

Diseño y desarrollo de un sistema mecatrónico simple para el monitoreo de variables en la producción de biogás generado en un biodigestor hecho a la medida

Dena-Aguilar José Alonso, Acevedo-Martínez Julio, Velasco-Gallardo Víctor Manuel, Herrera-Ambriz Víctor Manuel

Tecnológico Nacional de México/I. T. de Pabellón de Arteaga, Carretera a la Estación de Rincón Km 1.0, C. P. 20670, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México.

Resumen

Se ha diseñado y construido un sistema mecatrónico simple a base de electrónica modular para monitorear variables de operación en la producción de biogás de un proceso de digestión anaeróbica dentro de un biodigestor hecho a la medida. Se empleó un sensor de humedad de suelo HL-69, un sensor de gas metano MQ-4 y un termopar tipo K con módulo MAX6675 microcontrolados por Arduino. El biodigestor fue fabricado con materiales de fácil adquisición, pero de resistencia comprobada. El equipo automatizado se puso en operación por lotes empleando materia fecal de vaca y fue instalado directamente en una granja de crianza de ganado. Durante los días 5 al 8 de operación se presentaron rangos de temperatura entre 100-140 °C, concentraciones de gas metano entre 200-240 ppm y porcentajes de humedad entre 20-40%. Los resultados obtenidos fueron consistentes entre sí evidenciando el correcto funcionamiento del sistema mecatrónico propuesto.

Abstract

A smart mechatronic system using modular electronic was designed and constructed to measure the biogas obtained in a small-scale digester tank. The digester tank was fabricated using materials that are easy to obtain. An Arduino microcontroller was employed and connected to a temperature sensor type K with MAX6675 module, to a methane gas sensor MQ-4 and to a humidity sensor HL-69. The automated digester tank was operated like a batch reactor using cow manure as substrate. The equipment was installed in a small cow farm. The most important results were obtained between day number 5 and number 8 of operating, where the temperatures, humidity and methane concentration reached were in the range from 100-140 °C, 20-40 % and 200-240 ppm, respectively. The results were consistent, and it is demonstrated an efficient operating of the equipment.

Palabras claves: mecatrónica, biogás, biodigestor, microcontrolador Arduino.

Key words: mechatronic, biogas, bio-digester, microcontroller Arduino.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el fomento al uso de energías renovables, como el biogás, ha marcado una tendencia para el establecimiento de políticas gubernamentales que propicien el uso de esta tecnología debido a su fácil implementación, sobre todo en sectores rurales, donde se tiene gran disponibilidad de residuos de origen vegetal y animal propensos a la fermentación metanogénica o en su caso por su capacidad de generar energía térmica o eléctrica a partir del biogás [1]. Dentro de este panorama, el método más común para producir biogás es la digestión anaeróbica que se realiza dentro de un biodigestor donde la descomposición, fermentación y gasificación de la materia orgánica producen una mezcla de gases combustibles, compuestos por metano y dióxido de carbono principalmente donde su porcentaje de contenido es dependiente del tipo de materia prima considerada [2]. En las últimas décadas se han reportado diversos estudios centrados en el análisis de

procesos de biodigestión anaerobia, producción de biogás o uso de biodigestores para demostrar su viabilidad [3-5]. Dentro de este contexto, se destacan los estudios referentes a la optimización de la producción de biogás en donde se estudia el monitoreo y control de las magnitudes físicas del proceso como lo es la temperatura, el valor de pH, el contenido de humedad, la demanda química de oxígeno, entre otras [6-10].

