

Evaluación de dispositivos electrónicos de bajo costo para la medición de metano por método volumétrico

Luisa María Apraez-Jakab¹

Dayana Carolina Pardo-Delgado²

Paola Andrea Ortega-Guerrero³

Alex Fabián Cadena-Cariasco⁴

Resumen

En el presente artículo se da a conocer la implementación de dispositivos electrónicos de bajo costo para automatizar la medición de concentración de metano a través del método volumétrico. Para lograr el cumplimiento de la investigación se propuso como objetivo, evaluar un dispositivo electrónico de bajo costo para la automatización en la medición de la concentración de metano en el método volumétrico convencional. Para ello se hizo un diseño experimental que inició con la validación de sensores; posteriormente, se hizo el diseño del montaje del reactor con sus respectivas sustancias generadoras de metano y el respectivo lenguaje de programación de sensores; se continuó con la producción de metano, recolectando para ello muestras diarias; finalmente, estos datos fueron analizados estadísticamente en el programa SPSS. Los resultados permitieron identificar los dispositivos electrónicos óptimos como la placa Arduino, el sensor de distancia HC-SR04 y el sensor de temperatura Ds18b20. Además, se logró identificar sustancias generadoras de metano, como: el cuy, la gallinaza y el rastrojo de maíz. Después del montaje experimental y la toma de datos, se determinó que no existen diferencias significativas entre los dos métodos.

Palabras clave: Automatización; digestión anaerobia; metano.

¹Estudiante del Programa de Ingeniería Ambiental, Universidad Mariana. Correo electrónico: luisapraez@umariana.edu.co

²Estudiante del Programa de Ingeniería Ambiental, Universidad Mariana. Correo electrónico: dpardo@umariana.edu.co

³Magíster en Ingeniería Química, Universidad de Manizales. Docente, Universidad Mariana. Correo electrónico: portega@umariana.edu.co

⁴Magíster en Ingeniería Electrónica. Docente, Universidad Mariana. Correo electrónico: acadenac@umariana.edu.co

Evaluation of low-cost electronic devices for the measurement of methane by volumetric method

Abstract

This article presents the implementation of low-cost electronic devices to automate the measurement of methane concentration through the volumetric method. To achieve compliance with the research, the objective was to evaluate a low-cost electronic device for automation in the measurement of methane concentration in the conventional volumetric method. An experimental design was made that began with the validation of sensors, the design of the reactor assembly with its respective methane generating substances and the respective sensor programming language; continued with the production of methane, collecting daily samples; finally, these data were statistically analyzed in the SPSS program. The results made it possible to identify optimal electronic devices such as the Arduino board, the HC-SR04 distance sensor, and the Ds18b20 temperature sensor. Methane-generating substances were identified, such as guinea pig, chicken manure, and corn stubble. After experimental setup and data collection, it was determined that there are no significant differences between the two methods.

Keywords: Automation; anaerobic digestion; methane.

Avaliação de dispositivos eletrônicos de baixo custo para medição de metano por método volumétrico

Resumo

Este artigo apresenta a implementação de dispositivos eletrônicos de baixo custo para automatizar a medição da concentração de metano pelo método volumétrico. Para cumprir a pesquisa, o objetivo foi avaliar um dispositivo eletrônico de baixo custo para automação na medição da concentração de metano no método volumétrico convencional. Foi realizado um projeto experimental que se iniciou com a validação dos sensores, o projeto da montagem do reator com suas respectivas substâncias geradoras de metano e a respectiva linguagem de programação dos sensores; deu continuidade à produção de metano, com coleta diária de amostras; por fim, esses dados foram analisados estatisticamente no programa SPSS. Os resultados permitiram identificar os dispositivos eletrônicos ideais, como a placa Arduino, o sensor de distância HC-SR04 e o sensor de temperatura Ds18b20. Foram identificadas substâncias geradoras de metano, como porquinho-da-índia, esterco de galinha e restolho de milho. Após a montagem experimental e coleta de dados, foi determinado que não há diferenças significativas entre os dois métodos.

Palavras-chave: Automação; digestão anaeróbica; metano.

INTRODUCCIÓN

Los procesos anaerobios se estudian desde un enfoque bioquímico y microbiológico, debido a la diversidad de bacterias que lo componen en cada etapa. El proceso inicia con las bacterias no metanogénicas, las cuales se encargan de la degradación de compuestos a través de la transformación de las moléculas que hacen parte de la materia orgánica, de lo cual se obtienen insumos o alimentos para el siguiente grupo de bacterias denominadas metanogénicas, caracterizadas por la producción de metano y dióxido de carbono, principalmente.

Para lograr la cuantificación del metano existen métodos como la cromatografía y volumetría, de los cuales, el primero requiere de equipos sofisticados con especificaciones técnicas especiales y puntuales, lo que ha generado altos costos de inversión, operación y mantenimiento, por lo tanto, los costos cobrados en laboratorios especializados son relativamente elevados en comparación con el método volumétrico, que se caracteriza por ser ampliamente difundido y aceptado en el medio debido a su simplicidad y economía, ya que solo se debe hacer pasar el biogás a través de una trampa de NaOH para capturar el CO₂ y permitir el paso y la acumulación del CH₄ (Sanabria et al., 2012).

Por otro lado, el ensayo de la actividad metanogénica específica (AME) es una importante herramienta para el monitoreo de los procesos anaerobios, es utilizada en diferentes países y desarrollada hace más de dos décadas, permite cuantificar la máxima capacidad de producción de metano por el grupo de microorganismos presente en lodos anaerobios, con el fin de examinar la degradabilidad de los sustratos y la posibilidad de selección de inóculos, sin embargo, esta herramienta no cuenta con un protocolo estandarizado que facilite la comparación de resultados (Torres y Pérez, 2010).

