

Design of an Automated Biodigester with Sensor Monitoring for Renewable Energy Generation in Cajamarca, Perú

Pérez-Mantilla Rodrigo Alexander¹ , Estudiante de Ingeniería Industrial¹; Quiroz-Cabrera Erika Alexandra² , Estudiante de Ingeniería Industrial²; Rodríguez-Sánchez Angel Fabricio³ , Estudiante de Ingeniería Industrial³, Valdivia - Vargas Liz Jeanetta⁴ , Magíster e Ingeniera de Sistemas⁴

¹⁻⁴Universidad Privada del Norte, Perú, n00326820@upn.pe, n00327433@upn.pe, n00322503@upn.pe, liz.valdivia@upn.edu.pe

Abstract– *The present research aimed to design an automated biodigester prototype capable of transforming organic waste into biogas through the integration of monitoring sensors, with the purpose of evaluating its energy performance in an electrical charging system and promoting the use of renewable energy in rural and educational contexts. A non-applied approach with a pre-experimental design was used, considering rural households, small producers, and educational institutions in the Cajamarca region as the target population. A sample of 107 participants was selected through non-probabilistic sampling, to whom a SERVQUAL survey was applied to evaluate the acceptance of the proposed system. The prototype design included a main reactor, piping system, TMP36 temperature sensor and MQ-4 gas sensor, an Arduino UNO R3 board, and an LCD screen for data visualization. System validation was carried out through simulation on the Tinkercad platform, verifying readings within a simulated range of 0 to 143 ppm of methane. Likewise, MQ-4 sensor measurements recorded methane concentration values between 265 and 267 ppm, with an average of 266.13 ppm, showing stable performance. These results allowed concluding that the designed prototype represents a technically viable alternative for biogas production and sustainable energy use.*

Keywords: *automated biodigester, biogas, MQ-4 sensor, methane, renewable energy*

Diseño de un Biodigestor Automatizado con Monitoreo de Sensores para Generación de Energía Renovable en Cajamarca, Perú

Pérez-Mantilla Rodrigo Alexander¹ , Estudiante de Ingeniería Industrial¹; Quiroz-Cabrera Erika Alexandra² , Estudiante de Ingeniería Industrial²; Rodríguez-Sánchez Angel Fabricio³ , Estudiante de Ingeniería Industrial³, Valdivia - Vargas Liz Jeanetta⁴ , Magíster e Ingeniera de Sistemas⁴

¹⁻⁴Universidad Privada del Norte, Perú, n00326820@upn.pe, n00327433@upn.pe, n00322503@upn.pe, liz.valdivia@upn.edu.pe

Resumen. La presente investigación tuvo como propósito diseñar un prototipo de biodigestor automatizado capaz de transformar residuos orgánicos en biogás mediante la integración de sensores de monitoreo, con la finalidad de evaluar su rendimiento energético en un sistema de carga eléctrica y fomentar el uso de energías renovables en contextos rurales y educativos. Para ello, se empleó un enfoque de tipo no aplicado con diseño preexperimental, considerando como población objetivo a hogares rurales, pequeños productores e instituciones educativas de la región Cajamarca. Se trabajó con una muestra de 107 participantes, seleccionados mediante muestreo no probabilístico, a quienes se aplicó una encuesta SERVQUAL para evaluar la aceptación del sistema propuesto. El diseño del prototipo incluyó un reactor principal, sistema de tuberías, sensores de temperatura TMP36 y gas MQ-4, una placa Arduino UNO R3 y una pantalla LCD para la visualización de datos. La validación del sistema se realizó mediante simulación en la plataforma Tinkercad, verificando lecturas en un rango simulado de 0 a 143 ppm de metano. Asimismo, las mediciones del sensor MQ-4 registraron valores entre 265 y 267 ppm, con un promedio de 266.13 ppm, evidenciando un comportamiento estable. Estos resultados permitieron concluir que el prototipo representa una alternativa técnica viable para la producción de biogás y el aprovechamiento energético sostenible.

Palabras claves: biodigestor automatizado, biogás, sensor MQ-4, metano, energías renovables.

I. INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo, la electricidad ha sido un recurso esencial para el desarrollo humano, pues sostiene tanto la vida cotidiana como las actividades productivas y económicas. Sin embargo, la creciente demanda energética y los efectos del cambio climático han evidenciado la necesidad de transitar hacia fuentes más limpias y sostenibles. En esta línea, el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS 7) de la ONU busca garantizar el acceso universal a energía asequible, segura y no contaminante; no obstante, factores como la pandemia de COVID-19 y los conflictos mundiales han encarecido los combustibles fósiles y agravado la pobreza energética en regiones vulnerables como Latinoamérica [1].

En el plano internacional, la producción de biogás a partir de residuos alimenticios constituye una alternativa prometedora, al permitir la conversión de desechos en

energía renovable y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, integrando la gestión de residuos con los principios de la economía circular [2]. Estos avances evidencian que las energías renovables representan no solo una opción ambientalmente responsable, sino también una estrategia viable para diversificar la matriz energética mundial.

El Perú enfrenta importantes retos en su transición energética, dado que las energías renovables representan un bajo porcentaje de la matriz nacional, manteniéndose una alta dependencia de combustibles fósiles como el diésel, el gas natural y la leña. A pesar de la existencia de programas como BonoGas y políticas de eficiencia energética, su impacto es reducido debido a obstáculos económicos e institucionales, además de la electrificación a través de sistemas autónomos [3]. En este contexto, diversos estudios resaltan la importancia del uso de sensores en sistemas energéticos, demostrando que la medición de variables como temperatura, voltaje y concentración de gases resulta fundamental para optimizar el rendimiento y la estabilidad de estos sistemas, especialmente en entornos rurales [4].

A nivel local, la región Cajamarca ha impulsado proyectos de gestión de residuos sólidos con potencial para la generación de biogás, siempre que se apliquen modelos de estimación confiables y se fortalezcan los instrumentos técnicos y financieros [5]. Estas iniciativas ponen en evidencia la necesidad de integrar tecnologías renovables con sistemas de monitoreo que permitan evaluar su desempeño energético y técnico en contextos específicos.

Frente a este panorama, en diversas zonas rurales y entornos educativos persiste una limitada disponibilidad de energía eléctrica, lo que afecta el desarrollo de actividades académicas y productivas. Estudiantes de instituciones educativas enfrentan dificultades para disponer de puntos de carga suficientes para dispositivos electrónicos como celulares, laptops o tabletas, los cuales resultan fundamentales para el acceso a la información y el desarrollo de actividades formativas [6]. Esta situación evidencia la necesidad de explorar alternativas tecnológicas orientadas a la generación distribuida de energía.

En el presente trabajo se propone el diseño de un prototipo de biodigestor automatizado para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos, incorporando sensores que permitan el monitoreo de variables del proceso y el análisis de su funcionamiento. El sistema se orienta a evaluar, a nivel experimental, su capacidad para alimentar un sistema de carga eléctrica, permitiendo analizar su desempeño técnico y su potencial como alternativa energética sostenible en contextos rurales y educativos [7].

La investigación tiene como objetivo general diseñar un prototipo de biodigestor capaz de transformar residuos orgánicos en biogás, integrando sensores de monitoreo para evaluar su rendimiento energético en un sistema de carga eléctrica. Para ello, se plantea el desarrollo del diseño estructural y funcional del prototipo, la incorporación de sensores de temperatura y gas, y el análisis de su comportamiento bajo condiciones experimentales, permitiendo validar su viabilidad técnica como alternativa energética.

II. METODOLOGÍA

La investigación se clasifica como de tipo no aplicado y diseño preexperimental, enfocándose en el desarrollo y evaluación de un prototipo mediante la observación de variables en una unidad de estudio, sin grupo de control ni asignación aleatoria. La población objetivo incluye hogares rurales, pequeños productores e instituciones educativas de la región Cajamarca, potencialmente interesados en la implementación de un biodigestor automatizado para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos. Con el propósito de ilustrar el contexto real donde hay mayor concentración de residuos orgánicos, se incluye un registro fotográfico referencial de la planta residual de Cajamarca, el cual se presenta en el **Anexo A**.

Se encuestó a una muestra de 107 participantes (hogares rurales, instituciones educativas y productores) calculada con un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 5%, considerando una población estimada de 255,000 hogares rurales en la región [8]. El muestreo empleado fue de tipo no probabilístico, seleccionando participantes pertenecientes a instituciones educativas y hogares en las zonas rurales.

