinidad es relevante manifestar que esta variable puede tener una solución de tipo analítico. Por último, la gráfica de carbono inorgánico (C) demuestra que hay una discontinuidad en el estado transitorio, en el día 0 tiene una tendencia creciente, luego, decrece por unos instantes y vuelve a incrementar hasta que alcanza la estabilidad aproximadamente entre el día 17 y 20 de digestión, entre los valores de 101.12 mmol/L y 101.14 mmol/L.

En la Figura 12. se expone el comportamiento de las variables de salida: producción de CH₄, CO₂ y nivel de pH en el proceso de DA.

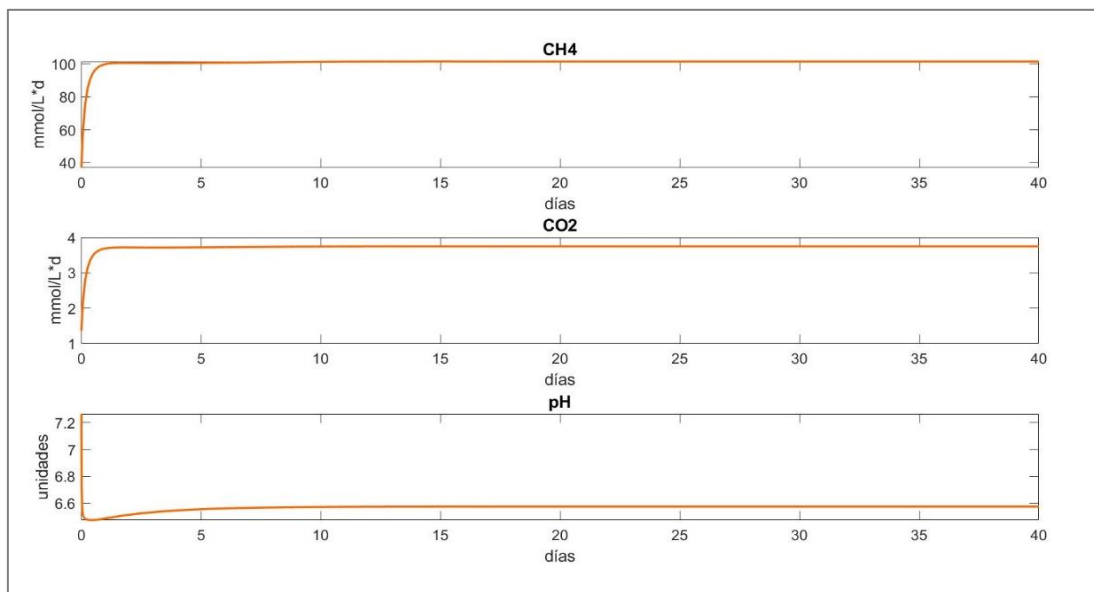


Figura 12. Producción de CH₄, CO₂ y comportamiento del pH en un biodigestor anaeróbico alimentado con vinazas de tequila

La dinámica del metano evidencia una respuesta muy rápida, con una tendencia de crecimiento entre el día 0 y 1, hasta alcanzar el estado estable en el día 2 con una tasa de producción de CH₄ de 100.62 mmol/L*d, sin la presencia de picos de producción. El dióxido de carbono tiene una tendencia similar a la del metano, pero con estabilización aproximadamente en el día 13 con un valor de 3.748 mmol/L*d.

El pH en el día 0 presenta un comportamiento de decaimiento de 7.26 unidades a 6.47 unidades, a continuación, empieza a tener una tendencia de crecimiento hasta estabilizar en el día 15 con un nivel de 6.57 unidades. Cabe destacar que el pH es un parámetro de monitoreo que puede llegar a indicar irregularidades en el proceso anaeróbico si no se encuentra en el rango de operación expuesto anteriormente.

6.3.2.4 Simulación del sistema con ensilaje de pasto como sustrato

La respuesta dinámica de las variables de estado involucradas en la simulación del proceso de DA presentada en la Figura 13. corroboran lo que sucede en la dinámica de referencia (Resultados de la simulación con los parámetros de Bernard et al). Esto significa que, el alimento inicial no es suficiente para las bacterias X1, por lo que, su población decae hasta estabilizarse en el día 18 con una concentración de 0.31 g/L. Sin embargo, se puede observar que la población bacteriana X1 no decae completamente porque hay alimentación continua del sustrato orgánico S1, este, alcanza el estado estable en el día 20 con una concentración de 2 g/L. Por otro lado, las bacterias metanogénicas X2 decaen en mayor proporción, en comparación con X1, que estabiliza alrededor del día 33 con una concentración de 0.12 g/L. En cuanto a S2 (ácidos grasos volátiles), esta variable alcanza la región de estabilidad alrededor del día 38 con un valor de 50 mmol/L, por lo que en su dinámica se manifiesta un comportamiento más lento que S1.

La variable que modela el comportamiento del carbono inorgánico presenta un pico pronunciado de concentración en el estado transitorio del proceso, alcanzando un máximo de 87.12 mmol/L en el día 2. Luego, decae hasta llegar a un mínimo de 58.29 mmol/L alrededor del día 24 y finalmente, estabiliza en 61.16 mmol/L en el día 45 de operación.

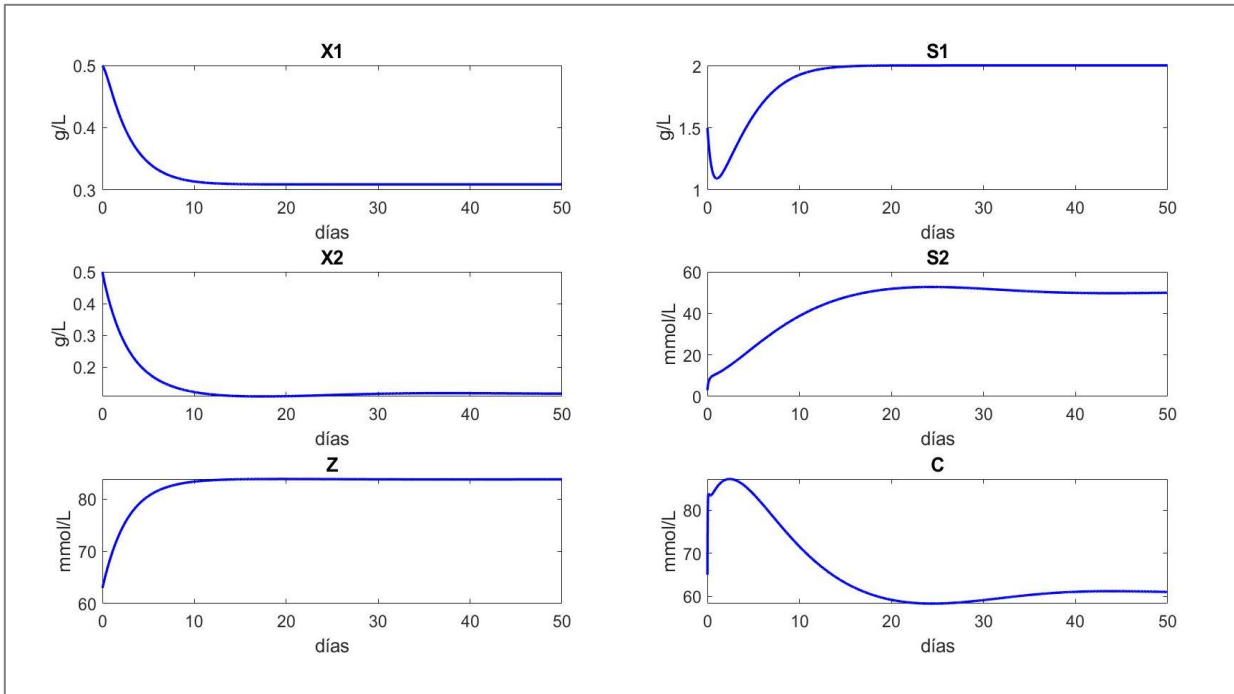


Figura 13. Comportamiento de las variables del modelo AMOCO para la DA con ensilaje de pasto

