

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTRUMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO TIPO BATCH

DESIGN, CONSTRUCTION AND INSTRUMENTATION OF AN ANAEROBIC BIODIGESTER BATCH TYPE

Olvera-López, Christian^a, Silva-Téllez, Neo^a, Pérez-Cadena, Rogelio^{a*}, Hernández-Escalante, Mariana^a, Medina-Moreno, Sergio Alejandro^b, Jiménez-González, Angélica^b
roperez@upmh.edu.mx

^aIngeniería en Energía, Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo, Boulevard Acceso a Tolcayuca No. 1009, Ex Hacienda de San Javier, C.P. 43860, Tolcayuca, Hidalgo, México.

^bDepartamento de Biotecnología, Universidad Politécnica de Pachuca. Ex-Hacienda de Santa Bárbara, Mpio. Zempoala, Hgo., C.P. 43830, Carr. Pachuca Cd. Sahagún Km. 20.

RESUMEN. *Un sistema de digestión anaerobia, de acuerdo con su geometría de diseño puede ser de pequeña escala para autoconsumo o sistemas a gran escala. La elección de un diseño depende de factores económicos además de la disponibilidad de dispositivos tecnológicos con sistemas de calefacción, agitación y sensores que permitan verificar la producción y el aprovechamiento del biogás. En el presente trabajo se realizó el diseño, construcción e instrumentación de un biodigestor anaerobio con geometría estándar tipo batch para la producción de biogás mediante la digestión anaerobia. A partir de un diseño de reactor con geometría estándar en SolidWorks, se construyó un biodigestor en acero inoxidable para garantizar la durabilidad y hermeticidad del sistema. El biodigestor se acondicionó con un sistema de agitación, así como sensores para monitorear parámetros esenciales como la temperatura, pH y gas metano en ppm. Los parámetros de instrumentación se integraron en un sistema de monitoreo y control con Arduino. Para operar el biodigestor al 80% de su capacidad, se preparó una mezcla con 7.9 kg de estiércol de bovino suplementado con 150 g de extracto de levadura y 500 g de glucosa como fuente adicional de carbono, obteniendo una relación C/N de 26.66 kgC/kgN. El sistema de seguimiento y control del biodigestor permitió mantener un mezclado homogéneo a 20 rpm en intervalos de 2 h, además de verificar que el pH se mantuvo constante en 7.1 durante la digestión anaerobia. Con el sensor de gas se dio seguimiento a la producción de biogás a partir de los 15 días desde la carga del biodigestor con una temperatura de reacción de 22°C. Se determinaron hasta 6192 ppm de gas metano lo que representó el 51% v/v del biogás producido, lo que coincidió con combustión de llama azul del biogás producido. El diseño del biodigestor con geometría estándar permitió la biodigestión y el monitoreo y seguimiento de parámetros como temperatura, pH y agitación en ciclos continuos bajo una operación en batch.*

Palabras clave: Biodigestión, geometría estándar, biogás.

ABSTRACT. *An anaerobic digestion system, according to its design geometry, can be small-scale for self-consumption or large-scale systems. The choice of design depends on economic factors and the availability of technological devices with heating, agitation, and sensor systems that allow verification of the production and use of biogas. In this work, the design, construction, and instrumentation of anaerobic biodigester with standard batch geometry for biogas production through anaerobic digestion was carried out. From a reactor design with standard geometry in SolidWorks, a stainless steel biodigester was built to guarantee the durability and tightness of the system. The biodigester was equipped with an agitation system, as well as sensors to monitor essential parameters such as temperature, pH, and methane gas in ppm. The instrumentation parameters were integrated into a monitoring and control system with Arduino. To operate the biodigester at 80% of its capacity, a mixture was prepared with 7.9 kg of bovine manure supplemented with 150 g of yeast extract and 500 g of glucose as an additional carbon source, obtaining a C/N ratio of 26.66 kgC/kgN. The monitoring and control system of the biodigester allowed maintaining a homogeneous mixture at 20 rpm at 2-h intervals, in addition to verifying that the pH remained constant at 7.1 during anaerobic digestion. The gas sensor was used to monitor biogas production 15 days after loading the biodigester with a reaction temperature of 22°C. Up to 6192 ppm of methane gas was determined, which represented 51% v/v of the biogas produced, which coincided with blue flame combustion of the biogas produced. The design of the biodigester with standard geometry allowed biodigestion and monitoring and tracking of parameters such as temperature, pH, and agitation in continuous cycles under a batch operation.*

Key words: Biodigestion, standard geometry, biogas.