Teniendo en cuenta lo mencionado, el objetivo de esta investigación es implementar dispositivos de bajo costo para automatizar la medición de concentración de metano generado en los tratamientos anaerobios, a través del método volumétrico, al cual se le adicionara sensores con alta sensibilidad a gas metano y una plataforma electrónica de código abierto (Arduino), para que, posteriormente, se logre realizar un análisis comparativo entre las concentraciones de metano obtenidas con la aplicación de un dispositivo de bajo costo y las reportadas por el método convencional.

Metodología

Para el desarrollo de la presente investigación se inició con el objetivo: Seleccionar el dispositivo electrónico óptimo que permita la medición eficiente de metano en el sistema; para ello, se desarrollaron cuatro actividades fundamentales. Inicialmente, se realizó una revisión bibliográfica acerca de la posible placa electrónica y los sensores a

implementar y cuáles de ellos estarían disponibles en el mercado, una vez se obtiene la información necesaria se continua con la evaluación de los sensores y la placa electrónica, se propone criterios de selección con una escala de puntuación (ver Tablas 1 y 2).

Tabla 1

Criterios y escala de puntuación de selección para la adquisición de los sensores de metano y temperatura

Puntaje de criterios para sensores			
Criterios de selección	Cumple	No cumple	Cumple parcialmente
Descripción del sensor	15	0	7.5
Disponibilidad de adquisición	10	0	5
Costos de inversión	25	0	12.5
Costos de mantenimiento	5	0	2.5
Condiciones ambientales	10	0	5
Condiciones de trabajo estándar	10	0	5
Características de sensibilización	10	0	5
Fiabilidad	15	0	7.5
	100	0	50

Tabla 2

Criterios de selección y escala de puntuación para la adquisición de la placa electrónica

Puntaje de criterios para placa arduino			
Criterios de selección	Cumple	No cumple	Cumple parcialmente
Descripción del sensor	15	0	7.5
Disponibilidad de adquisición	15	0	10
Costos de inversión	25	0	12.5
Costos de mantenimiento	10	0	2.5
Programación	10	0	5
Sistema operativo	10	0	5
Fiabilidad	15	0	7.5
	100	0	50

Después se realizó la adquisición de los dispositivos electrónicos y, finalmente, se realizó la verificación del funcionamiento de los sensores. Se inició con el funcionamiento del sensor de ultrasonido, el cual se verifica mediante la metodología Goplani S. S. (2017), que consiste en poner a prueba el sensor de ultrasonido con el lenguaje de programación y ubicarlo en una superficie alta donde se pueda reflejar, luego se procede a medir con un metro la altura del piso hasta la ubicación del sensor, de esto se realizaron varias pruebas hasta que el sensor logro obtener la medición correcta, para poder determinar que el funcionamiento del sensor fue óptimo.

Para la respectiva validación de datos del sensor de temperatura seleccionado, se realizó la comparación con un termómetro de mercurio (dispositivo de medición calibrado), mediante la metodología aplicada por la Facultad de Matemáticas, Astronomía y Física UNC –FaMAF- (2013), la cual se tomó como referencia dos temperaturas conocidas: el punto de congelación del agua y punto de ebullición sobre el nivel del mar; sin embargo, el punto de ebullición presentó una variación debido a la altitud, por lo tanto, mediante la ecuación 1 se calculó la diferencia de presión atmosférica y a partir de la ecuación 2 se obtuvo el factor de corrección de la temperatura por cambio en la presión atmosférica y, por último, se procedió por medio de la ecuación 3 a obtener la temperatura de ebullición corregida.

$$\Delta P = Patm(\text{nivel del mar}) \text{ mmHg} - Patm(\text{ciudad}) \text{ mmHg} \quad (1)$$

$$Fc = \frac{\Delta P * (\Delta T * \Delta P)}{10 \text{ mmHg}} \quad (2)$$

$$Teb(\text{corregida}) = Teb(\text{normal}) - Fc \quad (3)$$

Por otra parte, para determinar si la placa Arduino y los sensores son capaces de realizar las mediciones con el lenguaje de programación implementado, se realizó una simulación a través del programa Tinkercad. Seguidamente, se planteó un montaje experimental para la generación de gas, tomando como referente la metodología planteada por Torres y Pérez (2010), para esto, se inició con un diseño del montaje en el programa Tinkercad 3D.

Teniendo en cuenta la metodología de Watson y Rivas (2012), las cantidades de biomasa adecuadas para la generación de metano están dadas en una relación 1:1, por lo tanto, para la presente investigación se escogió dos tipos de materia prima, tanto de origen animal -estiércol de cuy y gallina- y de origen vegetal -rastrojo de maíz-, ya que, de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidad para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2011), para lograr el arranque de un reactor biológico, los nutrientes de la biomasa escogida deben ser adecuados. Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó el ensayo en botellas de 1.500 mililitros con un volumen efectivo del 80 %, es decir, 1.200 mililitros, al respecto, Torres y Pérez (2010) manifiestan que la mezcla no debe sobrepasar el 90 % del volumen útil del reactor, por ende, las proporciones de cada residuo están dadas por una parte de estiércol por dos de rastrojo y tres de agua, de

modo que para el volumen efectivo anteriormente mencionado, las cantidades son 56 % de residuos de origen vegetal y 24 % de residuos de origen animal.