Es importante tener presente que, para la simulación de la Figura 14, el tiempo de digestión se aumentó a 50 días debido al tiempo de estabilización que presentan las variables de salida. En relación con la respuesta simulada para la producción de metano se puede observar que es más lenta en comparación con las dinámicas analizadas previamente, ya que llega a estado estable en el día 45 con una tasa de producción de 24.42 mmol/L*d. Respecto a la tasa de producción del dióxido de carbono, se puede observar que tiene un comportamiento similar al metano, alcanzado el estado permanente con un valor de 0.9 mmol/L*d alrededor del día 45.

Los picos de producción del CH₄ y el CO₂ pueden ser explicados por el comportamiento que tiene el sistema a nivel matemático, sin embargo, no tienen una alta confiabilidad, debido a que, en un proceso experimental, la producción en los primeros días sería muy baja o podría llegar a ser nula. En relación con el nivel de pH, se puede evidenciar que en el día 0 desciende de 7.26 unidades a 6.5 unidades, luego, empieza a decrecer hasta alcanzar la zona de estabilidad, con un valor de 6.25 unidades en el día 30, con esta tendencia se puede determinar que el pH se conserva en el rango adecuado para una digestión anaeróbica óptima.

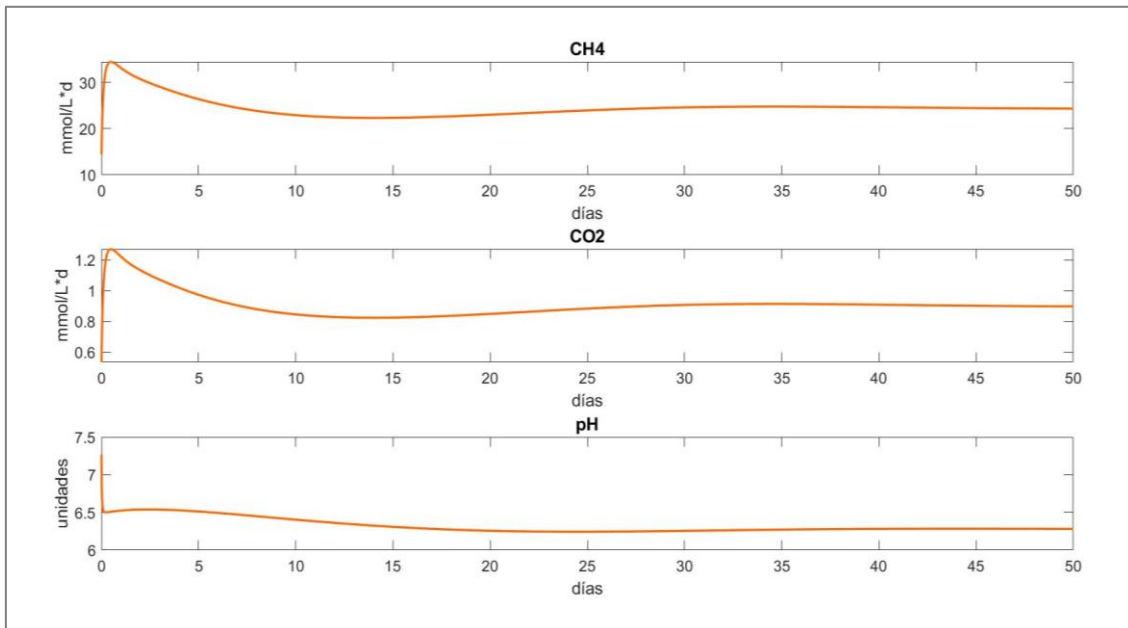


Figura 14. Producción de CH₄, CO₂ y comportamiento del pH en un biodigestor anaeróbico alimentado con ensilaje de pasto

7. Capítulo 7. Diseño de experimento en reactores batch para el proceso de DA

A partir de la revisión de la literatura y luego del análisis del comportamiento de las variables de estado en el modelo matemático, se evidenció que en la implementación de un biodigestor anaeróbico existen muchos factores a tratar, como la temperatura, el pH, la velocidad de mezcla del sustrato, entre otros. Por lo tanto, en el siguiente capítulo se expone el diseño experimental para los reactores tipo Batch, se detalla la configuración seleccionada para el montaje final, los equipos e implementos utilizados, y los sensores propuestos para la medición de variables en un biodigestor continuo. Lo anterior, con el propósito de establecer los parámetros de evaluación y determinar la mejor relación de variables (bioquímicas, biológicas y fisicoquímicas) para el proceso de DA. Los resultados que se obtendrán del procedimiento experimental son insumos para el modelamiento de la dinámica del sistema, ajuste de las constantes estequiométricas del modelo AMOCO en función del sustrato utilizado (RSO) y posterior diseño del prototipo industrial del biorreactor en la plaza de mercado de la ciudad de Fusagasugá, Cundinamarca.

7.1 Desarrollo experimental

7.1.1 Diseño experimental

Se requiere un sistema que permita regular la temperatura y velocidad de agitación del S/I, además, con el fin de garantizar el crecimiento de las bacterias y la producción de biogás es necesario limitar la exposición a la luz [20]. Con base en lo anterior, se establecen dos factores iniciales: relación sustrato/inóculo y temperatura. La velocidad de agitación debe mantenerse constante. y es necesario que el montaje experimental cuente con un sistema de extracción de líquido y gas con válvulas de seguridad para evitar fugas e ingreso de oxígeno al biorreactor. Adicionalmente se debe medir la temperatura, con el propósito de verificar que el proceso se lleve a cabo con el valor de temperatura deseado. En la Figura 15. se observa el esquema propuesto para el experimento.

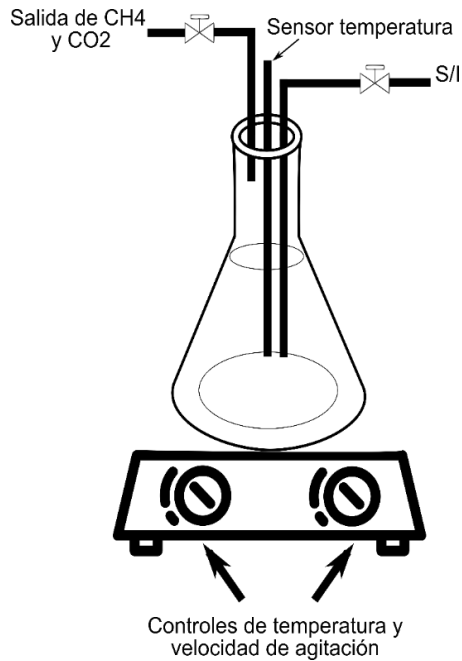


Figura 15. Esquema de experimento

Para la extracción de líquidos y gas se empleará tubo de cobre de 3 mm de diámetro, que debe ser recubierto de pintura anticorrosiva a fin de evitar la afectación del material metálico debido al cambio de nivel de pH del sustrato en las diferentes fases del experimento. Este tubo tendrá una longitud de 22 cm, lo cual garantiza que estará sumergido en el S/l. Los tubos metálicos se incrustarán a presión en un tapón de caucho No. 9 como se observa en la Figura 16., estos tapones sellarán la entrada del erlenmeyer, y se adicionará pegamento con base de silicona en las uniones para evitar fugas.