En cuanto al diseño del prototipo, se presenta un reactor principal de 200 litros, fabricado en HDPE o acero inoxidable 304, complementado por un tanque de alimentación, tuberías de PVC y una bolsa flexible de poliuretano para el almacenamiento del biogás. Para el monitoreo continuo del proceso, se integran un sensor de temperatura (TMP36) y un sensor de gas (MQ-4), que simula la detección de metano.

Estos sensores envían información a una placa de control Arduino UNO R3, la cual procesa los datos y los muestra en una pantalla LCD 16x2. Adicionalmente, el sistema

incluye componentes como potenciómetros para calibración, resistencias y un interruptor. Se considera la integración futura de un módulo ESP32 para transmisión inalámbrica (IoT), lo que permitiría un monitoreo remoto más avanzado. El costo total estimado para la construcción de este prototipo es de S/ 1,459, lo que representa una inversión inicial moderada. Además, se contemplaron actividades básicas de mantenimiento preventivo, como la limpieza periódica del reactor, revisión de válvulas y verificación del estado de los sensores, con el fin de garantizar el funcionamiento continuo del sistema.

El sistema de control y automatización se basa en la programación del Arduino UNO R3 para interpretar las señales de los sensores, permitiendo convertir voltajes a unidades físicas y generar alertas. El circuito opera con una fuente virtual de 5V, en condiciones reales, el sistema puede alimentarse mediante una batería auto recargable de 12V conectada a un regulador de voltaje, permitiendo el funcionamiento continuo del microcontrolador y los sensores. Por otra parte, en lo referente a las medidas de seguridad, el diseño incluye filtros para H₂S, válvulas de alivio de presión, extintores de CO₂ y equipo de protección personal (EPP), complementado por procedimientos operativos claros para la gestión de riesgos.

La validación del sistema se llevó a cabo en dos etapas. En primer lugar, se realizó una simulación en la plataforma Tinkercad, donde se modeló el circuito y la lógica de actuación, validando la lectura de sensores (0 a 143 PPM de metano simulado) y su visualización en LCD (Figuras 1-5). Por consiguiente, se aplicó una encuesta SERVQUAL a los 107 usuarios potenciales para evaluar la aceptación, confiabilidad y facilidad de uso, con un análisis descriptivo de los datos consolidados. De igual manera, se deben tomar en cuenta factores ambientales como la temperatura, el nivel de humedad y las condiciones de operación, ya que estos elementos pueden afectar el proceso anaerobio y la producción de biogás en condiciones reales. Asimismo, se incluye una capacitación técnica dirigida a los usuarios, orientada al uso adecuado del biodigestor, la supervisión básica de los sensores, la lectura de la información en pantalla y la aplicación de medidas de seguridad.

III. RESULTADOS

En la región Cajamarca se determinó que uno de los principales desafíos que limita el progreso de las comunidades rurales está vinculado a la escasa disponibilidad de energía eléctrica. Con el propósito de examinar esta situación, se aplicó una encuesta dirigida a los potenciales usuarios del biodigestor automatizado. En total se recopilieron 107 formularios válidos, utilizando una versión modificada del modelo SERVQUAL, conformada por cinco dimensiones tradicionales y un ítem de aceptación global. La TABLA I presenta los indicadores principales: promedio (escala de 1 a 5), desviación estándar (DE), porcentaje de respuestas “de acuerdo/muy de acuerdo”

(≥ 4) y la brecha respecto a la meta establecida de 4.0, considerada como el valor mínimo de aceptación esperada en la evaluación del biodigestor automatizado como alternativa sostenible de generación energética.