Una vez identificados los elementos generadores de metano, se procedió a la recolección de muestras para los residuos de origen animal; las muestras fueron tomadas de un criadero de cuyes y gallinas ubicado en la vía que conecta con el corregimiento de Catambuco y los residuos de origen vegetal se obtuvieron de la plaza de mercado potrerillo. Posterior a esto, se da puesta en marcha a todo el procedimiento, una vez se obtienen los primeros goteos se inicia con la toma de datos, por lo tanto, para determinar el volumen de metano se hizo uso de la ecuación 4; luego pasar a tomar la concentración de metano volumen/volumen se utilizó la ecuación 5, donde se expresa el volumen desplazado correspondiente al metano que ingresa al reactor dos, además, se determina el volumen del reactor, ya que en este se encuentra el volumen de la solución, donde el soluto se encuentra en estado gaseoso (metano) y el disolvente en estado líquido. Este proceso se realizó de forma manual para cumplir con el método volumétrico convencional y, a su vez, mediante los dispositivos electrónicos con los datos que se presentan automáticamente mediante el *display*.

$$V_{desplazado} = \pi * r^2 * (A - B) \quad (4)$$

Donde:

A = altura del sensor hasta la base

B = altura del sensor al liquido

$$\% \frac{v}{v} = \frac{v_{desplazado}}{v_{reactor}} \quad (5)$$

Con el fin de saber si existe una diferencia significativa entre los resultados de los dos métodos registrados, se realizó una recolección de resultados de los dos métodos implementados. Se procedió con la prueba estadística entre dichos datos, siendo necesario la búsqueda de un programa estadístico que permita realizar una comparación de manera adecuada y eficaz entre los datos registrados; sin embargo, antes de esto fue necesario la organización y tratamiento de los datos resultantes, de esta manera, se determinó cuáles son los más significativos para analizar en el programa seleccionado. Después de un estudio exhaustivo de programas aptos para el análisis estadístico, se decidió escoger el programa SPSS statistics. Las pruebas realizadas son de tipo inferencial de normalidad. Para llevar a cabo esta prueba, se plantearon dos hipótesis:

H0: Los datos de concentración de CH₄ para cada método de prueba se distribuyen normalmente.

H1: Los datos de concentración de CH₄ para cada método de prueba NO se distribuyen normalmente.

Luego de esto se determinó, según los resultados, si se realiza pruebas de homocedasticidad o pruebas NO paramétricas. Dando así cumplimiento al objetivo general de la presente investigación.

Resultados y Discusión

Selección del dispositivo electrónico óptimo que permita la medición eficiente de metano en el sistema

Mediante un análisis bibliográfico y por intervención del equipo de investigación se determinaron los criterios de evaluación y dispositivos a evaluar, donde, a partir de los principios de detección de cada uno de los sensores, se determinó la respectiva sensibilidad, precisión y respuesta, puesto que presentan un resultado único y óptimo en cada medición; por otra parte, los costos de inversión y mantenimiento de cada dispositivo electrónico permitieron conocer la expectativa de vida útil y también la relación costo-beneficio, ya que se tuvo en cuenta cada una de las variables que requerían inversión.

Por medio de las condiciones ambientales y estándares de los dispositivos electrónicos se comprobó el respectivo funcionamiento para poder garantizar un desempeño seguro y confiable en un rango determinado, como lo afirma Marquez (2012).

Ahora bien, para conocer el funcionamiento de las placas electrónicas preseleccionadas, se evaluaron una serie de criterios como la programación y el sistema operativo; por medio de la programación se conoció el lenguaje formal que utiliza cada placa para realizar los procesos y mediante el sistema operativo se determinó la coordinación y el control del sistema que brinda la placa Raspberry pi y Arduino Mega.

Valoración de sensores de distancia y temperatura

Considerando los criterios de selección y escala de puntuación para la adquisición del sensor de distancia, se evaluaron 6 tipos de sensores especializados en calcular trayectorias desde un objeto a otro, con el objetivo de determinar la alternativa óptima para la medición de distancia en el sistema (ver Tabla 3), así mismo, para la toma de temperatura (ver Tabla 4). Cabe aclarar que las siglas presentadas en la tabla hacen referencia al modelo del sensor a valorar.

Tabla 3*Valoración de criterios de selección para la adquisición del sensor de distancia*

Valoración de alternativas	Sensor SHARP Gp2y0a 21yk0f sensor MP2	Sensor HC-SR04	Sensor REFLEX E3JK-R4M1	Sensor LJ18A3-5-ZAX	Sensor US-016	Sensor XKC-Y25-T12V
Descripción del sensor	10	10	10	10	10	10
Disponibilidad de adquisición	15	15	15	0	15	0
Costos de inversión	15	15	0	0	15	15
Costos de mantenimiento	5	5	2.5	5	2.5	5
Rangos de medición	7.5	15	15	0	7.5	0
Tecnología sensorial	7.5	15	7.5	7.5	15	7.5
Precisión	0	5	5	10	5	10
Voltaje de operación	15	15	0	0	15	0
Puntaje total	75	95	55	32.5	85	47.5

De esta manera se seleccionó el sensor HC-SR04, cuyo funcionamiento principal es la medición de distancia a la que se encuentra algún objeto, contando el tiempo que se demora una señal ultrasónica de 40 Khz del transmisor en rebotar sobre el objeto y retornar al receptor en un rango de 2 a 450 centímetros, con base en este tiempo y considerando la velocidad del sonido en el aire se puede obtener con mucha precisión la distancia (Alvarado y Rodríguez, 2016); además, cabe resaltar que el voltaje de operación de este dispositivo electrónico es de 5 voltios, por lo que se puede alimentar directamente desde un microcontrolador como el Arduino.