A pesar de la amplia disponibilidad de información en la literatura y de los avances tecnológicos de hoy en día, se sigue estudiando la forma de aprovechar eficientemente el uso de la biomasa como fuente de energía renovable para la producción de biogás. Cuanto más que los sistemas biodigestores prefabricados o hechos a la medida no cuentan con un sistema capaz de monitorear, controlar y registrar las variables del proceso de biodigestión anaeróbica con el fin de aprovechar al máximo la energía del sustrato y generar biogás de una forma controlada, eficiente y eficaz. En este campo, diversos sistemas mecatrónicos para el registro de la producción de biogás se han presentado. Por ejemplo, Bermúdez-Gómez *et al.* (2010) emplean sensores PT100 y controladores TZ4ST-R4R de temperatura, sensor PT124B-210 de presión, sensor *Quingdao* de pH, una data logger HOB0, entre otros componentes para la construcción de su diseño mecatrónico, el cual, les permitió detectar fallas del proceso en tiempo real y poder hacer sus ajustes de operación [11]. Arias *et al.* (2012) emplearon un sensor de temperatura del tipo LM35D, un sensor de presión del tipo MPX2100, un microcontrolador 16F877 programado en lenguaje C++, entre otros componentes, que les permitieron determinar el tiempo óptimo el proceso de fermentación metanogénica [12]. Suarez *et al.* (2016) establecen un sistema de tratamiento de datos para un conjunto de biodigestores donde a cada reactor le habilitan un sensor de temperatura PT100 regulado mediante un controlador digital PID, un contador de gas marca RITTER, un control de pH JUMO *tec line for HT* y el uso de microcontrolador Arduino, entre otros componentes, que les permitió monitorear en tiempo real las variables del sistema [13].

El objetivo del presente trabajo es implementar un sistema mecatrónico inteligente y simple en un biodigestor anaeróbico de bajo volumen para el monitoreo de variables de operación en la producción de biogás. Específicamente, monitorear las variables de temperatura, porcentaje de humedad y concentración de gas metano empleando excremento de vaca como materia orgánica.

2. METODOLOGÍA

El equipo se diseñó y construyó para ser un equipo portátil y de funcionamiento sobre la superficie para facilidad de toma de lecturas de operación. Ningún equipo de agitación o de control de la temperatura fue implementado. Para la elaboración de los diseños se empleó el software de diseño y modelado mecánico en 2D y 3D *SolidWorks 2018* para definir la dimensiones, componentes y funcionamiento del sistema. En la Figura 1, se muestra el dibujo técnico del proyecto con todos los elementos integrados.

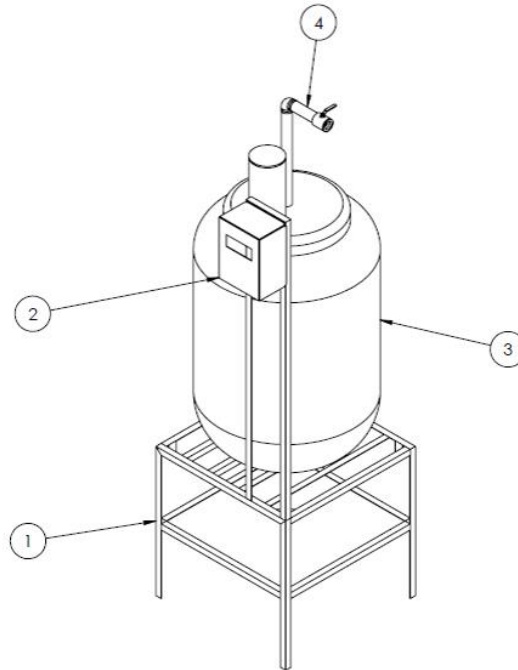


Figura 1. Dibujo técnico: (1) estructura de soporte, (2) caja de control, (3) biodigestor, (4) tuberías.

La estructura de soporte del equipo se construyó empleando acero al carbón calibre 14 de 1/2 x 1/2" y consiste en una base fija cuadrada de 500 mm por lado prevista con (i) un soporte a lo largo de la estructura para dar estabilidad a una altura de 250 mm y (ii) con una base (plancha) tipo parilla con soportes separados cada 150 mm entre sí. Unido a la base inferior se tiene la estructura de sujeción de la caja de control de geometría rectangular de 152.4 x 1000 mm.