INTRODUCCIÓN

La búsqueda de alternativas energéticas sostenibles es más relevante que nunca, dado que la escasez de recursos se vuelve más evidente y los precios de los combustibles convencionales se elevan¹. En México la tecnología para la generación de energía no es

sustentable debido a que se emiten gases de efecto invernadero como dióxido de carbono y gas metano, los cuales contribuyen significativamente al calentamiento global². Para atender esta situación, es necesaria una transición energética que garantice cumplir con los objetivos nacionales establecidos en

el programa sectorial de energía y reducir estos gases contaminantes ³. Por tanto, es necesario la implementación de tecnologías que permitan el aprovechamiento energético. Una de estas tecnologías es el uso de biodigestores para producir biogás a través de la fermentación anaerobia de la biomasa ⁴. El uso de estos dispositivos favorece la reducción de Gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera y aprovechan los residuos biodegradables agrícolas para obtener biogás ⁵.

La literatura ha abordado diversas metodologías para el diseño, operación y construcción de biodigestores anaeróbicos, donde se destacan la importancia de la inoculación con microorganismos específicos y la gestión de cargas orgánicas. Además, estudios recientes han explorado la implementación de automatización y control en estas tecnologías permitiendo una respuesta rápida ante posibles variaciones en las condiciones operativas ⁶⁻⁸.

El biogás es el resultado de la digestión anaerobia a partir de materia orgánica como estiércol o residuos orgánicos ⁹. Representa una mezcla de diferentes compuestos de los cuales destacan el Metano (CH₄), Dióxido de Carbono (CO₂) y Agua (H₂O) ¹⁰. La composición teórica del biogás es de hasta 71%:29% CH₄:CO₂ ¹¹.

En el proceso de digestión anaerobia actúan microorganismos que fermentan y degradan el sustrato por medio de 4 fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis ⁴. La producción eficiente de biogás en un biodigestor depende en gran medida de las condiciones controlables dentro del sistema, como la temperatura. Debido a que existen tres grupos principales de microorganismos, clasificados en función del rango de temperatura en el que operan: los psicrófilos, mesófilos y termófilos ¹²⁻¹⁴. Adicionalmente se requieren de condiciones específicas controlables como; el potencial de hidrógeno (pH), agitación, tiempo de residencia y sobre todo garantizar que exista un ambiente libre de oxígeno ¹⁵.

El biogás como recurso energético, tiene diferentes usos, siendo uno de los más comunes su aprovechamiento para la generación de electricidad y calor ⁹. Además, puede ser utilizado como

combustible para vehículos, sin embargo; es necesario una concentración de metano de al menos 90% ¹⁶.

Por otro lado, el digestato obtenido de la digestión anaerobia sirve como un abono orgánico para el suelo ¹⁷ debido a que es rico en minerales como Zinc (Zn), Calcio (Ca), Sodio (Na), Nitrógeno (N), Potasio (K) y Fósforo (P) ^{9,18}.

Para la construcción e implementación de un biodigestor anaerobio, es necesario considerar el contenido de humedad; existiendo digestores sólidos, semisólidos o líquidos ¹⁹, o bien por el tipo de régimen operativo en el que se desempeñan, batch o en continuo ²⁰. Adicionalmente existen diferentes configuraciones de estos dispositivos, desde pequeña a gran escala ²¹⁻²³.

Los biodigestores; al instrumentarlos ofrecen un beneficio adicional que asegura su funcionamiento eficiente, dentro de los principales parámetros a monitorear son la temperatura, pH, composición del sustrato y producción de biogás ¹⁵. Para realizar el monitoreo, es común que se considere el uso de instrumentos tales como termómetros, pH-metros, sensores de presión y analizadores de gases ²⁴.

A partir del monitoreo y control de estos parámetros, se garantizan las condiciones óptimas para la digestión anaeróbica, maximizando su eficiencia y contribuyendo a la sostenibilidad ambiental ya que contribuye a una economía circular, puesto se transforman los residuos en energía.

En el presente trabajo se realizó el diseño, construcción e instrumentación de un biodigestor anaerobio con geometría estándar tipo batch para la producción de biogás mediante la digestión anaerobia.

METODOLOGÍA

Diseño de biodigestor

A partir de un volumen nominal de 38 L se determinaron los parámetros constructivos del biodigestor, considerando el volumen de la cúpula en un 20% respecto al volumen nominal propuesto (25).

Para el diseño del biodigestor se consideró el uso de una geometría estándar con un impulsor, tipo turbina. La determinación de las dimensiones geométricas del biodigestor se basó en los datos reportados por Doran, (2012)²⁶. Se ajustó la relación $H/D_t=2$ donde: D_t es el diámetro del tanque, D_a diámetro de las palas, H altura del fluido, J ancho y cantidad de placas deflectoras, C distancia desde el fondo del estanque hasta el impulsor (Tabla 1).

Tabla 1. Proporciones geométricas para un sistema de agitación²⁶.