Tabla 4

Valoración de criterios de selección para la adquisición de sensores de temperatura

Valoración de alternativas	Sensor Lm135	Sensor Lm235	Sensor Lm335	Sensor DHT11	Sensor Lm35	Sensor Ds18b20
Descripción del sensor	7.5	7.5	15	7.5	15	15
Disponibilidad de adquisición	5	5	10	10	10	10
Costos de inversión	12.5	25	25	25	25	25
Costos de mantenimiento	5	5	5	5	5	5
Condiciones ambientales	5	5	5	10	10	10
Condiciones de trabajo estándar	5	5	5	10	5	5
Características de sensibilización	10	10	10	10	10	10
Fiabilidad	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
Puntaje total	50	62.5	82.5	77.5	87.5	95

Se seleccionó el sensor Ds18b20 porque su valoración fue la más alta, ya que cumplía con los criterios de evaluación para el correcto funcionamiento del sistema. La descripción del sensor permitió conocer de manera detallada las características propias de este modelo, como el correcto funcionamiento y compatibilidad con microcontroladores, cuyo voltaje de alimentación no es superior a 5 voltios, además, entre sus características se destacó la medición de temperatura en ambientes húmedos, debido a que se encuentra sellado por una sonda impermeable de aluminio que permite mejorar la conductividad térmica y sumergirlo en sustancias líquidas, volviéndolo idóneo para la actual investigación; otra ventaja es que, al ser un sensor digital, la señal de salida no es distorsionada gracias a la longitud del cable, el cual puede funcionar en modo 1-wire, es decir, un protocolo de comunicaciones donde se envían y reciben datos a través de un solo cable a una precisión de ± 0.5 °C con una resolución de 12 bits (Cambronero, 2017).

Valoración de placas electrónicas

Partiendo de los criterios de selección y escala de puntuación para la adquisición de la placa electrónica, se evaluaron 2 placas, con el objetivo de determinar la óptima para el debido funcionamiento del sensor de temperatura y distancia y con ello evitar fallas en el proceso de obtención de metano (ver Tabla 5).

Tabla 5

Valoración de criterios de selección para la adquisición de placa electrónica

Valoración de alternativas	Placa Raspberry Pi	Placa arduino mega
Descripción de la placa electrónica	15	15
Disponibilidad de adquisición	10	15
Costos de inversión	12.5	25
Costos de mantenimiento	5	10
Programación	5	5
Sistema operativo	5	10
Fiabilidad	7.5	7.5
Puntaje total	60	87.5

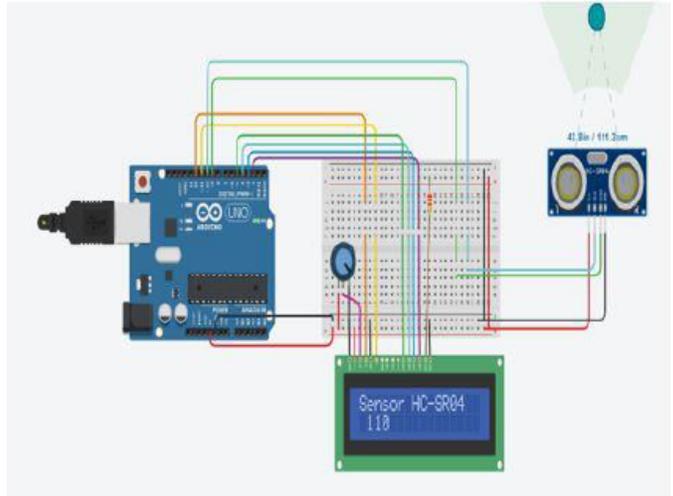
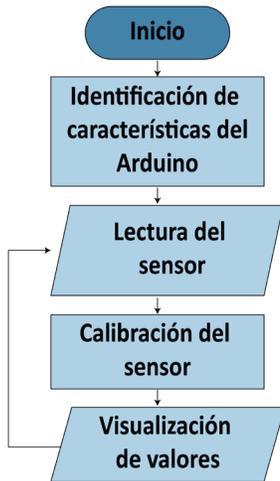
La puntuación de cada alternativa evidenció que la placa más óptima para el correcto funcionamiento de los sensores seleccionados fue el Arduino Mega, ya que, según Sierra (2014), Arduino es una plataforma de software y hardware libre, compuesta por una placa con un microcontrolador y un medio de desarrollo que contiene entradas y salidas análogas o digitales, además, presenta fácil programación, ya que su diversidad a nivel global ha permitido que exista información gratuita relacionada con su programación como las librerías que se encuentran desarrolladas, las cuales facilitan la elaboración de proyectos al usuario.

Implementación del dispositivo electrónico de bajo costo seleccionado en un biorreactor de digestión anaerobia para la medición de metano en el sistema

Teniendo en cuenta la importancia de generar estrategias que permitan la comprensión del funcionamiento de los dispositivos electrónicos, se realizó la respectiva modelación del sensor de distancia ultrasónico HC-SR04 y la placa Arduino Mega, a través del software Tinkercad (ver Figura 1), con el fin de determinar su compatibilidad y así evitar errores asociados al registro de datos en el sistema.

Figura 1

Representación gráfica del proceso de compatibilidad entre placa Arduino Mega y sensor de distancia ultrasónico HC-SR04



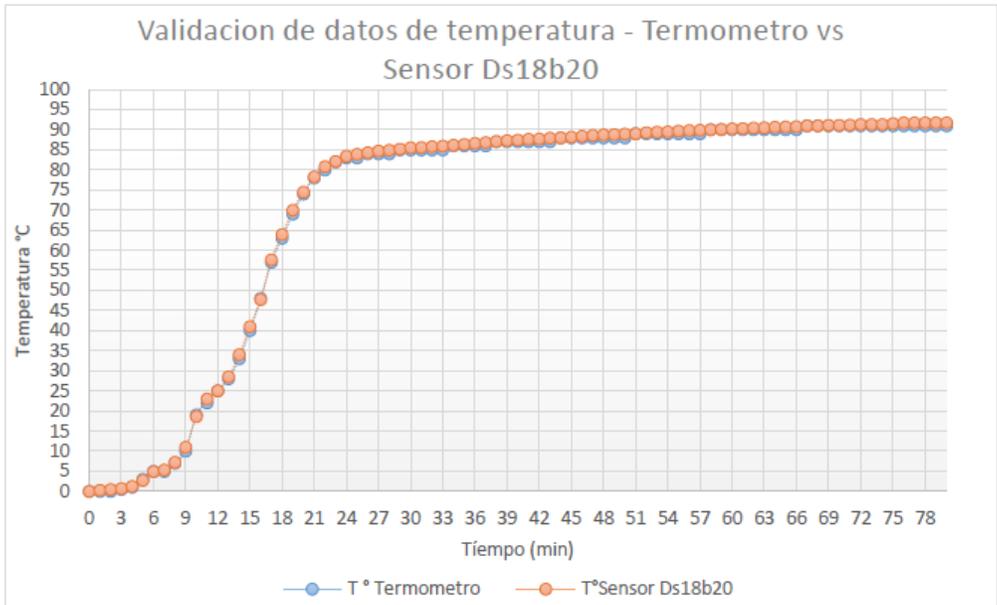
La compatibilidad de la placa Arduino Mega y el sensor HC-SR04, a través del software Tinkercad, se obtuvo mediante la conexión de dos pines que vinculan al Arduino y al sensor de distancia ultrasónico a través de una protoboard, donde la placa Arduino Mega utilizó como voltaje lógico 5 voltios con una arquitectura AVR, es decir, que utiliza memorias que trabajan con un solo nivel de transmisión por conductos y buses separados para la programación y obtención de datos, según el datasheet del sensor HC-SR04, su voltaje lógico es de 5 voltios, por lo tanto, se dio la aceptación del voltaje de operatividad de cada dispositivo electrónico.