Figura 16. Ductos metálicos ubicados en tapón de caucho

Con la finalidad de extraer biogás y determinar el potencial bioquímico de metano (PBM) se propone el montaje que se observa en la Figura 17. Esta configuración corresponde a un método volumétrico que se selecciona debido a su bajo costo, su facilidad de implementación en el laboratorio y nula necesidad de mantenimiento. El sistema requiere monitoreo constante y agitación permanente del S/l para facilitar la evacuación del metano [5].

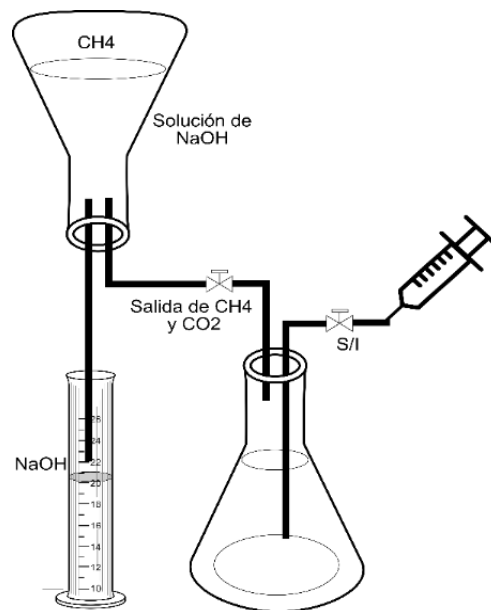


Figura 17. Método volumétrico para determinar el potencial bioquímico de metano

7.1.2 Selección de instrumentos de medida

7.1.2.1 Medición de temperatura:

Para la temperatura se selecciona un termistor NTC de 10 k Ω con cubrimiento de acero inoxidable y doble sellamiento como se observa en la Figura 18., debido a que tiene un encapsulado que permite su funcionamiento en ambientes corrosivos, la longitud del cableado facilita la extracción de las terminales para la alimentación del instrumento y registro de medidas de forma externa, sus dimensiones físicas se ajustan al tamaño de reactor y son de bajo costo. No es viable el uso de un sensor de temperatura LM35 debido a que no tiene un sistema de protección para el medio dentro del reactor, asimismo, el sensor PT-100, tampoco es factible considerando que tiene un alto costo y su tamaño no es indicado para el proceso experimental en reactores batch. El sensor seleccionado se introducirá en la mezcla sustrato inóculo de cada biodigestor, sus terminales de alimentación y medida se llevarán al exterior del biodigestor a través de una tercera perforación en el tapón de caucho. Para visualizar la temperatura se utilizará un único módulo en el cual se conectará el termistor del

biodigestor que se desee monitorear. Para este propósito se empleará una tarjeta de desarrollo Tiva C TM4C123G LaunchPad de Texas Instruments [62] o un módulo comercial para medida de temperatura con termistor.



Figura 18. Termistor NTC 10 kΩ a utilizar en el experimento

7.1.2.2 Medición de pH:

Para la medición del pH se selecciona un sensor de pH analógico con electrodo industrial de la marca DFROBOT como se observa en la Figura 19. Dicho sensor cuenta con un módulo que se puede conectar a una entrada analógica de la placa Arduino con la finalidad de iniciar y visualizar la lectura del pH, su rango de medición es entre 0 y 14 unidades, el voltaje de salida es en milivoltios con comportamiento lineal y la temperatura de medición entre 0 y 60°C [63]. Este electrodo se introduce en una muestra de la mezcla sustrato/inóculo de cada biodigestor. Para visualizar el valor correspondiente de pH se empleará el módulo para electrodo de pH V1.0 [63] y una tarjeta de desarrollo Tiva C de Texas Instruments [62] o un módulo comercial.



Figura 19. Sensor de pH analógico con electrodo industrial

7.1.3 Implementación

Como una alternativa para regular la temperatura y velocidad de agitación se seleccionó la plancha térmica SH – 2. Sobre la plancha térmica se ubica el biodigestor que consiste en un erlenmeyer de 1 litro de capacidad recubierto externamente con pintura epóxica negra. En el exterior se cuenta con conexiones de válvulas hidráulicas tipo catéter que evitan las fugas, la unión entre los tubos metálicos y la manguera tipo catéter se sujetará con abrazaderas metálicas de 6 mm de diámetro (5/16”). El biodigestor tipo batch implementado en su totalidad se muestra en la Figura 20.



Figura 20. Sistema implementado para medición de biogás

Para la realización de este experimento se tomarán las relaciones sustrato/inóculo 1:3 y 1:4 [50], con dos diferentes tipos de sustrato: rumen de vaca y lodo activo, cada biodigestor contendrá 300 ml de S/l. Las temperaturas de operación seleccionadas son 37 °C y 55 °C. En la Tabla 9. se muestran las condiciones del experimento.

Tabla 9. Condiciones experimentales propuestas

Inóculo	Relación S/l	Temperatura (°C)
Rumen	1:3	37
		55
	1:4	37
		55

Lodo activo	1:3	37
		55
	1:4	37
		55

Por cada caso se implementarán dos biodigestores (iguales condiciones de temperatura y relación S/I) con el fin de garantizar reproducibilidad del experimento. En la Tabla 10. se presentan las cantidades de sustrato e inóculo utilizadas en los 16 biodigestores.

Tabla 10. Cantidades sustrato inóculo utilizados en el experimento

Material	Cantidad
Sustrato	1.08 kg.
Rumen	1.86 L.
Lodo activo	1.86 L

Con base en lo anterior, en la Tabla 11. se muestran los equipos e instrumentos que se utilizarán en el montaje de 16 biodigestores tipo batch.

Tabla 11. Elementos para experimento en reactores batch

CANTIDAD REQUERIDA	ELEMENTO
16	Matraz de Erlenmeyer de 1 L
2	Pintura epóxica en aerosol por 900 ml
1	Cinta de enmascarar 2 cm de ancho
16	Bolsas contenedoras de solución salina tipo catéter
24 metros	Manguera tipo catéter
4 metros	Manguera industrial para productos químicos
300 ml	Pintura anticorrosiva
8 metros	Tubo de cobre 3 mm de diámetro
1	Balanza electrónica 600 kg
1	Balanza electrónica 200 kg
16	Tapones de caucho No. 9
16	Válvulas hidráulicas tipo catéter
16	Planchas térmicas con agitación magnética
16	Termistores NTC
16	Sensores de pH analógico con electrodo industrial

Previamente a este diseño se realizó un experimento, en el que se tomaron las relaciones sustrato/inóculo 1:2 y 1:3 [50], con tres diferentes tipos de inóculo: rumen de vaca, lodo activo y cultivo de bacterias no patógenas en polvo Septitrim® para 22 reactores tipo batch. Las temperaturas de operación fueron 37 °C y 55 °C. En la Tabla 12. se muestran las condiciones del experimento.