Tipo de agitador	Relaciones geométricas			
Impulsor	$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3}$,	$\frac{H}{D_t} = 2$,	$\frac{C}{D_t} = \frac{1}{3}$,	$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$
turbina	$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$,	$\frac{D_d}{D_a} = \frac{2}{3}$,	$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$,	

A partir de los datos de geometría estándar, se realizó un boceto isométrico y modelos tridimensionales, de los componentes del biodigestor en SolidWorks. Posteriormente se realizó el ensamblaje de las piezas y se definieron las relaciones de posición de las piezas para asegurar su correcta alineación.

Construcción e instrumentación

Para garantizar el funcionamiento del biodigestor, este se construyó a partir de láminas de acero inoxidable para limitar la corrosión. Adicionalmente se incluyeron válvulas de carga y descarga, además de una válvula de salida para la obtención de biogás, y un manómetro analógico para medir la presión interna del biodigestor. Para el monitoreo del proceso de digestión anaerobia se implementó un sensor digital de temperatura y humedad (DHT11) con pantalla digital, un sensor de pH conectado a una placa Arduino UNO, permitiendo la conversión de la señal analógica a digital y se integró un sensor de gas Metano (MQ4), para la detección de gases inflamables como el metano.

El biodigestor fue acoplado a un motor de corriente directa (DC), con una fuente de alimentación conmutada de 12V y 3A, para mantener una agitación constante de 20 rpm. La agitación durante la biodigestión se llevó a cabo en un ciclo continuo de encendido y apagado con intervalos de 2 h, para

asegurar una mezcla homogénea en el interior del biodigestor.

Programación de componentes electrónicos

Para la operación del biodigestor se desarrolló el código de programación de los sensores de pH, gas, y agitación. Se implementó un Arduino en un entorno de desarrollo integrado (IDE), distribuyendo las tareas de control entre el Arduino UNO y el Arduino Nano, con comunicación mediante el protocolo I2C. El primer bloque del código se centró en la lectura de los sensores conectados al Arduino UNO. Se programó el sensor de pH para realizar lecturas periódicas, convirtiendo la señal analógica a valores indicativos del nivel de acidez o alcalinidad en el sistema. Adicionalmente, se implementó el código para el sensor MQ4, que permitió medir la concentración de metano a intervalos regulares de tiempo. Se estableció como límite normal de detección a 6000 ppm de gas.

Operación del biodigestor en batch

A partir de un volumen de operación de 30 L, se preparó el sustrato de alimentación. Se mezcló 7.9 kg de estiércol fresco de bovino con 150 g de extracto de levadura y 500 g de glucosa, ajustando la relación C/N de 26.6 kgC/kgN con una concentración de sólidos totales (ST) de 12%. El biodigestor fue sellado para evitar fugas y fue monitoreado durante 40 días a temperatura ambiente. Los cambios en la temperatura del biodigestor fueron monitoreados durante el día. Al final del periodo se verificó la presencia de biogás a través de una prueba de combustión simple.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diseño de biodigestor

A partir de un volumen nominal de 38 L, se diseñó biodigestor con un diámetro total de 28.92 cm y una altura total de 57.84 cm (Figura 1). El diseño del biodigestor permitió un volumen de operación del 80%, con un volumen de 8L para el almacenamiento de biogás. El diseño del biodigestor propuesto permite una variación en la capacidad de operación de hasta un 50% debido a que la relación geométrica H/D_t fue establecida en 2. Al respecto, se han reportado diseños de biodigestor tipo cúpula con volumen de operación de 1m^3 con una relación H/D_t de 1.2 y un 40% de espacio de cabeza²⁷. Mientras

que Aralu et al., (2021)²⁸, realizó la conversión de sustrato bovino en digestor de cúpula fija con relación H/D_i de 2 y porcentaje de llenado del 60%. En ambos trabajos no se reportaron efectos sobre la producción de biogás con respecto a la geometría. Sin embargo, ha sido reportado que la geometría vertical requiere sistemas de agitación debido a la distribución de los sólidos¹⁵. En el presente trabajo, la integración de un sistema de agitación permitió mantener la mezcla homogénea a bajas rpm con la finalidad de no afectar las condiciones anaerobias en biodigestor. Se ha reportado que los agitadores pueden funcionar de forma continua o en secuencias, las cuales se pueden optimizar empíricamente en función al tamaño del tanque, calidad de la materia prima, y la tendencia a formar capas flotantes²⁹.

Construcción e instrumentación del biodigestor

A partir del diseño de la geometría y su construcción en SolidWorks, se construyó el biodigestor con materiales como acero inoxidable y tubería de cobre de 1 in. Se ha reportado que acero como el V4A (Acero inoxidable austenítico) es adecuado para el contacto con H₂S, pero con una alta concentración de oxígeno y humedad, la corrosión puede aparecer con el paso del tiempo³⁰.