Validación del sensor de temperatura DS18B20

Teniendo en cuenta la metodología de calibración de dispositivos de medición de temperatura de (FaMAF, 2013), se realizó la respectiva validación de datos con el sensor de temperatura seleccionado (ver Figura 2), con el objetivo de verificar su funcionamiento y determinar posibles errores de medición.

Figura 2

Validación de datos de temperatura – termómetro vs. Sensor de temperatura DS18B20



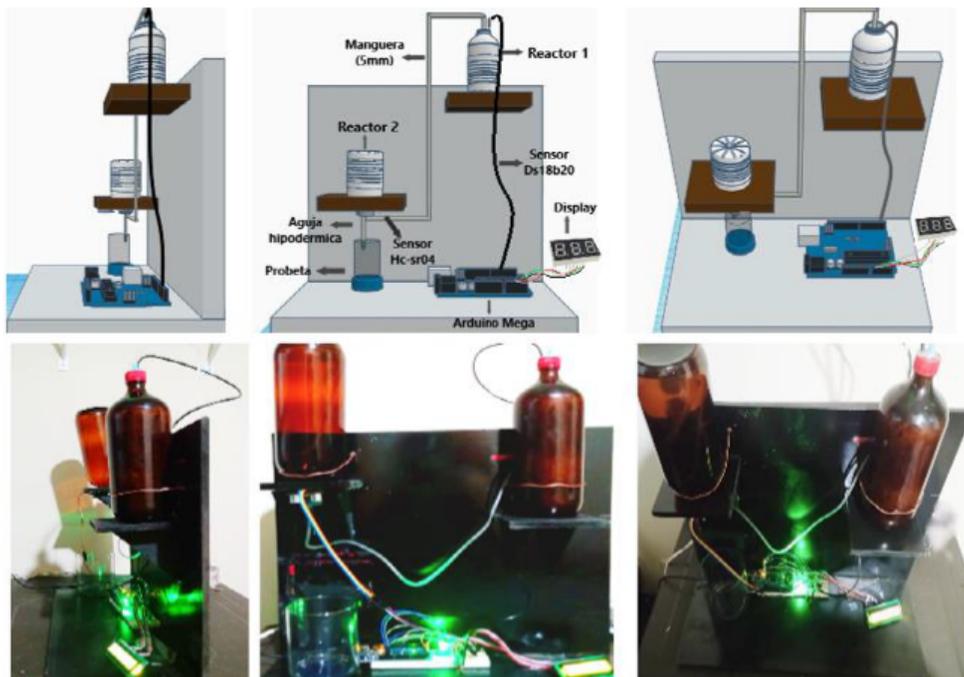
Como se puede observar, se evaluó la temperatura del agua en un tiempo determinado, a través de dispositivos especializados en la medición de temperatura como el sensor Ds18b20 y un termómetro de mercurio, donde los resultados arrojados permitieron conocer el funcionamiento y la respectiva calibración del dispositivo electrónico anteriormente seleccionado.

Diseño del montaje a implementar

Debido a que los procesos demandan nuevas estrategias que involucren la relación entre equipos físicos y programas encargados del control de sus dispositivos para mecanizar sus técnicas convencionales, se realizó la respectiva automatización del método volumétrico, así mismo, se acopló el montaje experimental teniendo en cuenta la reflexión y descripción crítica de los ajustes realizados en experiencias nacionales e internacionales, con el fin de obtener un rendimiento óptimo y veracidad en los resultados, por lo tanto, en la Figura 3 se evidencia el diseño automatizado del método volumétrico y su respectiva elaboración.

Figura 3

Diseño y elaboración del montaje experimental



La modelación representada en la parte superior de la Figura 3 se realizó a través del software Tinkercad, ya que es una herramienta gratuita que no presenta mayor complejidad en su manejo, su diseño está orientado según lo propuesto por Torres y Pérez (2010); no obstante, se llevó a cabo la respectiva automatización mediante la implementación de los sensores de temperatura y distancia, además de la placa electrónica y en la parte inferior de la Figura 3 se encuentra el montaje experimental basado en el diseño realizado previamente.

La configuración se compuso por un reactor de tipo biológico (Reactor 1), el cual consta de una tapa que se encuentra adherida herméticamente con una manguera de plástico de 5 milímetros de diámetro y 60 centímetros de longitud, que conecta el reactor 1 con el reactor 2, y un sensor de temperatura de modelo Ds18b20, la ubicación del reactor biológico está en la parte superior, ya que Torres y Pérez (2010) manifiestan que aplicando esta estrategia se evitan afectaciones por presiones negativas, al igual que posicionar la manguera que se encuentra en el reactor 2 en forma de U inversa, debido a que esta cumple la función de efecto sifón, dificultando el paso de hidróxido de sodio (NaOH), sustancia que se encuentra en el reactor 2 y cuya función es neutralizar el dióxido de carbono (CO₂) producido a partir de la etapa metanogénica de los microorganismos encontrados en el reactor biológico y con ello dar paso a la acumulación de metano (CH₄).