Tabla 12. Relación de experimentos implementados previamente

Inóculo	Relación S/I	Temperatura (°C)
Rumen	1:2	37
		55
	1:3	37
		55
Lodo activo	1:2	37
		55
	1:3	37
		55
Septitrim®	1:2	37
		55
	1:3	37
		55

Por cada caso se desarrollaron dos biorreactores (iguales condiciones de temperatura y relación S/I) con el fin de garantizar reproducibilidad del experimento como se observa en la Figura 21. En la Tabla 13. se presentan las cantidades de sustrato e inóculo utilizadas en los 22 biorreactores.



Figura 21. Biodigestores tipo Batch

Tabla 13. Cantidades de sustrato e inóculo utilizados en el experimento

Material	Cantidad
Sustrato	1.08 kg.
Rumen	1.86 L.
Lodo activo	1.86 L

Transcurridos 18 días desde el inicio del experimento, se estimó que se completaron las fases iniciales (Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis) e inició la fase de Metanogénesis. Sin embargo, debido a la emergencia sanitaria que afronta el país, fue necesario suspender el proceso de experimentación. Este experimento permitió descartar el cultivo de bacterias no patógenas en polvo Septitrim® como posible inóculo a utilizar en el proceso DA debido a su nula producción de biogás.

7.2 Sensores propuestos para el prototipo de biorreactor continuo

Con base en los instrumentos de medida presentados en la sección anterior para experimentos en reactores tipo batch, a continuación, se exponen los sensores sugeridos para la implementación de un prototipo de biorreactor industrial en la plaza de mercado de la ciudad de Fusagasugá. Esto, con el propósito de realizar el monitoreo y control de la temperatura, el pH, así como, la concentración y composición del biogás.

7.2.1 Temperatura

La medición de la temperatura para la puesta en marcha de un biorreactor a gran escala se puede realizar con un sensor industrial tipo RTD (Detector de temperatura resistivo), en concreto, un PT-100 de 3 hilos [64]. Este sensor, dispone de un alambre de platino con una resistencia de 100 ohmios a 0°C, su comportamiento indica que a medida que aumenta la temperatura, la resistencia eléctrica lo hará de la misma forma [64]. Como se evidencia en la Figura 22. , este dispositivo posee un encapsulado que permite su implementación en ambientes húmedos, un cabezal y conexión de tipo roscada que favorecen su instalación [3][65]. Su temperatura máxima de operación es 260°C [66].



Figura 22. Sensor PT-100 de 3 hilos. Tomado de: [66]

7.2.2 pH

Para cuantificar el pH de forma continua, es decir, determinar el potencial de hidrógeno de la mezcla a lo largo del proceso de digestión, se propone la instalación del transmisor de pH presentado en la Figura 23., referencia HI8614LN con salida de 4 a 20 mA del fabricante Hanna Instruments [67]. Este dispositivo es adecuado para aplicaciones a escala industrial, debido a que es impermeable, el aislamiento galvánico evita que señales distorsionadas lleguen al transmisor, cuenta con una pantalla LCD que permite monitorear el valor del pH y un conector BNC que asegura la conexión con cualquier electrodo que posea esta terminal [67]. En la Tabla 14. se exponen las especificaciones técnicas del instrumento de medida.



Figura 23. Transmisor de pH HI8614LN. Fuente: [67]

Tabla 14. Especificaciones técnicas del transmisor de pH. Fuente: [67]

Especificación	Valor
Rango	0-14 unidades pH / 4-20 mA
Resolución	0.01 pH / 0.01 mA
Precisión	±0.02 pH / ±0.02 mA
Calibración	Offset: ±2 pH / ±2.2 mA
Impedancia de entrada	10 ¹² Ohm
Salida	4-20 mA aislada
Fuente de alimentación	20-36 VDC
Carga máxima	500 Ohm
Condiciones ambientales	0 a 50°C
Dimensiones	165x170x71 mm
Peso	1 kg

Con relación a la sonda industrial que irá acoplada al transmisor de pH descrito anteriormente, se sugiere adquirir el electrodo de pH para flujo continuo de 3 metros, referencia HI 1002/3 de Hanna Instruments [68]. Este instrumento de medición puede emplearse en mezclas que contengan compuestos orgánicos y presencia de metales pesados ya que cuenta con revestimiento de protección PEI, el rango de temperatura funcional es de 5 a 80°C y posee terminal para BNC [68]. En la Figura 24. se presenta el electrodo descrito previamente.



Figura 24. Electrodo de pH para flujo continuo. Fuente:[68]

7.2.3 Composición y concentración del biogás

Pese a que la cuantificación de metano en biorreactores batch se realizó con la implementación del método volumétrico, en la ejecución de un prototipo de reactor con alimentación continua se establece la necesidad de determinar la composición y concentración del biogás. Por ello, se propone la adquisición del sensor de gas infrarrojo IR15 de SGX Sensortech, en concreto, el modelo IR15TT-R empleado específicamente en el análisis de biogás; este instrumento utiliza el principio NDIR (Infrarrojo No Dispersivo) que permite el reconocimiento del tipo de gas y su

concentración [69]. En la Figura 25. se presenta el sensor sugerido previamente y en la Tabla 15. sus especificaciones técnicas.



Figura 25. Sensor de gas IR15TT-R. Fuente: [69]

Tabla 15. Especificaciones técnicas del sensor de gas. Fuente:[69]

Especificación	Valor
Temperatura de operación	Mín.: -20°C / Máx.: +55°C
Régimen de corriente	60mA
Voltaje de alimentación	Mín.: 3V / Máx.:5V
Rango de presión operativa	30kPa a 130kPa

8. Capítulo 8. Plan de trabajo y Análisis de resultados

En el siguiente capítulo se expone el plan de trabajo efectuado y el análisis de resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto, esto, con base en las actividades aprobadas por el comité de trabajos de grado mediante el acta No. 008 del 2020-10-13.

8.1 Plan de trabajo

El plan de trabajo desarrollado se enfocó en el cumplimiento de los objetivos específicos y las actividades propuestas para cada uno de ellos. Para este fin, se partió de la identificación de los factores predominantes en el proceso de digestión anaeróbica, luego, se estableció una metodología que integró el modelo matemático AMOCO con parámetros ajustados experimentalmente a fin de dimensionar la producción de CH₄. Finalmente, se diseñó un experimento en reactores tipo batch con el propósito de establecer los parámetros de evaluación para el proceso de DA. En la Tabla 16. se presenta el cronograma de actividades aplicado.

8.1.1 Objetivo específico No.1

- A) Recopilación bibliográfica de los modelos dinámicos que describen el proceso de digestión anaeróbica.
- B) Recopilación bibliográfica de los rangos de temperatura, pH y agitación empleados en la DA.
- C) Recopilación bibliográfica de experimentos en biodigestores anaeróbicos.

8.1.2 Objetivo específico No.2

- A) Simulación del modelo dinámico AMOCO con la aplicación del método de solución numérica Runge-Kutta de Butcher.
 - **A-1:** Desarrollo matemático del modelo AMOCO, con la implementación del método de solución numérica Runge-Kutta de Butcher.