La caja de control se construyó empleando lamina de acero calibre 14 (1.9 mm espesor) de 152.4 x 96.6 x 203.2 mm prevista con tapa abatible y con ventanas para el display y termómetro digital de medidas 98.55 x 39.62 mm y 47 x 28 mm, respectivamente.

Se empleó un contenedor de polietileno de alta densidad de 200 L de capacidad en color azul comercial prevista con tapa y cincho de seguridad. Las medidas aproximadas del contenedor son 809.96 mm de altura y 501.52 mm de diámetro de boquilla. La tapa del contenedor fue adaptada con una entrada de alimentación mediante un tubo de PVC de 2" con tapa a presión y salida de gases por medio de una tubería galvanizada de 1/2" prevista con llave de salida y adaptador para trampa de seguridad.

El control y automatización del equipo se basa en electrónica modular para Arduino y todo el sistema de control y automatización se fija en la caja de control de la estructura de soporte. El sistema embebido consta de los siguientes elementos:

- Microcontrolador Arduino UNO ATmega328 con conexión a ordenador mediante cable USB y adaptador de corriente AC a DC.
- LCD Display 20x4 en fondo azul con módulo serial I2C 2004A integrado.
- Sensor de gas (metano/gas natural) MQ-4. Detección de gases en ppm.
- Sensor de humedad de suelo HL-69.

- Sensor de temperatura Tipo K termopar 100mm con módulo MAX6675.
- Cable jumper dupont varios tipos m-m, h-h, m-h 20 cm.
- Protoboard blanco de 830 puntos.

Durante un periodo de 31 días se realizaron pruebas de la medición de temperaturas, humedad, y concentración de gas metano empleando el equipo. Las pruebas consistieron en la operación del equipo empleando excremento de vaca sin ningún tratamiento previo. El equipo se colocó en operación directamente en una granja de pequeña escala de producción de ganado vacuno localizada en la comunidad del Refugio de Providencia, Cosió, Aguascalientes. Se emplearon 3 cargas de materia orgánica fresca que permanecieron confinadas por días dentro del biodigestor realizando toma de lecturas cada 12 horas. Aproximadamente cada carga comprendía de 1 carretilla de excremento (promedio de 90 kg) que cubrían poco menos de 3/4 partes del biodigestor. La carga 1 estuvo 12 días en operación, la carga 2 durante 9 días y la carga 3 por 10 días. Ningún equipo de agitación ni de control de temperatura se utilizaron. Al momento de realizar una carga, el equipo permanecía cerrado y únicamente se apertura la válvula de salida de gases para evidenciar la presencia de gas metano. Al término del periodo de cada prueba el contenido se desechaba sin someterse a ningún otro estudio adicional.

3. RESULTADOS

Se utilizó el software de acceso libre Arduino para la programación y control de las entradas/salidas de las señales de los sensores y registrar la operación del equipo. La interfaz de los sensores y componentes con el microcontrolador Arduino UNO se realiza mediante cables jumper dupont de varios tipos interconectados por medio de la placa protoboard. Los sensores se habilitaron en puntos estratégicos en el contenedor. El sensor MQ-4 se habilitó en la tapa del contenedor, los sensores HL-69 y termopar tipo K se habilitaron en el cuerpo del contenedor a una altura media del mismo. El display LCD y el termómetro digital se colocaron en la tapa abatible de la caja de control. Únicamente el sensor MPX4250AP y el termómetro digital no se habilitaron para su funcionamiento en este proyecto.

En la Figura 2 se muestra el diagrama esquemático del sistema embebido en vista protoboard elaborado en software de acceso libre *Fritzing*. Se observa la forma en que los sensores se empotran en el protoboard y se comunican con el microcontrolador. En la Tabla 1 se presenta una lista de los componentes con sus respectivas conexiones (pines) de los periféricos de acople de señales.