Partiendo de lo anterior, el reactor 2 se encuentra ubicado en un nivel más bajo que el reactor biológico sobre un soporte de madera, y su posición a diferencia del reactor 1 es invertida, es decir, a 180°, ya que es de fácil acceso para realizar las respectivas conexiones e impedir daños en la estructura del reactor, también tiene adherida en la parte inferior una aguja hipodérmica, la cual, según Salazar et al. (2016), permite el goteo paulatino y de forma gradual del hidróxido de sodio (NaOH) sobre la probeta.

Determinación de cantidades de materias primas generadoras de metano

Para llevar a cabo la producción de metano a partir del método volumétrico se utilizó el 80 % del volumen útil del reactor, con el fin de no sobrecargarlo y garantizar el eficiente contacto entre la biomasa y el sustrato, donde el 30 % corresponde a residuos de origen animal, puesto que en estos se encuentra mayor contenido de microorganismos metanogénicos, especialmente en el estiércol de cuy, tal como lo afirma De la Cruz y Bolaños (2015), sin embargo, el estiércol de gallina presenta alto contenido de nutrientes necesarios para lograr el arranque.

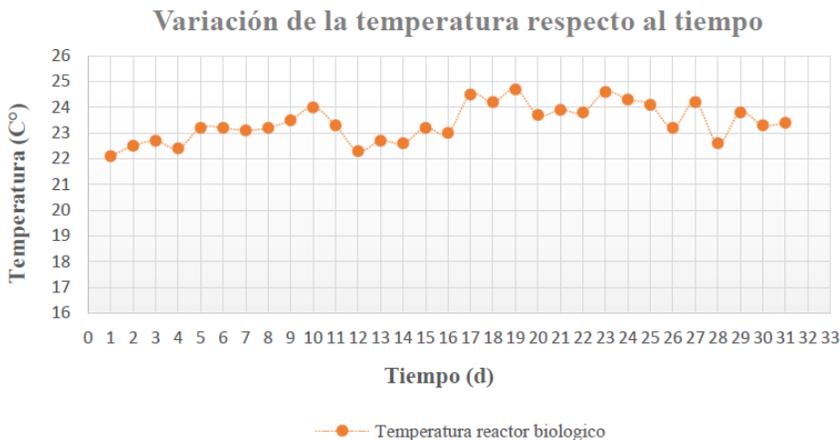
Una de las características de los residuos escogidos es que al ser sometidos a digestión anaerobia producen metano, sin embargo, hay que tener en cuenta las características bioquímicas que estos presentan, pues de ello depende el desarrollo óptimo y generación de actividad microbiana en el medio anaerobio. Según Sallo (2014), para que se dé la actividad microbiana no solo se requiere de fuentes de carbono y nitrógeno, sino también de un equilibrio de sales minerales como azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, etc., elementos que se presentan de manera adecuada en los residuos de origen animal, especialmente en el estiércol de cuy y gallina. Castillo (2016) expresa que el estiércol de gallina es el que presenta mayor estabilidad de producción de metano en comparación del estiércol de vaca y cerdo; ahora bien, para tener la cantidad de nutrientes requeridos por las bacterias metanogénicas, se llevó a cabo la mezcla con residuos de origen vegetal como lo es el rastrojo de maíz, el cual es caracterizado por ser rico en nutrientes y tener una relación de carbono-nitrógeno considerable; sin embargo, debido a que la relación de carbono-nitrógeno del rastrojo de maíz presenta 10 unidades de carbono más de las establecidas por la FAO (2011), se realizó la mezcla con estiércol de gallina, ya que su contenido de nitrógeno es relativamente más alto que el de carbono, debido a que sus plumas contienen queratina, las cuales están compuestas principalmente de nitrógeno, esto permite cantidades adecuadas y complementarias.

Variación de la temperatura del reactor biológico respecto al tiempo

Según Lorenzo y Obaya (2005), la temperatura es un parámetro decisivo para la digestión anaerobia, pues de esta depende las velocidades de reacción de cada etapa realizada en este proceso por los microorganismos, por lo anterior, se tomó registro de la temperatura del reactor biológico respecto al tiempo, a través del sensor de temperatura Ds18b20 (ver Figura 4).