- **A-2:** Elaboración de la simulación del modelo dinámico AMOCO en el entorno de programación MATLAB.
- **A-3:** Selección de datos experimentales con la utilización de diferentes sustratos en el proceso de DA.
- **A-4:** Simulación del proceso dinámico de digestión anaeróbica con base en los datos experimentales de diferentes fuentes de materia orgánica.
- **A-5:** Análisis y comparación de las variables del modelo matemático simuladas en cuanto a producción de CH_4 , CO_2 , comportamiento del pH y tendencias de las poblaciones bacterianas y los sustratos involucrados.
- **A-6:** Determinación de la simulación que más se ajusta a las condiciones experimentales propuestas para la implementación del reactor continuo en la plaza de mercado del municipio de Fusagasugá.

8.1.3 Objetivo específico No.3

- A)** Diseño del experimento para biorreactores batch donde se tengan en cuenta los parámetros de importancia para el proceso de digestión anaeróbica.
- B)** Recopilación bibliográfica de sensores a utilizar en reactores por lotes y continuos.

8.2 Análisis de resultados

8.2.1 Análisis de resultados de objetivo específico No.1

Se realiza la identificación de los factores predominantes en la digestión anaeróbica, su importancia radica en que influyen en el comportamiento dinámico del sistema y en el desarrollo experimental. Con base en este procedimiento, se establece que es necesaria la caracterización fisicoquímica del sustrato, previo a iniciar la digestión, considerando que este proceso aporta a la comprensión de las tendencias que se puedan presentar en la producción de biogás. De igual forma, es significativo para la población de microorganismos (inóculo) ya que es su fuente de alimento, por ello, en función del biogás producido, es conveniente emplear una menor cantidad de sustrato en contraste con la cantidad de inóculo que se agrega a la mezcla.

Por otro lado, de acuerdo con los autores consultados, la temperatura empleada para un proceso óptimo de digestión anaeróbica debe situarse en el rango mesofílico o termofílico, específicamente, en su valor ajustado, 37° o 55° C, respectivamente. De acuerdo con lo anterior, se debe seleccionar el tiempo de retención de la mezcla en el biodigestor, considerando que, la relación es inversamente proporcional, es decir, a mayor temperatura, menor es el tiempo de retención. Asimismo, el rango del pH debe estar entre 6 y 8 unidades durante el proceso experimental y en la respuesta del modelado matemático, esto, con el fin de garantizar un ambiente estable para las bacterias y un proceso de DA eficiente. Sin embargo, la alcalinidad, en comparación con el pH, puede establecer de forma más precisa si se presentan procesos de inestabilidad, dado que, una variación pequeña de pH se ve representada en un alto consumo de alcalinidad.

Algunos factores que pueden generar procesos de inhibición en la DA son los AGVs, debido a que la acumulación de estos conlleva a que las bacterias acetogénicas y metanogénicas no los puedan consumir en su totalidad y en consecuencia dificulten la digestión. En relación con el amoníaco, se determina que los microorganismos que presentan inhibición en su crecimiento por alta concentración de este gas corresponden a los metanógenos.

8.2.2 Análisis de resultados de objetivo específico No.2

Con el propósito de evaluar la producción de metano en un biodigestor anaeróbico continuo sujeto a la implementación de una simulación, se parte de la resolución del

modelo matemático AMOCO, por medio del método de solución numérica Runge-Kutta de orden 5 de Butcher. A continuación, con base en una revisión bibliográfica a nivel matemático y experimental, se seleccionan cuatro tablas de parámetros de estimación y coeficientes de rendimiento del modelo ajustados a un bioproceso de DA con aguas residuales, ensilaje de maíz, vinazas de tequila y ensilaje de pasto. Estos procedimientos se realizan a fin de obtener las bases para el desarrollo de un algoritmo de programación en el software MATLAB.

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 [61]. 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 [61]. Adicionalmente, se determina que la simulación con la aplicación de ensilaje de maíz 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.

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 [70] 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.

Como se expone en el desarrollo de la subsección 6.3.2, la alcalinidad 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 [10]. Adicionalmente, no cumple con el valor de alcalinidad por debajo de 60 mmol/L sugerido en el artículo de Alcaraz González et al [70], dado que, alcanza el estado permanente en el día 15 con un valor de 87.43 mmol/L.

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 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.

8.2.3 Análisis de resultados de objetivo específico No.3

En relación con el desarrollo de este objetivo, se diseñó un experimento para reactores tipo batch con la finalidad de determinar la mejor relación S/I y la identificación del tipo de inóculo óptimo para el proceso de DA. Adicionalmente, se busca evaluar el comportamiento de variables como la temperatura, el pH, la agitación de la mezcla y la producción de biogás. Para ello, se propone la puesta en marcha de 8 reactores y el duplicado de ellos, a fin de garantizar la reproducibilidad del experimento. Para la puesta en marcha del proceso experimental se sugiere la utilización de matraces Erlenmeyer y se recomienda el cubrimiento de estas con pintura negra, esto, con el objetivo de limitar la exposición a la luz y evitar procesos de inhibición bacteriana que puedan afectar la digestión. Estos recipientes se ubicarán sobre una plancha térmica que permita regular la temperatura y controlar la agitación de la mezcla.

Los tapones de caucho, ubicados en los matraces, deben contar con tres orificios para: la extracción del biogás, posicionar el termistor para la medición de temperatura y un conducto con el propósito de extraer mezcla del reactor para la medición del pH. De acuerdo con las alternativas de medición volumétrica, manométrica y por cromatografía para la determinación del potencial bioquímico de metano (PBM), se propone la implementación del método volumétrico. Esto, debido a las ventajas en cuanto a bajos costos para la puesta en marcha y capacidad para realizar el proceso sin mantenimiento constante, sin embargo, debe realizarse un monitoreo constante del volumen de gas desplazado.

Con respecto a las relaciones sustrato/inóculo 1:3 y 1:2, estas se consideran beneficiosas para el sistema porque se ajustan a lo que reportan algunos autores, acerca de una menor cantidad de sustrato en contraste con la cantidad de inóculo empleado con el propósito de obtener una mayor producción de biogás. Por otro lado, se proponen los rangos óptimos de temperatura para la DA: mesofílico y termofílico.

Finalmente, haciendo énfasis en la fase inicial de prueba del experimento, se determina que los biorreactores con una relación sustrato/inóculo 1:3 tienen mejor tasa de dilución de acuerdo con la capacidad de los agitadores magnéticos. Igualmente, se sugiere sellar los biorreactores completamente para disminuir el grado de incertidumbre del experimento.

Adicional, al cumplimiento de objetivos y actividades relacionados anteriormente, se postuló a revisión el artículo "*A numerical solution to determine the production of methane and carbon dioxide in the anaerobic digestion process*" en la revista "*Simulation Modelling Practice and Theory*" disponible en la base de datos ScienceDirect.

9. Presupuesto

El proyecto denominado “Prototipo de sistema de generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos orgánicos de la plaza de mercado del municipio de Fusagasugá” se encuentra financiado por Minciencias (antes Colciencias) con fondos de regalías del departamento de Cundinamarca. En la Tabla 17. se exhibe el presupuesto establecido para cada rubro. Por otro lado, en la Tabla 18. se presenta el valor estimado para la elaboración del proyecto de grado evidenciado en este documento.