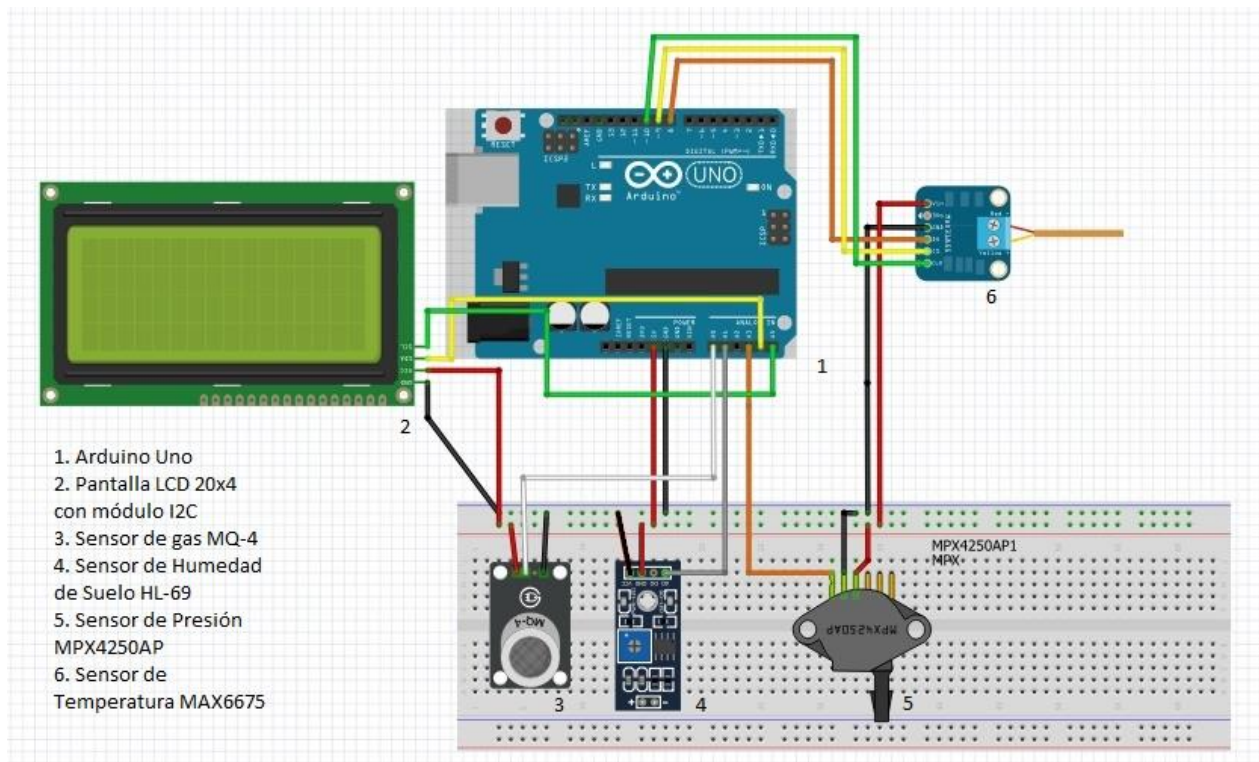


Figura 2. Diagrama esquemático del sistema embebido en vista protoboard.

Tabla 1. Interfaz de conexiones del sistema embebido.

LCD Display 20x4 con módulo I2C		Sensor de gas MQ-4	
Conexión de Pantalla	Arduino Uno	Conexión de Sensor	Arduino Uno
GND	Conexión tierra	GND	Conexión tierra
VCC	Corriente	VCC	Corriente
SDA	A4 (Conexión Analógica)	AO	A0 (Conexión Analógica)
SCL	A5 (Conexión Analógica)	DO	N/A
Sensor de humedad HL-69		Sensor de presión MPX4250AP	
Conexión de Sensor	Arduino Uno	Conexión de Sensor	Arduino Uno
GND	Conexión tierra	PIN 1 (Con muesca)	A3 (Conexión Analógica)
VCC	Corriente	PIN 2	Conexión tierra
AO	A1 (Conexión Analógica)	PIN 3	Corriente
DO	N/A		
Sensor de temperatura MAX6675			
Conexión de Sensor		Arduino Uno	
GND		Conexión tierra	
VCC		Corriente	
DO		8 (Conexión Digital)	
CS		9 (Conexión Digital)	
SCK		10 (Conexión Digital)	