TABLA I
RESULTADOS SERVQUAL

Ítem (Dimensión)	Media 1-5	Desv. est.	% ≥ 4	Brecha vs. meta ≥ 4	Lectura clave
Produce biogás de manera constante. (Confiabilidad)	4.35	0.61	91%	+0.35	Alta estabilidad en la generación de biogás.
Responde rápido ante variaciones internas. (Capacidad de respuesta)	4.22	0.59	88%	+0.22	Buena eficiencia del sistema automatizado
Opera sin riesgos ni fugas. (Seguridad)	4.48	0.53	94%	+0.48	Elevada confianza en la seguridad operativa.
Es fácil de usar y comprender. (Empatía)	4.12	0.64	85%	+0.12	Interfaz sencilla, requiere mínima instrucción.
Materiales y diseño son adecuados. (Aspectos Tangibles)	4.43	0.57	92%	+0.43	Diseño resistente y apropiado para zonas rurales.
Es viable implementarlo en la comunidad.	.29	.55	0%	0.29	Buena aceptación del sistema como alternativa energética.

Los resultados evidenciaron una alta aceptación del prototipo de biodigestor automatizado, con una valoración promedio de 4.31 puntos y cerca del 90 % de opiniones favorables entre los participantes. El criterio mejor calificado fue la seguridad del sistema (4.48), evidenciando confianza en las medidas preventivas implementadas para evitar fugas o fallos; seguido por la resistencia estructural y calidad de materiales (4.43), lo que destacó la adecuación del diseño frente a las condiciones rurales de Cajamarca. Asimismo, la estabilidad operativa (4.35) confirmó el cumplimiento de su función principal de generar biogás de forma continua, mientras que los criterios de eficiencia de respuesta (4.22) y facilidad de uso (4.12), aunque positivos, señalaron oportunidades de mejora en la calibración de sensores y la comprensión de la interfaz por usuarios no especializados. Finalmente, la

aceptación general (4.29) reflejó una actitud favorable hacia la implementación del biodigestor como fuente alternativa de energía limpia, respaldando en conjunto la viabilidad técnica y social del sistema y su potencial para contribuir al acceso energético sostenible en contextos rurales y educativos de Cajamarca.

Con el propósito de verificar estadísticamente el grado de aceptación del prototipo de biodigestor automatizado, se empleó la prueba t de Student para una muestra. La hipótesis nula (H_0) planteó que el promedio del nivel de aceptación del sistema es menor o igual a 4 en la escala SERVQUAL ($\mu \leq 4$), mientras que la hipótesis alternativa (H_1) propuso que el promedio del nivel de aceptación es superior a 4 ($\mu > 4$), lo cual evidenciaría una elevada aceptación del sistema por parte de los usuarios.

Para llevar a cabo el análisis estadístico, se utilizaron los datos obtenidos de la encuesta SERVQUAL, la cual fue aplicada a 107 participantes. A partir de estos resultados, se calculó una media muestral de 4.31 y una desviación estándar aproximada de 0.58. Además, se consideró como media hipotética un valor de referencia igual a 4.

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$$

t = valor estadístico calculado

$\bar{x}$ = media muestral

μ_0 = media hipotética o valor de referencia

s = desviación estándar de la muestra

n = número de datos o tamaño de la muestra

$$t = \frac{4.31 - 4}{0.58/\sqrt{107}}$$

$$t = \frac{0.31}{0.056}$$

$$t = 5.54$$

El valor crítico de t fue determinado mediante la TABLA II de distribución t de Student, considerando 106 grados de Libertad ($n - 1$), obtenidos a partir del tamaño de muestra de 107 participantes. Asimismo, se asumió un nivel de confianza del 95 % y la aplicación de una prueba unilateral, en concordancia con la hipótesis alternativa planteada ($\mu > 4$).

TABLA II

VALOR CRÍTICO T STUDENT

Grados de libertad (gl)	Nivel de significancia (α)	Tipo de prueba	t crítico
106 (≈ 100)	0.05	Unilateral	1.66

El valor t crítico se obtuvo a partir de la tabla de distribución t de Student, considerando 106 grados de libertad, un nivel de significancia de 0.05 y una prueba unilateral, obteniéndose un valor de 1.66.

$$T_{calculado} > T_{crítico}$$

$$5.54 > 1.66$$

Los resultados evidenciaron que el nivel de aceptación del prototipo superó el valor de referencia definido en la escala SERVQUAL, lo que refleja una valoración positiva por parte de los usuarios y respalda la viabilidad del biodigestor automatizado como una alternativa energética aplicable en entornos rurales y educativos.