Para mantener la integridad estructural del dispositivo se evitó la realización de perforaciones innecesarias en las paredes. Los sensores y el cableado se dispusieron de tal forma que se pudiera asegurar una identificación adecuada y un acceso práctico a cada uno de los componentes sin interferir con el funcionamiento del sistema. El sellado hermético se logró mediante soldaduras evitando cualquier intercambio de masa con el entorno (Figura 2a).

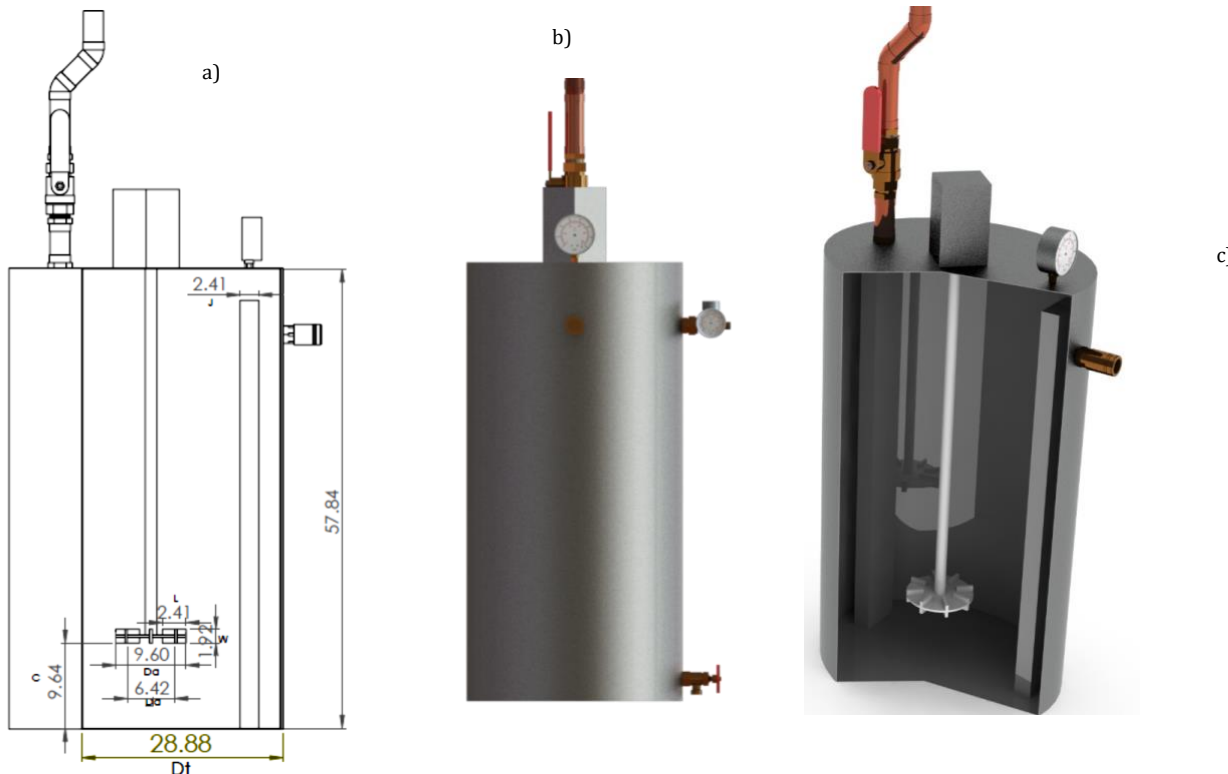


Figura 1: esquema del biodigestor en SolidWorks: (a) Corte en plano, (b) Vista derecha renderizada, (c) Vista isométrica renderizada con corte axial.

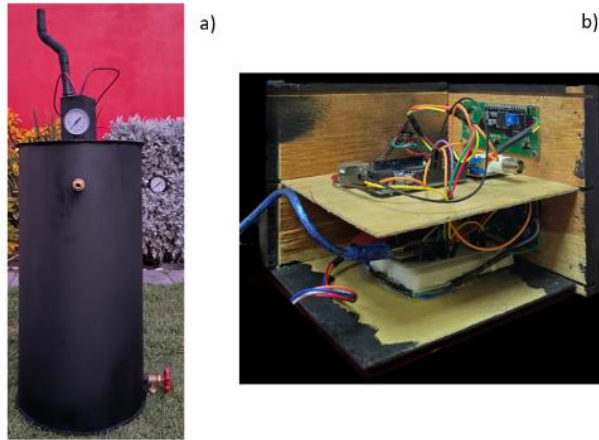


Figura 2. Ensamblado del biodigestor y disposición final de los componentes.