Figura 4

Variación de la temperatura respecto al tiempo



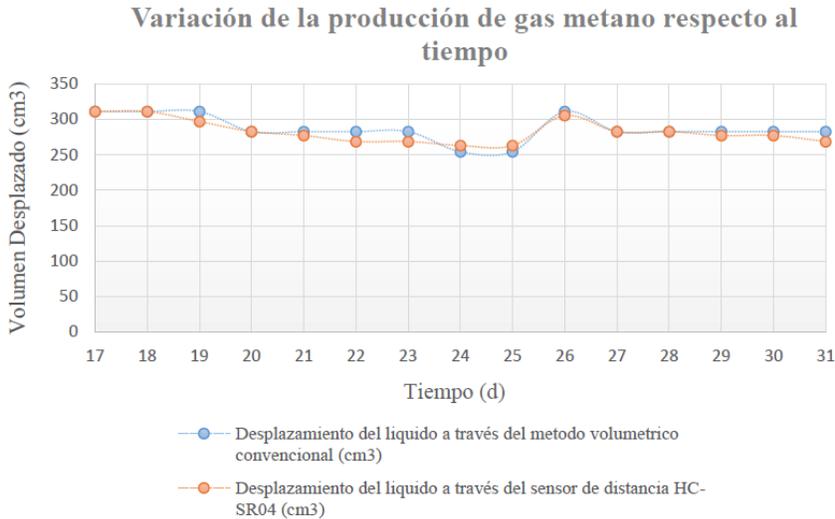
Como se observa, la temperatura del reactor biológico está en un rango de 22 °C a 24.7 °C, de acuerdo con Aguilar et al. (2014), los rangos óptimos donde se efectúa satisfactoriamente la digestión anaerobia es en la temperatura mesofílica, es decir, entre 20 °C y 45 °C, y termofílica entre 45 °C y 60 °C; sin embargo, Mejía (1996) manifiesta que la temperatura óptima para el desarrollo de microorganismos metanogénicos está entre los 35 °C y 55 °C, por lo tanto, se programó la placa Arduino Mega en un rango de temperatura que va desde los 20 °C a los 35 °C. Teniendo en cuenta lo anterior, la presente investigación se realizó con una temperatura mesofílica, a causa de que el calentamiento del reactor biológico estaba dado por una resistencia de calefacción de agua de 127 voltios, la cual no podía estar sumergida en agua todo el tiempo, ya que existiría un proceso de ebullición, por ende, se dio la variación de temperatura desde el día 1 hasta el día 31, puesto que no se tenía control absoluto de la resistencia.

Variación de la producción de gas metano respecto al tiempo

Para evaluar el proceso de digestión anaerobia se determinó la variación de la producción de gas metano en un tiempo determinado y en un rango de temperatura establecido (ver Figura 5).

Figura 5

Variación de la producción de gas metano respecto al tiempo



Teniendo en cuenta la Figura 5, la variación de producción de gas metano inició a partir del día 17, es decir, que antes del día 17 no se presentó ningún goteo que represente la producción de metano, puesto que los microorganismos deben primero pasar por un proceso de bioestabilización, el cual consiste en un tiempo de activación de los grupos bacterianos durante el proceso de digestión, donde uno de los factores más importante para que se dé dicha activación es la temperatura óptima, que permite estabilizar su tasa de crecimiento celular máximo (Mae-wan, 2008), este puede tener un periodo de 7–20 días, tiempo durante el cual se espera que se presente la producción de metano (Owen et al., 1978). Por lo tanto, los tiempos en los que se inicia las primeras obtenciones de metano se encuentran en los rangos adecuados de producción; sin embargo, este proceso se podría acelerar mediante mantas térmicas que permitan mantener la temperatura del reactor estable.

Análisis estadístico de concentraciones de metano obtenidos por la aplicación del dispositivo electrónico y las reportadas por el método volumétrico convencional

Inicialmente, para la comparación de resultados se toman muestras diariamente entre las 3:00 y 4:00 de la tarde, se toma este rango de horas porque la temperatura en horas de la mañana o noche tiende a ser muy baja, lo que afecta el proceso de generación de metano, teniendo en cuenta que es necesario tener un intervalo de temperatura óptimo para el crecimiento de los metanógenos y la producción de biogás que se dé entre los 20 °C a 30 °C. Por lo tanto, se logró obtener un total de 15 muestras desde el primer día de goteo.

Para lograr un análisis óptimo entre los datos de concentraciones de metano obtenidos por la aplicación del dispositivo electrónico y las reportadas por el método volumétrico

convencional, se realizaron pruebas estadísticas, entre ellas la prueba de normalidad de datos.

Figura 6

Prueba de normalidad programa SPSS

	Metodos	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk			
		Estadístico	o	gl	Sig.	Estadístico	o	gl
o	C_Metan	convencion	,295	15	,001	,857	15	,022
	al	sensores	,316	15	,000	,790	15	,003

a. Corrección de significación de Lilliefors

Teniendo en cuenta que para el método de prueba se cuenta con menos de 50 datos, se observa la tabla de Shapiro-Wilk; en este caso, nos concentraremos en la columna de la Sig. Si Sig. > 0.05, se acepta H0; Si Sig. < 0.05, se acepta H1. En este caso, para cada método de prueba se acepta H1. De lo anterior, se puede determinar que, si los datos se distribuyen normalmente, se puede proceder con la prueba de homocedasticidad, de lo contrario se debe proceder con otro tipo de pruebas de normalidad, conocidas como pruebas NO paramétricas. Para este caso se procede con el análisis de pruebas No paramétricas (ver Figura 7), debido a que estas técnicas se utilizan con frecuencia, puesto que existen muchas variables que no siguen las condiciones de parametricidad (Silvente y Rubio, 2012), para este caso es la distribución normal de las muestras.

Figura 7

Prueba de NO paramétricas programa SPSS

	C_Metan
	o
U de Mann-Whitney	99,000
W de Wilcoxon	219,000
Z	-,603
Sig. asintótica(bilateral)	,546
Significación exacta	,595 ^b
[2*(sig. unilateral)]	

a. Variable de agrupación: Metodos

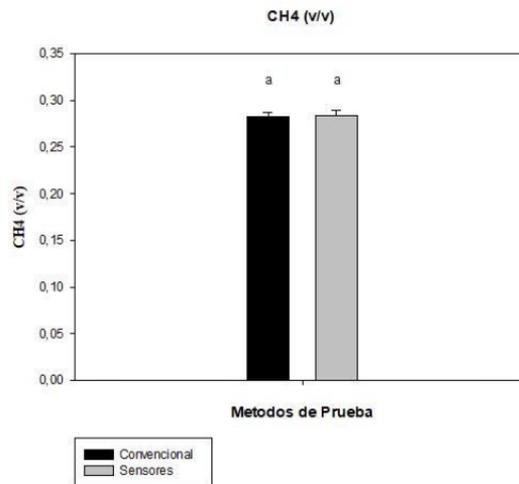
b. No corregido para empates.