Para verificar el funcionamiento del sistema automatizado de monitoreo y control del biodigestor, se realizó una simulación en la plataforma Tinkercad utilizando un Arduino UNO como unidad principal de control. En este entorno virtual se integraron los sensores esenciales: sensor de gas (MQ-4) y sensor de temperatura (DHT11), conectados a una pantalla LCD 16×2 que permitió visualizar las mediciones en tiempo real.

U1	1	Arduino Uno R3
U3	1	LCD 16 x 2
Rpot1 Rpot2 Rpot3	3	250 kΩ Potentiometer
GAS1	1	Gas Sensor
R1	1	20 kΩ Resistor
S1	1	Slideswitch
U2	1	Temperature Sensor [TMP36]
R2	1	220 Ω Resistor
R3	1	1.8 kΩ Resistor

Fig. 1 Listado de los componentes físicos virtuales

En la simulación que se realizó en la plataforma Tinkercad, se implementó el circuito electrónico del sistema automatizado del biodigestor utilizando un Arduino UNO R3 como controlador principal. La Figura 2 muestra la lista de componentes empleados, entre los que destacan el sensor de gas (MQ-4), encargado de medir la concentración de metano (CH₄), y el sensor de temperatura (TMP36), que permitió registrar la variación térmica interna del sistema. Además, se integraron potenciómetros de 250 kΩ para la calibración del sensor y ajuste del contraste del LCD 16×2, donde se visualiza en tiempo real las lecturas de temperatura, presión y concentración de gas. El circuito se complementa con resistencias de protección y un interruptor deslizante para el control del encendido.

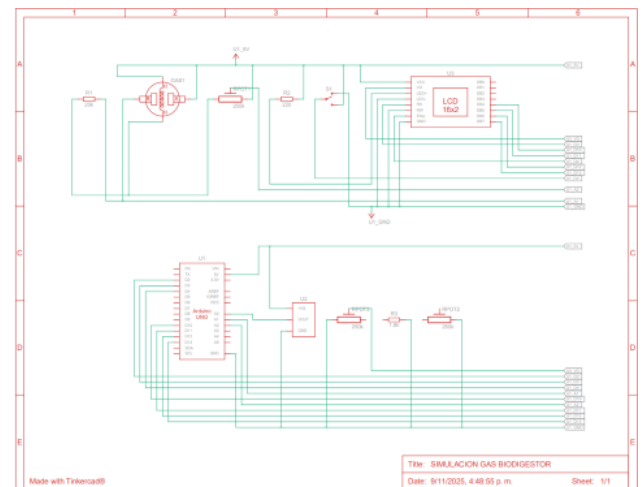


Fig. 2 Diagrama esquemático del circuito

La Figura 3 muestra el diagrama esquemático del sistema automatizado del biodigestor, elaborado en Tinkercad para validar la conexión y funcionamiento de los componentes.

El Arduino UNO R3 actuó como unidad de control central, recibiendo las señales del sensor de gas (MQ-4) conectado al pin A0 y del sensor de temperatura (TMP36) al pin A1. El LCD 16×2 se comunica con el microcontrolador a través de los pines digitales D7–D12, mientras que los potenciómetros de 250 kΩ permiten ajustar la sensibilidad de los sensores y el contraste de la pantalla. Además, se incluyen resistencias para protección de los componentes y un interruptor deslizable (S1) que controla el encendido del sistema. Este diseño permitió la lectura y visualización simultánea de las variables críticas del biodigestor, garantizando estabilidad y precisión en la simulación.