El sistema de control se dispuso como un dispositivo independiente, de tal forma que este no interfiera con el proceso de carga y descarga del biodigestor (figura 2b). Para el sistema de control, se utilizó el lenguaje C en Arduino IDE para la programación de los sensores de gas metano y pH. El modelo del sensor de pH fue un kit de Sonda de Módulo de pH, el cual incluye el módulo de sensor de detección de valor pH 0-14 acoplado a una sonda de electrodo de pH BNC. La calibración del sensor se realizó con buffer 4.5 y 7 para garantizar la medición en la programación.

Para la detección de gas, se programó el sensor MQ4, el cual es un detector de gas metano electroquímico el cual varía su resistencia al estar en contacto con el gas metano/gas natural y gas LP. El módulo contiene un circuito electrónico que permite realizar la conexión con alguna tarjeta de desarrollo, y cuenta con una salida analógica y otra digital³¹. Adicionalmente, para el monitoreo de temperatura, se implementó un Termómetro Digital LCD marca Yosoo, con un rango de temperatura de -40°C ~ 70°C , con una resolución de temperatura de 0.1°C .

En la actualidad, se sabe que muchas plantas de biogás no miden continuamente los procesos, en algunos casos, se recopilan datos, pero solo con la intención de que sirvan como monitoreo y control rutinario de parámetros, en lugar del control del proceso en tiempo real³². El proceso de control incluye la recopilación y el análisis de parámetros químicos y físicos como: Tipo y cantidad de materia prima introducida (diariamente), Temperatura del

proceso (diariamente), Valor de pH (diariamente), Cantidad y composición del gas (diariamente), Contenido de ácidos grasos de cadena corta y Nivel de llenado³⁰.

Operación y producción de biogás

Con un volumen de operación de 30 L, se ajustó la relación carbono-nitrógeno (C:N) en 26.66 kg C/kg N. Mientras que la cantidad de sólidos totales (ST) en el sustrato fue del 12% p/p, y el contenido de sólidos volátiles (SV) alcanzó el 75%p/p. Estos valores utilizados se encontraron dentro de los valores sugeridos para una relación C:N óptima de 20:1 a 30:1^{33,34}. En cuanto al contenido de ST, Martí-Herrero (2008)³⁵ y MINERGIA et al., (2011)³⁶ recomiendan que este parámetro oscile de entre un 8% a 12% p/p en plantas de grandes dimensiones, pero esta condición suele ajustarse a porcentajes de 5% p/p a 10% p/p³⁷. Por otro lado, Rajendran et al., (2012)²⁴ establecen un rango de un 7% a un 9% p/p como carga de ST de forma general para cualquier geometría de reactor.

Durante el proceso de biodigestión, el sensor de gas MQ4 mostró la presencia de gas a partir del día 11 con un contenido de 150 ppm de gas, el cual fue percibido como olor a huevo podrido característico del biogás por la presencia de H_2S ^{14,38} (figura 3). La detección de gas continuó hasta el día 40, momento en el que se detectó la presencia de 6192 ppm de metano.

Al respecto, se ha descrito que los sensores de la serie MQ reaccionan ante la presencia de gases en el ambiente, reduciendo su resistencia eléctrica mediante un material semiconductor a base de óxido de estaño (SnO_2), el cual, al entrar en contacto con el gas metano y el dióxido de carbono, modifica sus propiedades conductivas³⁹. El uso de este sensor permite determinar la presencia de metano de forma continua a diferencia de un análisis cromatográfico, el cual requiere de una muestra del biogás y medir el porcentaje de concentración de metano y dióxido de carbono en procesos de laboratorio. Esto resulta en la obtención de pocos datos y de alto costo⁴⁰.

De acuerdo con Tovar-Sánchez (2023)⁴⁰ es posible utilizar el detector MQ4 como referencia para estimar la concentración de metano corregido en %v/v de tal

forma que los datos obtenidos correspondieron 51% v/v de metano con respecto al biogás producido.

Debido a que el metano es el principal componente del biogás producido durante la digestión anaerobia, se ha reportado que la pureza del biogás depende directamente tanto del origen del sustrato como de la temperatura⁴¹. Sasse, (1998)³⁷ estableció porcentajes de CH₄ desde un 50% hasta un 70% v/v en la digestión anaeróbica de estiércol vacuno, excretas porcinas, desechos de comida y restos de podas. En contraste, Guerra (2022)⁴² reportan valores de 21.11% para desechos de cocina, lo que demuestra que los valores obtenidos fluctúan significativamente según el tipo de sustrato.