El código de control desarrollado permite registrar las señales de los sensores instalados en el biodigestor y visualizar en el display LCD los valores de operación. Básicamente el programa recoge los datos que registra el sensor al estar en funcionamiento. El código de control fue estructurado consultando diferentes librerías de códigos Arduino de dominio público y de acceso libre y adaptándolo a los pines seleccionados:

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include "max6675.h"
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);
const float SensorOffset = 41.0;
int ktcSO = 8;
int ktcCS = 9;
int ktcCLK = 10;
MAX6675 ktc(ktcCLK, ktcCS, ktcSO);
void setup()
{
  Serial.begin(57600);
  lcd.begin();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0,0); lcd.print("Gas : ");
  lcd.setCursor(0,1); lcd.print("Hum : ");
  lcd.setCursor(0,2); lcd.print("Temp: ");
}
void loop()
{
  lcd.setCursor(16,0); lcd.print("ITPA");
  //Sensor MQ-4 (detección de gas metano)
  Serial.println(analogRead(0));
  lcd.setCursor(7,0); lcd.print(analogRead(0));
  //Sensor HL-69 (detección de humedad)
  int valorHumedad = map(analogRead(1), 0, 1023, 100, 0);
  Serial.println(analogRead(1));
  lcd.setCursor(7,1); lcd.print(valorHumedad);
  lcd.setCursor(9,1); lcd.print("%");
  //Sensor de temperatura MAX6675
  Serial.print("Deg C = ");
  lcd.setCursor(7,2); lcd.print(ktc.readCelsius());
  Serial.print("\t Deg F = ");
  Serial.println(ktc.readFahrenheit());
  delay(500);
}
```

En la Figura 3, se presenta el equipo con todos los elementos integrados. La caja de control contiene el sistema embebido integrado, el contenedor se mantiene a desnivel y en equilibrio mediante la estructura de soporte y los sensores se encuentran integrados en la tapa superior del biodigestor y en el cuerpo del reactor. Se observa la entrada de alimentación y de salida de biogás.

En la Figura 4, se muestra el comportamiento de las mediciones resultantes de porcentajes de humedad de cada carga donde se logra observar que se obtuvo una tendencia ascendente de la variable de medición. Entre

los días de operación número 5 y número 8 se presentó un rango estable de humedad entre 20-40 %. Lo anterior, puede adjudicarse a la degradación de la materia orgánica con el paso de los días y simultáneamente la formación de subproducto líquido (biol) y decantación del agua contenida en la materia orgánica. Siendo este comportamiento coherente con las mediciones de las demás variables.