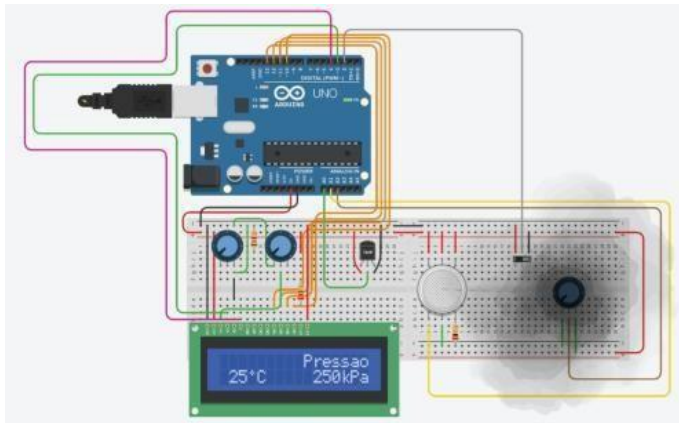


Fig. 3 Montaje del circuito en protoboard

La Figura 4 muestra la simulación funcional del circuito del biodigestor automatizado en Tinkercad, donde el Arduino UNO R3 procesa las señales analógicas del sensor de gas MQ-4 y del sensor de temperatura TMP36. El primero mide la concentración de metano (CH₄) y el segundo registra la temperatura interna, cuyos valores se visualizan en tiempo real en la pantalla LCD 16×2. Los potenciómetros de 250 kΩ permiten calibrar la sensibilidad del sensor y ajustar el contraste del LCD para mejorar la lectura. En la simulación se muestran valores de 25 °C y una presión equivalente de 250 kPa, esta última simulada en el código para representar la acumulación de biogás. Este montaje permite comprobar la correcta lectura de las variables críticas y la comunicación estable entre los sensores, el microcontrolador y la interfaz de salida, validando la eficiencia del sistema propuesto.

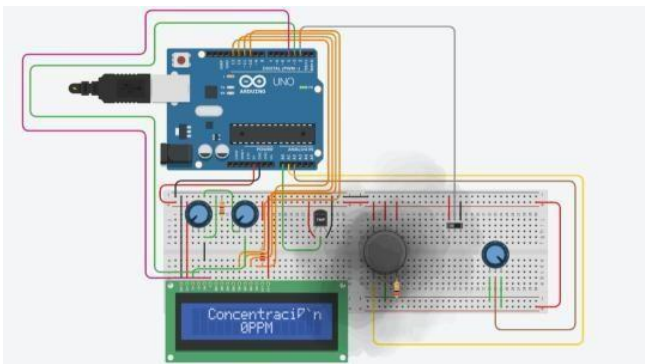


Fig. 4 Lectura inicial de 0 PPM en el LCD.

Se muestra el montaje del circuito de simulación desarrollado en Tinkercad para el monitoreo automatizado del biodigestor.

El sistema está compuesto por una placa Arduino UNO, un sensor de gas (MQ-4), un sensor de temperatura (TMP36), tres potenciómetros de calibración y una pantalla LCD 16×2. En la fase inicial del ensayo, el LCD mostró 0 PPM, lo que representará el valor base o de referencia antes de que el sensor detecte la presencia de gas metano en el entorno.

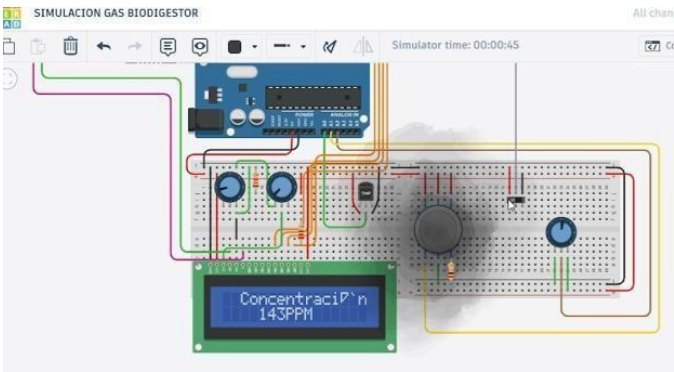


Fig. 5 Visualización del aumento de metano (143 PPM) en el LCD, respuesta activa del sensor MQ-4.

Se presentó el resultado de la simulación correspondiente a la detección de gas metano mediante el sensor MQ-4. El sistema registró una lectura de 143 PPM, lo que confirmó la respuesta del sensor ante el incremento de la concentración de metano simulado en el entorno. Este valor evidenció el correcto desempeño del circuito, verificando la calibración del sensor y la precisión del algoritmo de conversión implementado en el microcontrolador Arduino UNO. Asimismo, el resultado mostró la capacidad del sistema para identificar variaciones en la concentración de metano, lo que indica su estabilidad y su posible aplicación en condiciones reales de generación de biogás.