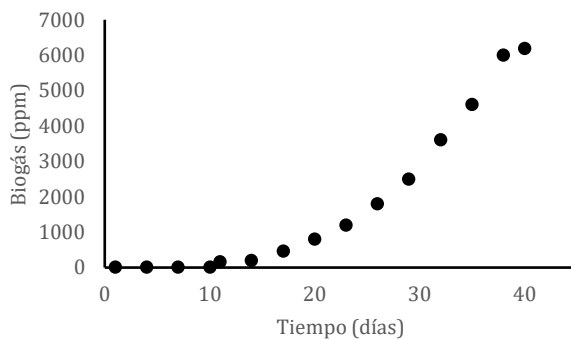


Figura 3. Evolución de la concentración de metano (ppm) en el biodigestor

Durante el periodo de operación del biodigestor mantuvo un pH estable de 7.1. Al respecto, se han reportado datos sobre la variación de pH en la mono y codigestión, observándose un valor mínimo de 6.2 y un máximo de 7 en los primeros 15 días de digestión con estiércol de vacuno y rumen de vaca⁴³. Por lo tanto, los valores de pH observados favorecieron la actividad de los microorganismos metanogénicos, permitiendo un entorno propicio para la producción eficiente de biogás. Adicionalmente, García-Páez, (2013)⁴⁴ reportó que al existir valores de pH mayores a 8 se corre el riesgo de putrefacción del sustrato mientras que al ser menores a 6 podría haber una inhibición debido a la concentración de ácidos orgánicos.

Mediante el sensor de temperatura se realizó el seguimiento de este parámetro al interior del biodigestor, los datos obtenidos durante la digestión anaerobia fueron promediados (Tabla 2). A partir de

los resultados se observó que el entorno afecto directamente al proceso de biodigestión observándose un cambio significativo en la temperatura desde 15.43°C a las 8:00 h con un aumento de 11.4°C a las 12:00 h y una disminución de 9.7°C a las 20:00 h diariamente. La variación de la temperatura denota que el proceso de biodigestión permitió el crecimiento de microorganismos mesofílicos³⁷. Se ha descrito que la temperatura es uno de los factores más importantes para la supervivencia de las bacterias metanogénicas, incluso cambios momentáneos podrían resultar en una disminución de la carga bacteriana⁴⁵.

Tabla 2. Promedio diario de temperaturas dentro del biodigestor.

Hora	Temperatura (°C)
8:00	15.43±0.78
10:00	17.15±0.92
12:00	22.85±2.65
14:00	26.83±2.07
16:00	24.08±2.06
18:00	20.18±1.24
20:00	17.13±0.50

En general ha sido observado que las bacterias no pueden ser sometidas a cambios de temperatura mayores de ±2.0°C⁴⁴. Por tanto, la temperatura a la que opera un sistema de biodigestión es importante; ya que definirá las dimensiones del digestor y su habilidad para degradar la materia prima³³. En la práctica, la temperatura de operación es un parámetro que se selecciona considerando la aplicación de la planta de biodigestión³³. En un régimen termofílico se generará mayor volumen de biogás en menor tiempo, aunque algunas desventajas de seleccionar un régimen termofílico son la inestabilidad de los compuestos químicos como el CO₂ que puede llevar a la formación de ácidos carbónicos, aumentando la posibilidad de una inhibición por amoníaco en la mezcla al igual que los costos operativos por calefacción²⁹.

CONCLUSIÓN

El diseño y construcción del biodigestor anaerobio tipo batch con una geometría estándar permitió la integración de un sistema de agitación en ciclos continuos con valores bajos de rpm. Adicionalmente, se integró un sistema de control a través de sensores

para el monitoreo y seguimiento de parámetros críticos como temperatura, pH y concentración de gas metano registrándose hasta 6 192 ppm después de 40 días de operación lo que represento el 51% v/v del biogás producido. Sin embargo, se hizo notorio la necesidad de mantener la temperatura en condiciones estables para mantener la biodigestión en condiciones mesofílicas óptimas.