Tabla 17. Presupuesto del proyecto financiado por Minciencias

Rubro	Presupuesto Destinado	Presupuesto invertido
Materiales e insumos	\$ 29.250.000	\$772.200
Personal científico	\$ 161.717.094	\$40.549.273
Servicios técnicos	\$ 41.000.000	\$120.000
TOTAL	\$289.017.670	\$41.441.473

Tabla 18. Presupuesto estimado para el proyecto de grado presentado

Concepto	Descripción	Valor unitario	Cantidad	Valor total
Horas laboradas	Cantidad de horas laboradas	\$20.000	132	\$2.640.000
Computador	Recurso propio	-----	----	----
Servicio de internet	Recurso propio	----	----	----
TOTAL				\$2.640.000

10. Conclusiones

10.1 Conclusiones objetivo específico No.1

- A partir de la revisión bibliográfica se determina que los factores predominantes en el proceso de digestión anaeróbica son: sustrato, inóculo, temperatura, pH, alcalinidad, AGVs, amoníaco, relación C/N y el tiempo de retención.
- Con base en los hallazgos reportados por diferentes autores, se puede establecer que los modelos matemáticos de digestión anaeróbica predicen un comportamiento preciso de la producción de biogás en un biorreactor continuo o por lotes.
- A partir de las condiciones experimentales reportadas en el Capítulo 5., se establece que los rangos de temperatura propuestos son mesofílico y termofílico.
- De acuerdo con el desarrollo del Capítulo 5., en el proceso de digestión anaeróbica, la temperatura es uno de los parámetros de mayor importancia dado que guarda relación con el tiempo de retención de la materia orgánica y puede aumentar la producción de biogás o inhibir la actividad de los microorganismos.
- Basados en los hallazgos teóricos del Capítulo 5., se puede establecer que, aunque el pH no es un indicador temprano de la inestabilidad en la DA, debe mantenerse en el rango óptimo para la actividad microbiana (6 – 8 unidades). Lo anterior, tanto en la respuesta del modelo dinámico como en el proceso experimental.

10.2 Conclusiones objetivo específico No.2

- Con base en la solución numérica de AMOCO, selección de parámetros del modelo, simulación y respuesta dinámica del sistema presentados en el Capítulo 6., se logra dimensionar la producción de biogás (CH₄ y CO₂) con la aplicación de diferentes tipos de sustrato como: aguas residuales obtenidas de una destilería de vino, ensilaje de maíz, vinazas de tequila y ensilaje de pasto.
- A partir de los resultados presentados en la subsección 6.3.2, 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.

- Basados en la respuesta dinámica presentada en el Capítulo 6. se evidencia que el modelo AMOCO, descrito en dos pasos (acidogénesis y metanogénesis) puede llegar a predecir correctamente la producción de CH₄ mediante la resolución de ecuaciones diferenciales de pocas variables de estado en comparación con el modelo ADM1.
- La dinámica de la simulación presentada en la subsección 6.3.2 demuestra que no hay respuestas oscilatorias de las ecuaciones diferenciales de primer orden en todo el rango de estudio.
- 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.
- Para asociar el modelo matemático AMOCO a la producción de biogás utilizando residuos sólidos orgánicos como sustrato, se requiere el ajuste de los parámetros cinéticos y coeficientes de rendimiento presentados en el algoritmo con información experimental obtenida de un experimento a escala.
- La simulación de la alcalinidad expuesta en la subsección 6.3.2 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.
- De acuerdo con la Figura 12., la mayor producción de metano se obtiene de la simulación que involucra los parámetros cinéticos obtenidos de un proceso de DA con vinazas de tequila como sustrato orgánico.
- 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.

10.3 Conclusiones objetivo específico No.3

- Tomando como referencia la revisión bibliográfica de sensores para reactores anaeróbicos y el diseño del experimento de digestión anaeróbica en biodigestores tipo batch, se seleccionan los instrumentos de medida apropiados para procedimientos experimentales a pequeña y gran escala.
- Con base en los hallazgos presentados en el Capítulo 7. se establece que el método volumétrico es de fácil implementación para la determinación del PBM.
- Con la puesta en marcha del experimento para biodigestores tipo batch se puede llegar a establecer la relación y comportamiento de las variables bioquímicas, biológicas y fisicoquímicas inmersas en la DA.

- A pesar de que la medición de la producción de CH₄ en reactores batch se puede realizar con la puesta en marcha del método volumétrico, en la implementación de un biodigestor continuo se hace necesaria la selección de un sensor que pueda determinar el porcentaje de CH₄ y CO₂ obtenido en el proceso de DA.

11. Referencias

- [1] M. Machado-Higuera, "Una alternativa numerica en la solución de un sistema que modela la producción de biogás," *Revista Mexicana de Métodos Numéricos*, vol. 2, pp. 1–10, 2018, [Online]. Available: https://www.scipedia.com/public/Machado_2017a.
- [2] O. Bernard *et al.*, "Dynamical Model Development and Parameter Identification for an Anaerobic Wastewater Treatment Process," 2001.
- [3] J. D. Alvarado Moreno, "Diseño de un sistema de control de temperatura y pH, en el proceso de digestión anaeróbica para residuos sólidos orgánicos en un bio-reactor tipo BATCH.," p. 119, 2015.
- [4] C. Alberto and A. Trujillo, "SIMULACIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA COMO UN INSUMO PARA EL DISEÑO DE UN BIODIGESTOR EN LA PLAZA DE MERCADO DE LA CIUDAD DE FUSAGASUGÁ," 2020.
- [5] L. M. Cárdenas, B. A. Parra, P. Torres, and C. H. Vásquez, "Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos Perspectives of Biochemical Methane Potential - BMP test for control the anaerobic digestion process of wastes Perspectives do t," *Rev. ION*, vol. 29, no. 1, pp. 95–108, 2016, doi: 10.18273/revion.v29n1-2016008.
- [6] L. González and Y. Olaya, "Fundamentos para el diseño de biodigestores," 2009.
- [7] V. Savran, M. R. D. Piñón, and J. S. A. Palacios, "Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores Production of biogas and biofertilizers from biodigester effluents," *Pastos y Forrajes*, vol. 35, no. 2, pp. 219–226, 2012.
- [8] D. J. Batstone *et al.*, "The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1).," *Water Sci. Technol.*, vol. 45, no. 10, pp. 65–73, 2002, doi: 10.2166/wst.2002.0292.
- [9] L. Delgadillo Mirquez, M. Machado Higuera, and M. Hernández Sarabia, "Mathematical modelling and simulation for biogas production from organic waste," *Int. J. Eng. Syst. Model. Simul.*, vol. 10, no. 2, p. 97, 2018, doi: 10.1504/ijesms.2018.10013112.
- [10] E. Ficara, S. Hassam, A. Allegrini, A. Leva, F. Malpei, and G. Ferretti, *Anaerobic Digestion Models: a Comparative Study*, vol. 45, no. 2. IFAC, 2012.
- [11] S. Hassam, E. Ficara, A. Leva, and J. Harmand, "A generic and systematic procedure to derive a simplified model from the anaerobic digestion model No. 1 (ADM1)," *Biochem. Eng. J.*, vol. 99, pp. 193–203, 2015, doi: 10.1016/j.bej.2015.03.007.
- [12] O. A. Jacobo, U. E. Jimenez, and A. Vargas, "Modelo matemático para la digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos," *Memorias del Congr. Nac. Control Automático*, pp. 23–25, 2019, [Online]. Available: www.amca.mx.
- [13] K. C. Draa, H. Voos, M. Alma, A. Zemouche, and M. Darouach, "LMI-based H^∞ nonlinear state observer design for anaerobic digestion model," *2017 25th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2017*, pp. 678–683, 2017, doi: 10.1109/MED.2017.7984196.
- [14] K. C. Draa, H. Voos, M. Darouach, and M. Alma, "A Formal Modeling Framework