Con el propósito de verificar el funcionamiento del sistema de monitoreo del biodigestor, se realizaron mediciones experimentales utilizando el sensor MQ-4, el cual está diseñado para detectar concentraciones de metano (CH₄), gas predominante en el biogás generado durante el proceso anaerobio. Las lecturas fueron registradas bajo condiciones ambientales controladas, con una temperatura de 14 °C y una humedad relativa de 51 %, permitiendo evaluar la estabilidad y respuesta del sensor. A continuación, se presentan los valores obtenidos en la TABLA III durante las mediciones realizadas.

TABLA III
REGISTRO EXPERIMENTAL DEL SENSOR MQ-4

Nº de Lectura	Hora de Medición	Concentración de Metano (ppm)
1	14:45:51.777	267
2	14:45:52.106	267
3	14:45:52.405	267
4	14:45:52.692	266
5	14:45:52.992	267
6	14:45:53.280	266
7	14:45:53.580	266
8	14:45:53.911	265
9	14:45:54.205	266
10	14:45:54.500	266
11	14:45:54.797	265
12	14:45:55.095	266
13	14:45:55.395	266
14	14:45:55.690	267
15	14:45:56.014	265
PROMEDIO		266.13 ppm

Los resultados mostrados en la TABLA III evidencian que las mediciones realizadas por el sensor MQ-4 entre las 14:45:51 y 14:45:56 horas registraron valores de concentración de

metanos comprendidos entre 265 ppm y 267 ppm. La cercanía entre las lecturas obtenidas en intervalos consecutivos indica que el sensor mantuvo una respuesta continua durante el periodo de medición. Asimismo, el promedio calculado de 266.13 ppm refleja un comportamiento constante del sistema, permitiendo verificar la detección sostenida de metano durante el ensayo. El registro completo de las mediciones realizadas por el sensor MQ-4 se presenta en el **Anexo B** y **Anexo C**, donde se detallan los valores obtenidos durante el proceso experimental.

Con el fin de describir las condiciones de operación y los resultados obtenidos durante la medición del gas metano, se presenta en la TABLA IV un resumen de los parámetros registrados mediante el sensor MQ-4. Esta información incluye las condiciones ambientales, el número de mediciones realizadas y el valor promedio obtenido, permitiendo evidenciar el comportamiento general del sistema durante el proceso de monitoreo.

TABLA IV
FICHA TÉCNICA DEL ENSAYO DEL SENSOR MQ - 4

Elemento	Descripción
Sensor utilizado	MQ-4
Gas detectado	Metano (CH ₄)
Hora de medición	2:45 pm
Temperatura ambiental	14°C
Humedad relativa	51%
Número de mediciones	15
Lecturas registradas	265 - 267 ppm
Promedio obtenido	266.13 ppm
Estado del sistema	Funcionamiento estable

La información presentada en la TABLA IV permite observar que el ensayo se desarrolló bajo condiciones ambientales específicas de 14 °C de temperatura y 51 % de humedad relativa, realizándose un total de 15 mediciones, lo que contribuyó a obtener un valor promedio representativo de 266.13 ppm. El registro de estas condiciones, junto con el número definido de mediciones, respalda la validez del procedimiento experimental y proporciona un marco de referencia para futuras evaluaciones del sistema de monitoreo del metano en el biodigestor.

El prototipo de biodigestor automatizado tiene un costo total de S/ 1,459. Este costo se desglosa en tres componentes principales, según la TABLA V: el sistema físico, que representa el 52.8% del total; el sistema de conversión energética, que constituye el 37.7%; y el sistema electrónico, que abarca el 9.5% restante.

TABLA V
DISTRIBUCIÓN DEL COSTO DEL PROTOTIPO

Componente	Costo (S/.)	%
Sistema electrónico	139	9.5
Sistema físico	770	52.8
Sistema de conversión	550	37.7
Total	1459	100

Se proyecta que este prototipo genere ahorros mensuales de S/ 30 a S/ 50 y tenga un costo de mantenimiento insignificante (aproximadamente S/ 5-10 pormes), lo que resulta en un período de recuperación de la inversión de 2 a 3 años. Su rentabilidad se ve favorecida por la utilización de residuos orgánicos, eliminando la necesidad de adquirir insumos. En conjunto, la evidencia respalda la viabilidad económica del prototipo, que también ofrece importantes beneficios ambientales y energéticos en contextos rurales.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En comparación con estudios previos, como el de Karimi et al., este estudio introduce una solución innovadora para la producción de biogás. Si bien se coincide en la crucial importancia de controlar variables como la temperatura y la concentración de metano, nuestra propuesta se distingue por emplear un sistema de automatización accesible, desarrollado con Arduino UNO y sensores económicos. Este enfoque está especialmente diseñado para su aplicación en contextos rurales y educativos, democratizando el acceso a tecnologías complejas y adaptándolas a entornos con recursos limitados.