Para las pruebas NO paramétricas, se determinó que la prueba que más se ajusta al estudio es la prueba de U de Mann-Whitney, porque esta se usa principalmente para comprobar la heterogeneidad entre muestras (Rivas-Ruiz et al., 2013). Por lo tanto, el valor de significancia es mayor a 0.005, aceptando así H_0 ; por lo cual, se pudo determinar que la diferencia entre el método volumétrico convencional y el método con implementación de sensores estadísticamente no es significativa.

Por otra parte, en la Figura 8 se representa mediante un gráfico de barra simple si los métodos implementados presentan diferencias entre ellos.

Figura 8

Diagrama de barras por métodos de prueba programa SPSS



Como se evidencia en la Figura 8, se logró determinar nuevamente que el método convencional y el método por implementación de sensores obtuvo letras iguales en cada barra, lo cual establece que no hay diferencia entre los dos métodos. Se logró verificar que, al igual que la prueba de normalidad y las NO paramétricas, los resultados no presentan diferencias entre sí, es decir, que el método con implementación de sensores si genera resultados verídicos y precisos en cuanto al método volumétrico convencional. Por lo tanto, se determinó que sí es posible realizar la atomización de este método. Esto se debe principalmente a la exactitud de los datos obtenidos, sobre todo en el método convencional, ya que este al ser un método manual permite identificar valores que pueden ser afectados por variaciones con el medio físico. Por lo contrario, el sensor ultrasónico está programado para generar resultados más precisos enfocados solo en los reactores.

Conclusiones

La adquisición e implementación de dispositivos electrónicos de bajo costo como sensor de temperatura Ds18b20, sensor de distancia ultrasónico HC-SR04 y placa Arduino Mega son una opción viable para la automatización de métodos convencionales, ya que cambian contextos que han presentado diferentes problemáticas, potencializan sus estrategias de trabajo, gestionan un desarrollo sustentable y reducen costos de inversión y mantenimiento.

Para lograr mayor eficiencia en la sistematización del método volumétrico es necesario tener una fuente de control de temperatura para evitar cambios bruscos e inhibir el proceso metanogénico, además, es indispensable el uso de laboratorio para realizar los análisis requeridos al momento de establecer la biomasa que se utilizará para el arranque del reactor biológico.

La sistematización del método volumétrico abre una amplia brecha para el desarrollo de prácticas educativas, donde estudiantes de diversos programas de la Facultad de Ingeniería podrán socializar la generación del gas en los laboratorios, como también el montaje y la respectiva programación de dispositivos electrónicos de bajo costo.

La utilización de los dispositivos electrónicos de bajo costo empleados permitió una óptima automatización del método volumétrico convencional para la obtención de concentración de metano, debido a que este proceso permite reducir la complejidad de los mecanismos manuales, los cuales pueden presentar más fallas en el proceso.

Referencias

- Alvarado, D. y Rodríguez, J. (2016). *Diseño e implementación de un sistema de medición de volumen basado en un sensor ultrasónico con monitoreo y control desde un Smartphone* (tesis de pregrado, Universidad Autónoma del Estado de México). RI. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/68843>
- Cambroner, M. (2017, 15 de junio). Modelado y Análisis Formal del Protocolo de Comunicación de Sensores One Wire [Diapositivas]. <http://web.fdi.ucm.es/posgrado/conferencias/MariaEmiliaCambroner2017-slides.pdf>
- De la Cruz, C. y Bolaños, D. (2015). *Estudio de la generación de biogás a partir del estiércol del cuy en la vereda Los Lirios, corregimiento de Mapachico* (tesis de pregrado, Universidad Mariana).
- Facultad de Matemáticas, Astronomía y Física UNC (FaMAF). (2013). Calibración de Termómetros Física General II (Guía de trabajo práctico N.º 1). <https://www.famaf.unc.edu.ar/~pury/docencia/FG2-2013/lab01.pdf>

- Lorenzo, Y. y Obaya, M. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar ICIDCA*, XXXIX(1), 35-48. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659006.pdf>
- Mac-wan, H. (2008). Biogas bonanza for third world development. *Institute of science in society*, 27, 29-30.
- Márquez, J. (2012). III. Características Estáticas de Sistemas e Instrumentos. <http://www.academicos.ccadet.unam.mx/jorge.marquez/cursos/Instrumentacion/CaracteristicasEstaticas.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2011). *Manual del Biogás*. <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- Rivas-Ruiz, R., Moreno-Palacios, J. y Talavera, J. (2013). Investigación clínica XVI diferencias de medianas con la U de Mann-Whitney.
- Salazar, T., Vaquerano, N. y Porras, M. (2016). *Cuantificador automático de metano para la estimación del potencial energético de un sustrato celulósico* (Informe final de Proyecto, Tecnológico de Costa Rica). Repositorio TEC. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6844>
- Sallo, P. (2014). *Producción de biogás a partir de desechos sólidos orgánicos que se generan en el mercado central del Cantón Arenillas* (tesis de pregrado, Universidad Técnica de Machala). <http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/2798/3/CD0000-12-TRABAJO%20COMPLETO.pdf>
- Sanabria, J., Durán, M. y Gutiérrez, N. (2012). Comparación de dos métodos de medición de actividad metanogénica específica en reactores anaerobios aplicados al tratamiento de vinazas. *Ingeniería y Región*, 9, 75–82. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5432235>
- Sierra, D. A. (2014). *Propuesta de nuevas prácticas de la materia microcontroladores utilizando la placa arduino mega 2560 como complemento y mejora del curso actual* (tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica del Litoral). Spol. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/41671>
- Silvente, V. y Rubio, M. (2012). Clasificación de pruebas no paramétricas. Cómo aplicarlas en SPSS. *Revista REIRE*, 5(2), 101-113.
- Torres, P. y Pérez, A. (2010). Actividad metanogénica específica: una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 9, 5-14. <https://www.redalyc.org/pdf/2311/231116434001.pdf>