Figura 3. Vista del biodigestor con el sistema embebido integrado.

En la Figura 5, se presenta el comportamiento de las mediciones resultantes de temperatura, en Celsius, de cada carga donde los resultados experimentales también muestran una tendencia ascendente de la variable y posteriormente una cuasi-estabilidad. En los primeros días no se observa un incremento significativo de la temperatura sino hasta el día 4 donde la temperatura sufre una súbita elevación manteniéndose en los días de operación número 5 y número 8 en el rango entre 100-140 °C. Lo anterior, puede adjudicarse al hecho de que al aumentar la temperatura se aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos que permite acelerar el proceso de biodigestión y la generación de biogás. Por las temperaturas alcanzadas se puede considerar que se tuvieron microorganismos termófilos (sin comprobación). Siendo este comportamiento coherente con las mediciones de las demás variables.

En la Figura 6, se muestra el comportamiento de las mediciones resultantes de las concentraciones, en ppm, de gas metano (CH_4), de cada carga donde las concentraciones desde el primer día fueron superiores a los 175 ppm y alcanzando su mayor concentración entre los 5 y 8 días de producción con valores de concentración entre 200-240 ppm. Se observa siempre una tendencia ascendente sin lograr detectarse, en el periodo de prueba, una disminución significativa del biogás. Lo anterior, puede adjudicarse al hecho de que la producción de biogás coincide con el incremento de temperatura en los días 5 al 8. Siendo este comportamiento coherente con las mediciones de las demás variables.

En la Figura 7 se presenta el sistema embebido en funcionamiento, mediante una fuente de 9V se lograba tener en funcionamiento el sistema durante todos los días de operación.

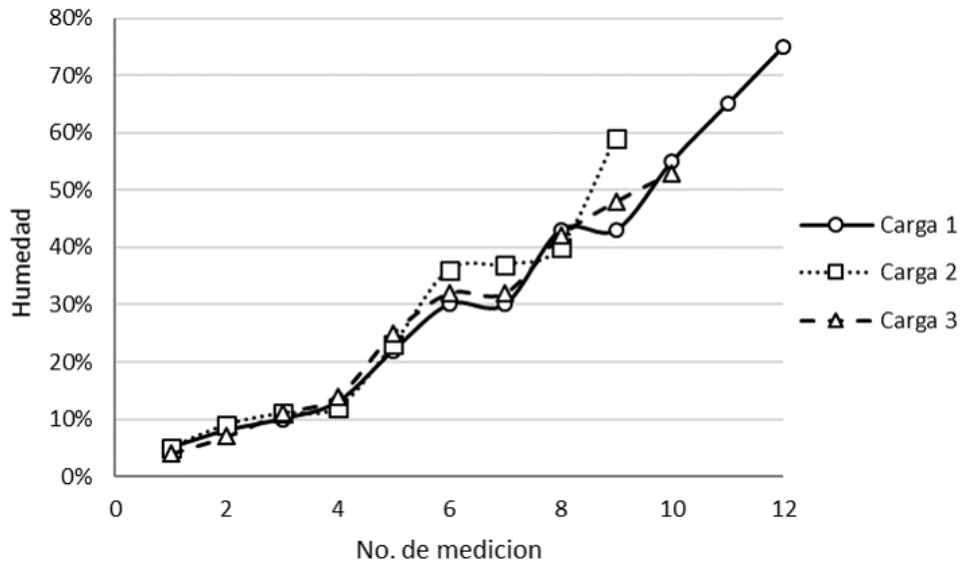


Figura 4. Mediciones de humedad (%).

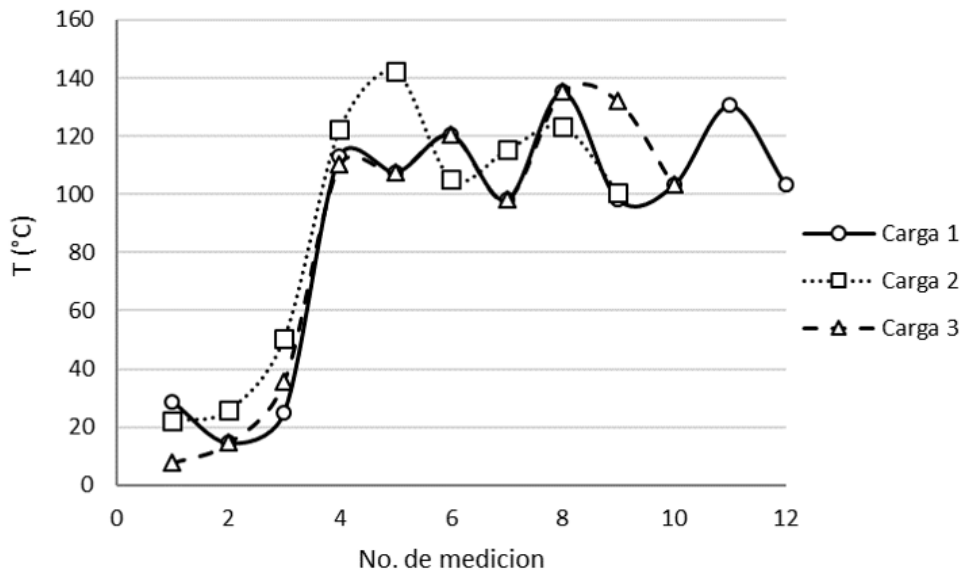


Figura 5. Mediciones de temperatura (°C).

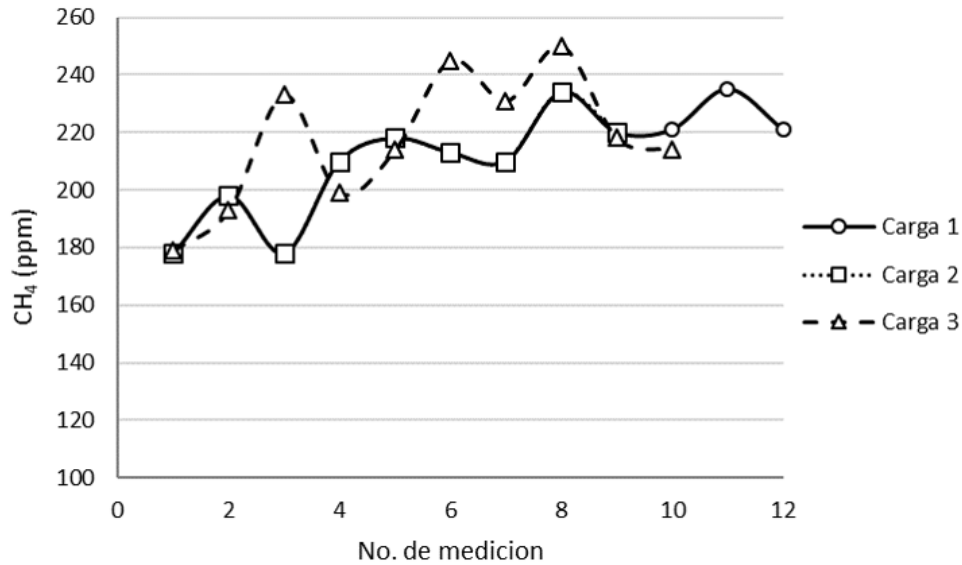


Figura 6. Mediciones de concentración de CH₄ (ppm).



Figura 7. Sistema embebido en operación durante las pruebas ejecutadas.

4. CONCLUSIONES