- for Anaerobic Digestion Systems,” *Proc. - UKSim-AMSS 17th Int. Conf. Comput. Model. Simulation, UKSim 2015*, no. 2, pp. 426–431, 2016, doi: 10.1109/UKSim.2015.68.
- [15] S. Yang and Y. Pan, “A design simplified of anaerobic digestion mathematic model,” *2011 IEEE 3rd Int. Conf. Commun. Softw. Networks, ICCSN 2011*, pp. 442–444, 2011, doi: 10.1109/ICCSN.2011.6014087.
- [16] S. Diop, E. Chorukova, and I. Simeonov, “Modeling and specific growth rates estimation of a two-stage anaerobic digestion process for hydrogen and methane production,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 12641–12646, 2017, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.2232.
- [17] E. Chorukova and I. Simeonov, “Mathematical modeling of the anaerobic digestion in two-stage system with production of hydrogen and methane including three intermediate products,” *Int. J. Hydrogen Energy*, no. xxxx, pp. 1–9, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.228.
- [18] S. U. A. Camberos, K. J. Gurubel, E. N. Sanchez, S. A. Aguirre, and R. G. Perez, “Neuronal Modeling of a Two Stages Anaerobic Digestion Process for Biofuels Production,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 13, pp. 408–413, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.07.313.
- [19] M. Fedailaine, K. Moussi, M. Khitous, S. Abada, M. Saber, and N. Tirichine, “Modeling of the anaerobic digestion of organic waste for biogas production,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 52, no. 1, pp. 730–737, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.05.086.
- [20] G. Bastin and D. Dochain, *On-line estimation and adaptive control of bioreactors*, vol. 243. 1991.
- [21] A. A. Flores Hernández, M. Flores Montiel, J. Reyes Reyes, and C. M. Astorga Zaragoza, “Diseño y modelado de un bioreactor tipo batch y continuo para aplicaciones de control automático,” *Apl. a la Microbiol. Ind.*, vol. 1, no. October 2013, pp. 86–92, 2013.
- [22] L. M. Palmowski and J. A. Müller, “Influence of the size reduction of organic waste on their anaerobic digestion,” *Water Sci. Technol.*, vol. 41, no. 3, pp. 155–162, 2000, doi: 10.2166/wst.2000.0067.
- [23] G. Esposito, L. Frunzo, A. Panico, and F. Pirozzi, “Enhanced bio-methane production from co-digestion of different organic wastes,” *Environ. Technol. (United Kingdom)*, vol. 33, no. 24, pp. 2733–2740, 2012, doi: 10.1080/09593330.2012.676077.
- [24] F. Raposo, M. A. De La Rubia, V. Fernández-Cegrí, and R. Borja, “Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 861–877, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.09.008.
- [25] K. Izumi, Y. ki Okishio, N. Nagao, C. Niwa, S. Yamamoto, and T. Toda, “Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste,” *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 64, no. 7, pp. 601–608, 2010, doi: 10.1016/j.ibiod.2010.06.013.
- [26] C. Holliger *et al.*, “Towards a standardization of biomethane potential tests,” *Water Sci. Technol.*, vol. 74, no. 11, pp. 2515–2522, 2016, doi: 10.2166/wst.2016.336.
- [27] W. S. Lopes, V. D. Leite, and S. Prasad, “Influence of inoculum on performance

- of anaerobic reactors for treating municipal solid waste,” *Bioresour. Technol.*, vol. 94, no. 3, pp. 261–266, 2004, doi: 10.1016/j.biortech.2004.01.006.
- [28] B. A. Parra Orobio, P. Torres Lozada, and L. F. Marmolejo Rebellon, “Producción De Metano a Partir De La Digestión Anaerobia De Biorresiduos De Origen Municipal,” p. 79, 2014.
- [29] V. Urrea, “Determinación del potencial bioquímico de metano de residuos cítricos mediante digestión anaerobia,” 2019.
- [30] J.-S. ZHANG, K. SUN, M. WU, and L. ZHANG, “Influence of temperature on performance of anaerobic digestion of municipal solid waste,” *J. Environ. Sci.*, vol. 18, no. 4, pp. 810–815, 2006, [Online]. Available: http://www.jesc.ac.cn/jesc_en/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20060432&flag=1.
- [31] J. Shin, H. M. Jang, S. G. Shin, and Y. M. Kim, “Thermophilic anaerobic digestion: Effect of start-up strategies on performance and microbial community,” *Sci. Total Environ.*, vol. 687, pp. 87–95, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.428.
- [32] A. Hajji, M. Rhachi, M. Garoum, and N. Laaroussi, “The effects of pH, temperature and agitation on biogas production under mesophilic regime,” *2016 3rd Int. Conf. Renew. Energies Dev. Countries, REDEC 2016*, pp. 1–4, 2016, doi: 10.1109/REDEC.2016.7577510.
- [33] I. Angelidaki *et al.*, “Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays,” *Water Sci. Technol.*, vol. 59, no. 5, pp. 927–934, 2009, doi: 10.2166/wst.2009.040.
- [34] T. Salazar Rojas, N. Vaquerano, and M. Porras, “Cuantificador automático de metano para la estimación del potencial energético de un sustrato celulósico,” 2016.
- [35] G. Lopez, “Metodo no convencional de medición de gases en la digestión anaerobia,” p. 16, 1999.
- [36] L. F. Núñez, “Modelamiento y control de proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos y/o aguas residuales,” *Univ. Piura*, 2017, [Online]. Available: <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/2986>.
- [37] K. López Buriticá, S. Casanova Trujillo, C. Daniel Acosta Medina, and I. Artículo, “Facultad de Ciencias Exactas Y Naturales Análisis del crecimiento microbiano mediante la cinética de Monod y Haldane en un RCTA utilizado para el tratamiento de aguas residuales,” *Rev. NOOS Rev. NOOS Vol. Pág. 12 Rev. NOOS*, vol. 2, no. 2, pp. 11–16, 2013.
- [38] M. Hernández-sarabia, “Mathematical modelling and simulation for biogas production from organic waste Mathematical modelling and simulation for biogas production from organic waste Liliana Delgadillo-Mirquez and Maximiliano Machado-Higuera *,” no. July, 2018, doi: 10.1504/IJESMS.2018.10013112.
- [39] J. A. Arzate *et al.*, “Anaerobic Digestion Model (AM2) for the Description of Biogas Processes at Dynamic Feedstock Loading Rates,” *Chemie-Ingenieur-Technik*, vol. 89, no. 5, pp. 686–695, 2017, doi: 10.1002/cite.201600176.
- [40] M. Machado Higuera, “Modelamiento, simulación y control del proceso biológico de digestión anaerobia para la producción de biogás,” 2010, [Online]. Available: <http://repositorio.unibague.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12313/338/1/Tesis.pdf>
- .