REFERENCIAS

- Delacamara G, Azqueta D. Análisis económico de los costos externos ambientales de la generación de energía eléctrica [Internet]. Nueva York, N. Y. 10017, Estados Unidos.; 2007. Available from: <http://www.eclac.org/cgi-bin/getProd.asp?xml=/publicaciones/xml/5/28645/P28645.xml&xsl=/dmi/tpl/p9f.xsl&base=/dmi/tpl/top-bottom.xsl%5Cfiles/11197/lcw115e.pdf>
- Cárdenas JAB, Flores CL. Emisión de metano entérico por rumiantes y su contribución al calentamiento global y al cambio climático. Revisión. Rev Mex Ciencias Pecu. 2012;3(2):215–46.
- SENER. PROGRAMA SECTORIAL DERIVADO DEL PLAN NACIONAL DE DESARROLLO 2019-2024. DOF [Internet]. 2020; Available from: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5596374&fecha=08/07/2020#gsc.tab=0
- Bautista A. Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos. UNIVERSIDAD Carlos III de Madrid. ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR; 2010.
- Czekała W. Biogas as a Sustainable and Renewable Energy Source. In: Energy, Environment, and Sustainability [Internet]. 2022. p. 201–14. Available from: https://link.springer.com/10.1007/978-981-16-8747-1_10
- Khalid A, Arshad M, Anjum M, Mahmood T, Dawson L. The anaerobic digestion of solid organic waste. Waste Manag [Internet]. 2011 Aug;31(8):1737–44. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.021>
- He K, Liu Y, Tian L, He W, Cheng Q. Review in anaerobic digestion of food waste. Heliyon [Internet]. 2024 Apr;10(7):e28200. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024042312>
- Nguyen D, Gadhamshetty V, Nitayavardhana S, Khanal SK. Automatic process control in anaerobic digestion technology: A critical review. Bioresour Technol [Internet]. 2015;193:513–22. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.080>
- Arthur R, Baidoo MF, Antwi E. Biogas as a potential renewable energy source: A Ghanaian case study. Renew Energy. 2011;36(5):1510–6.
- Achinas S, Euverink GJW. Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste. Resour Technol [Internet]. 2016 Sep;2(3):143–7. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405653716300264>
- Deublein D, Steinhauser A. Formation of Biogas. In: Deublein, Dieter; Steinhauser A, editor. Biogas from Waste and Renewable Resources. Weinheim; 2008. p. 89–148.
- Rivas Solano O, Faith Vargas M, Guillén Watson R. Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. Tecnol en Marcha. 2010;23(1):39–46.
- Morales M, Vilte B Y Angélica Boucíguez MDS, Möller O, Signorelli JW, Storti MA, Rosario A. Estudio De La Distribución De Temperaturas Para El Diseño De Un Biodigestor Enterrado. Mecánica Comput. 2011;XXX:1625–31.
- Khanal SK. Bioenergy Generation from Residues of Biofuel Industries. In: Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production [Internet]. Wiley; 2008. p. 161–88. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780813804545.ch8>
- Teng Z, Hua J, Wang C, Lu X. Design and optimization principles of biogas reactors in large scale applications. In: Shi FBTR and PD in SET, editor. Reactor and Process Design in Sustainable Energy Technology [Internet]. Amsterdam: Elsevier; 2014. p. 99–134. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444595669000041>
- Samson M, Aboyade A, Muzenda E. Enrichment of Biogas for Use as Vehicular Fuel: A Review of the Upgrading Techniques. Int J Adv Eng Sci Appl Math. 2013 Dec 1;1.
- Romano RT, Zhang R. Co-digestion of onion juice and wastewater sludge using an anaerobic mixed biofilm reactor. Bioresour Technol. 2008;99(3):631–7.
- Lorimor J, Powers W, Sutton A. Manure Characteristics. In: Manure Management Systems Series [Internet]. 2nd ed. Ames, Iowa: MidWest Plan Service; 2004. p. 1–24. Available from: https://www.canr.msu.edu/uploads/files/ManureCharacteristicsMWPS-18_1.pdf
- Van DP, Fujiwara T, Leu Tho B, Song Toan PP, Hoang Minh G. A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends. Environ Eng Res [Internet]. 2019 Mar 11;25(1):1–17. Available from: <http://eeer.org/journal/view.php?doi=10.4491/eeer.2018.334>
- Al Seadi T, Rutz D, Prassl H, Köttner M, Finsterwalder T, Volk S, et al. Biogas Handbook. 2008. 126 p.
- Jegade AO, Zeeman G, Bruning H. A review of mixing, design and loading conditions in household anaerobic digesters. Crit Rev Environ Sci Technol [Internet]. 2019 Nov 17;49(22):2117–53. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10643389.2019.1607441>
- Kinyua MN, Rowse LE, Ergas SJ. Review of small-scale tubular anaerobic digesters treating livestock waste in the developing world. Renew Sustain Energy Rev. 2016;58:896–910.
- Nippon Koei. Guideline for Biogas Generation. 2015.
- Rajendran K, Aslanzadeh S, Taherzadeh MJ. Household biogas digesters-A review. Vol. 5, Energies. 2012. 2911–2942 p.
- Campos Cuní B. Metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de biodigestores