El biodigestor automatizado permitió producir biogás crudo al llevar a cabo procesos de digestión anaeróbica empleando materia orgánica fecal de vaca sin ningún tratamiento previo. Mediante el sistema embebido diseñado y construido se logró obtener lecturas de las variables de operación de temperatura, porcentaje de humedad y concentración de gas metano. Los valores de lecturas más relevantes y coherentes se presentaron entre los días número 5 y número 8 de operación del equipo. Los rangos de temperatura, de humedad y de concentración de gas metano obtenidos fueron de 100-140 °C, 20-40 % y de 200-240 ppm, respectivamente. Los resultados obtenidos son coherentes entre sí donde se sugiere que se tuvo la presencia de microorganismos termófilos que degradaban la materia orgánica a gran velocidad para generar biogás crudo y simultáneamente ir produciendo biol que propiciaba un aumento de la humedad.

La operación del equipo bajo las condiciones establecidas y desde el punto de vista del diseño y del aprovechamiento de procesos de digestión anaeróbica para lograr mediciones de las variables de operación en la producción de biogás permite demostrar que el sistema mecatrónico desarrollado es funcional.

El trabajo desarrollado en este proyecto sienta las bases para poder implementar en biodigestores de mayor volumen el sistema logrado, el cual permite poder monitorear las variables de operación y establecer demás proyectos de optimización para este tipo de energías renovables.

5. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo es producto del proyecto PABA-PYR-2019-5990 registrado ante la Dirección de Posgrado, Investigación e Innovación del Tecnológico Nacional de México. Los autores agradecen el soporte financiero y académico del Tecnológico Nacional de México/I. T. de Pabellón de Arteaga para su realización.

REFERENCIAS

- [1] Varnero, M. T. 2011. Manual de Biogás. Ministerio de Energía, Gobierno de Chile (MINENERGIA) / Programa para las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) / Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) / Global Environment Facility (GEF). Santiago de Chile, Chile. 120p.
- [2] Silva, V. J. (25-28 de septiembre de 2002). Tecnología del Biogás. Universidad del Callao / Universidad del Valle / Instituto Internacional de Ingeniería de las Infraestructuras, la hidráulica y medio ambiente. Curso Internacional Gestión Integral del Tratamiento de Aguas Residuales. Curso llevado a cabo en Lima, Perú.
- [3] Rodríguez, S., Pérez, R. y Fernández, M. (2000). Estudio de la biodegradabilidad anaerobia de las aguas residuales del beneficio húmedo del café. *Interciencia*, 25(8), 386-390.