- [41] S. C. Chapra and R. P. Canale, *Métodos numéricos para ingenieros*, 5th ed. 2007.
- [42] "Runge-Kutta Algorithm," *myphysicslab.com*, 2001. <https://www.myphysicslab.com/explain/runge-kutta-en.html>.
- [43] N. Nwokolo, P. Mukumba, K. Oibileke, and M. Enebe, "Waste to energy: A focus on the impact of substrate type in biogas production," *Processes*, vol. 8, no. 10, pp. 1–21, 2020, doi: 10.3390/pr8101224.
- [44] C. M. Gutiérrez and J. D. Moreno, "Los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales desde una visión no convencional," *Ing. Hidráulica Y Ambient.*, vol. XXXIX, no. 3, pp. 97–107, 2018.
- [45] R. Parra-Huertas, "Anaerobic digestión: biotechnological mechanisms in waste water treatments and their application in food industry," *Prod. + Limpia*, vol. 10, no. 2, pp. 142–159, 2015, [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1909-04552015000200014.
- [46] A. Khalid, M. Arshad, M. Anjum, T. Mahmood, and L. Dawson, "The anaerobic digestion of solid organic waste," *Waste Manag.*, vol. 31, no. 8, pp. 1737–1744, 2011, doi: 10.1016/j.wasman.2011.03.021.
- [47] B. Mursec, P. Vindis, M. Janzekovic, M. Brus, and F. Cus, "Analysis of different substrates for processing into biogas Manufacturing and processing," *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, vol. 37, no. 2, pp. 652–659, 2009.
- [48] M. Nakasima-López, P. Taboada-González, Q. Aguilar-Virgen, and N. Velázquez-Limón, "Adaptación de Inóculos Durante el Arranque de la Digestión Anaerobia con Residuos Sólidos Orgánicos," *Inf. Tecnol.*, vol. 28, no. 1, pp. 199–208, 2017, doi: 10.4067/S0718-07642017000100020.
- [49] C. Mateescu and I. Constantinescu, "Comparative analysis of inoculum biomass for biogas potential in the anaerobic digestion," *UPB Sci. Bull. Ser. B Chem. Mater. Sci.*, vol. 73, no. 3, pp. 99–104, 2011.
- [50] C. Sánchez-Reyes, M. E. Patiño-Iglesias, J. L. Alcántara-Flores, Y. Reyes-Ortega, M. A. Pérez-Cruz, and E. Ortiz-Muñoz, "DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO (PBM) DE RESIDUOS DE FRUTAS Y VERDURAS EN HOGARES," *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 32, no. 2, pp. 191–198, May 2016, doi: 10.20937/RICA.2016.32.02.05.
- [51] M. Alam, O. A. Arika, I. Demir, E. Yuksel, and O. Gunaydin, "Anaerobic Digestions of Dairy Manure – A Review," *Digit. Proceeding ICOCEE – CAPPADOCIA2017*, no. May, pp. 1795–1804, 2017.
- [52] O. A. M. C. Lorenzo Acosta Yaniris, "La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I," *Icidca*, 2005, [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>.
- [53] M. I. G. Sánchez, "Diseño de la Camara de Fermentacion de un Biodigestor Anaerobico, Usando la Energia Solar Termica Como Fuente de Calor Modelado Por Elemento Finito," pp. 1–118, 2017.
- [54] S. K. Pramanik, F. B. Suja, S. M. Zain, and B. K. Pramanik, "The anaerobic digestion process of biogas production from food waste: Prospects and constraints," *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 8, no. August, p. 100310, 2019, doi: 10.1016/j.biteb.2019.100310.

- [55] I. Angelidaki and W. Sanders, "Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants," *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 3, no. 2, pp. 117–129, 2004, doi: 10.1007/s11157-004-2502-3.
- [56] W. Hotz, "La monitorización del digestor anaerobio ayuda a evitar contratiempos en el proceso y a maximizar la producción de biogás."
- [57] Y. Chen, J. J. Cheng, and K. S. Creamer, "Inhibition of anaerobic digestion process: A review," *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 10, pp. 4044–4064, 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.01.057.
- [58] A. Schneider, "Dynamic modeling and simulation of biogas production based on anaerobic digestion of gelatine, sucrose and rapeseed oil," 2016, [Online]. Available: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:579-opus-1005495>.
- [59] J. A. A. Salgado, "Modeling and simulation of biogas production based on anaerobic digestion of energy crops and manure," *Master Thesis*, p. 178, 2019.
- [60] M. Hmissi, J. Harmand, V. Alcaraz-Gonzalez, and H. Shayeb, "Evaluation of alkalinity spatial distribution in an up-flow fixed bed anaerobic digester," *Water Sci. Technol.*, vol. 77, no. 4, pp. 948–959, 2018, doi: 10.2166/wst.2017.612.
- [61] L. Prey-predator, "Modelo Depredador- Presa de Lotka-Volterra," 2017.
- [62] Texas instruments, "Tiva™ C Series TM4C123G LaunchPad Evaluation Board, User's Guide." p. 27, 2013.
- [63] DFROBOT, "SEN0169 Analog pH Meter Pro." https://wiki.dfrobot.com/Analog_pH_Meter_Pro_SKU_SEN0169.
- [64] A. Arenas, A. Dávila, and O. Philco, "Sensores De Temperatura (Industriales)," [Online]. Available: <https://docplayer.es/42573297-Sensores-de-temperatura-industriales.html>.
- [65] I. A. Ruge Ruge, "Prototipo de biorreactor aeróbico para el monitoreo y control del proceso de co-compostaje, a partir de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales y residuos sólidos orgánicos de plaza de mercado," *Prospectiva*, vol. 17, no. 1, pp. 17–24, 2019, doi: 10.15665/rp.v17i1.1673.
- [66] "Termoresistencia PT100 con cabezote rosca VIA Catalogo Español www.viaindustrial.com Termoresistencia PT100 con cabezote rosca VIA Catalogo Español www.viaindustrial.com," p. 100.
- [67] Hanna Instruments, "Ficha Técnica del Producto Transmisor pH con salida de 4-20 mA con aislamiento galvánico." <https://www.hannacolombia.com/productos/producto/hi-8614n-transmisor-ph-con-salida-de-4-20-ma-con-aislamiento-galvanico>.
- [68] Hanna Instruments, "Ficha Técnica del Producto Electrodo de pH para flujo continuo, BNC, 3 m." <https://www.hannacolombia.com/productos/producto/hi-10023-electrodo-de-ph-para-flujo-continuo-bnc-3-m>.
- [69] SGX SENSORTECH, "IR15 Dual Gas Series Datasheet," 2016. <https://co.mouser.com/ProductDetail/Amphenol-SGX-Sensortech/IR15TT-R?qs=Ey4jopcCj2oLcUq66nHFAA%3D%3D>.
- [70] V. Alcaraz-González, F. A. Fregoso-Sanchez, H. O. Mendez-Acosta, and V. Gonzalez-Alvarez, "Robust regulation of alkalinity in highly uncertain continuous anaerobic digestion processes," *Clean - Soil, Air, Water*, vol. 41, no. 12, pp. 1157–1164, 2013, doi: 10.1002/clen.201100736.