- para el sector cooperativo y campesino. *Rev Ciencias Técnicas Agropecu.* 2018;20(2):37–41.
26. Doran PM. *Bioprocess engineering principles: Second edition.* 2nd ed. Academic Press. Waltham MA; 2012. 1–919 p.
 27. Mukumba P, Makaka G, Mamphweli S. Biogasification of Horse Dung Using a Cylindrical Surface Batch Biodigester. In: *Frontiers in Bioenergy and Biofuels* [Internet]. InTech; 2017. p. 13. Available from: <http://www.intechopen.com/books/frontiers-in-bioenergy-and-biofuels/biogasification-of-horse-dung-using-a-cylindrical-surface-batch-biodigester>
 28. Aralu CE, Karakitie DE, Fadare DA. Construction of a pilot scale biogas digester at the University of Ibadan Dairy Farm, Abadina. *Fuel Commun* [Internet]. 2021 Dec;9:100033. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666052021000261>
 29. Al Seadi T, Rutz D, Janssen R, Drosch B. Biomass resources for biogas production. In: *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications.* Elsevier Inc.; 2013. p. 19–51.
 30. Ghassan Alsultan A, Asikin-Mijan N, Kareem Obeas L, Isalam A, Mansir N, Fawzi Nassar M, et al. *Biogas* [Internet]. Tabatabaei M, Ghanavati H, editors. *Biochar - Productive Technologies, Properties and Applications.* Cham: Springer International Publishing; 2018. (Biofuel and Biorefinery Technologies; vol. 6). Available from: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-77335-3>
 31. UNIT Electronics. MQ-4 Detector de Gas Metano Title. 2024 [cited 2024 Oct 23]. Tienda de componentes electrónicos. Available from: https://uelectronics.com/producto/mq-4-detector-de-gas-metano/?srsltid=AfmBOoqhZJNhDZQOQ5k0D0FzghWn_y1_AHKyRD51LGbvK92UvwM8JnqU
 32. Holm-Nielsen JB, Oleskowicz-Popiel P. Process control in biogas plants. In: *The Biogas Handbook* [Internet]. Elsevier; 2013. p. 228–47. Available from: <http://dx.doi.org/10.1533/9780857097415.2.228>
 33. FAO. *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores.* Colección De Documentos Técnicos N°12. Buenos Aires, Argentina; 2019.
 34. Deublein D, Steinhauser A. Typical Design Calculation for an Agricultural Biogas Plant. In: Deublein, Dieter; Steinhauser A, editor. *Biogas from Waste and Renewable Resources.* Weinheim; 2008. p. 357–64.
 35. Martí-Herrero J. *Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación.* Vol. 53, GTZ-Energía. 2008. 1689–1699 p.
 36. MINENERGIA; PNUD; FAO; GEF; *Manual de biogás.* *Angew Chemie Int Ed* 6(11), 951–952. 2011;(Mi):5–24.
 37. Sasse L. *Biogas Plants.* Biogas Technology in Nigeria. Deutsche; 1998.
 38. Petersson A. Biogas cleaning. In: *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications.* Sweden: Woodhead Publishing Limited; 2013. p. 329–41.
 39. Ordoñez A, Fitz E, Espinosa T, González M, Velázquez N. Determinación de concentración de metano con sensores semiconductores. In: PÉREZ-SOTO F, SEPÚLVEDA-JIMÉNEZ D, SALAZAR-MORENO R, SEPÚLVEDA-ROBLES D, editors. *Modelos matemáticos aplicados en la agricultura* [Internet]. 1st ed. Texcoco de Mora: ECORFAN®; 2017. p. 69–73. Available from: https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias_Matematicas_aplicadas_a_la_Agronomia_T-I/HCMA_TI.pdf
 40. Tovar-Sánchez JA, Arias-Molina JF, Milquez-Sanabria HA, Mayorga-Castellanos MA. Diseño técnico de un sistema de cuantificación de metano portable y de bajo costo. *Ingeniería* [Internet]. 2023 Feb 28;28(Suppl):e19053. Available from: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/reving/article/view/19053>
 41. Liu CM, Wachemo AC, Tong H, Shi SH, Zhang L, Yuan HR, et al. Biogas production and microbial community properties during anaerobic digestion of corn stover at different temperatures. *Bioresour Technol.* 2018;261:93–103.
 42. Guerra S, Páez I. Diseño y construcción de un biodigestor doméstico para producir biogás. 2022;1–94.
 43. Abdulfatah S, MusaMu'azu, Dayyabu I, Adamul. Production of biogas from co-digestion of cow dung, chicken dropping and cow rumen wastes. *FUDMA J Sci* [Internet]. 2022;5(4):413–7. Available from: <https://fjs.fudutsinma.edu.ng/index.php/fjs/article/view/844>
 44. García Páez V. *Manual de biogás. Conceptos básicos. Beneficios de su producción y la aplicación de sus sub-productos.* Dirección de Sustentabilidad. Buenos Aires, Argentina; 2019.
 45. Hagos K, Zong J, Li D, Liu C, Lu X. Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. *Renew Sustain Energy Rev.* 2017;76(November):1485–96.