- [4] Sulisty, H., Syamsiah, S., Herawati, D. A. and Wibawa, A. A. (2012). Biogas production from traditional market waste to generate renewable energy, 2012 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST), Tomsk, pp. 1-4. doi: 10.1109/IFOST.2012.6357507
- [5] Kumba, T. K., Akinlabi, E. T. and Madyira, D. M. (2017). Design and sustainability of a biogas plant for domestic use, 2017 8th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT), Cape Town, pp. 134-137. doi: 10.1109/ICMIMT.2017.7917451
- [6] Wei, X. and Kusiak, A. (2012). Optimization of Biogas Production Process in a Wastewater Treatment Plant. *Proceedings of the 2012 Industrial and Systems Engineering Research Conference*
- [7] Sakar, S., Yetilmezsoy, K., and Kocak, E. (2009). Anaerobic digestion technology in poultry and livestock waste treatment — a literature review. *Waste Management & Research*, 27(1), 3–18. doi 10.1177/0734242X07079060
- [8] Ribeiro, E. M., Barros, R. M., Tiago Filho, G. L., S dos, I. F., Sampaio, L. C., dos Santos, T. V., dG da, F., M Silva, A. P. and Victor R, J. (2018). Feasibility of biogas and energy generation from poultry manure in Brazil. *Waste Management & Research*, 36(3), 221–235. doi 10.1177/0734242X17751846
- [9] De la Merced-Jiménez, D. (2012). Evaluación de los parámetros de un biodigestor anaerobio tipo continuo (tesis de maestría). Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México.
- [10] Sánchez-Góngora, M. A., Peón-Escalante, I. E., Cardona-Juárez, T., Ortega-Arroyo, L. y Urriolagoitia-Calderón, G. (2016). Evaluación inicial de parámetros de campo en un biodigestor anaeróbico para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18(1), 173-184. doi 10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.57725
- [11] Bermudez-Gómez, C. R., Plata, G. O., Díaz-Hernández, M. A. and Ramon-Suárez, J. H. (2010). Instrumentation of an animal manure biodigester to analyze its dynamic behavior, 2010 IEEE ANDESCON, Bogota, pp. 1-6. Doi 10.1109/ANDESCON.2010.5632063
- [12] Arias, L. A., Chica, A. J., Flórez, O. D. and Becerra, M. A. (2012). UML for the design of the Biodigester automation, 2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), Montevideo, pp. 1-5. doi 10.1109/TDC-LA.2012.6319052
- [13] Suarez, D. R., Lancheros-Cuesta, D. J. and Contreras, J. U. C. (2016). Data processing reactor for anaerobic digestion (Instrumentation, acquisition), 2016 11th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), Las Palmas, pp. 1-7. doi 10.1109/CISTI.2016.7521443

Correo electrónico autor: josealonso_dena@hotmail.com