Los hallazgos demuestran que la integración de sensores y monitoreo en tiempo real no solo optimiza la eficiencia del biodigestor, sino que también simplifica su manejo para usuarios sin experiencia técnica. La pantalla LCD facilita la comprensión del proceso, mientras que el sensor MQ-4 confirma la fiabilidad del monitoreo al detectar variaciones en el metano. Asimismo, los registros experimentales del sensor MQ-4 evidenciaron una respuesta estable durante **15 mediciones consecutivas**, registrando valores entre **265 y 267 ppm**, con un promedio de **266.13 ppm**. Esta baja variabilidad entre lecturas indica una adecuada calibración del sistema y confirma la capacidad del sensor para realizar un monitoreo continuo y confiable del metano en el proceso de biodigestión. Además, la evaluación de la percepción del usuario mediante el modelo SERVQUAL arrojó resultados muy positivos.

confirmando una alta aceptación del sistema, validada estadísticamente. Esto subraya su potencial para ser implementado exitosamente en situaciones reales. Más allá de las implicancias técnicas y sociales, el sistema ofrece un beneficio económico significativo, al ser una alternativa de bajo costo que aprovecha recursos locales, reduce los gastos energéticos y operativos, permitiendo una recuperación rápida de la inversión. La eliminación de costos de insumos mejora aún más su rentabilidad y sostenibilidad a largo plazo. Estos resultados se alinean con estudios que señalan al biogás como una opción económica para zonas rurales, combinando eficiencia energética y aprovechamiento de residuos. En resumen, este sistema promueve la optimización de recursos, disminuye la dependencia de fuentes de energía externas y se presenta como un modelo replicable para comunidades con acceso limitado a la electricidad.

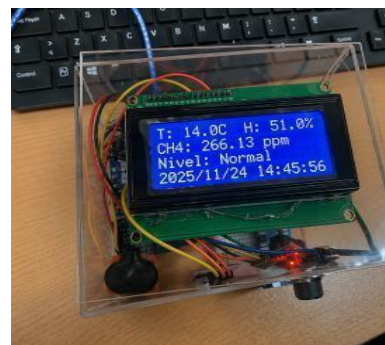
Sin embargo, es importante reconocer las limitaciones de este estudio para futuras investigaciones. La falta de un prototipo físico impide evaluar el rendimiento en condiciones operativas reales, como las fluctuaciones ambientales, la estabilidad del reactor o la capacidad de almacenamiento del biogás. Futuros trabajos deberán centrarse en validar la durabilidad de los materiales, la precisión de la calibración de los sensores y el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo. Superar estos obstáculos allanará el camino hacia un biodigestor completamente funcional y adaptable a las necesidades de las comunidades rurales.

V. CONCLUSIONES

En el presente estudio se logró diseñar un prototipo de biodigestor automatizado capaz de transformar residuos orgánicos en biogás mediante la integración de sensores de monitoreo que permiten evaluar su rendimiento energético en un sistema de carga eléctrica. El desarrollo del diseño estructural y funcional permitió establecer un sistema organizado que incorpora un sensor de temperatura TMP36 y un sensor de gas MQ-4 conectados a una placa Arduino UNO R3, lo que facilitó el control y monitoreo de variables críticas del proceso anaerobio. Asimismo, el análisis del comportamiento del sistema mediante simulaciones y pruebas experimentales evidenció un funcionamiento estable y una adecuada respuesta del sistema ante la detección de metano. Los resultados obtenidos, junto con la validación técnica y la aceptación de los usuarios, permitieron confirmar la viabilidad del prototipo como una alternativa energética sostenible, capaz de aprovechar residuos orgánicos y contribuir al acceso a energía renovable en contextos rurales y educativos.

REFERENCIAS

- [1] Navarrete-Baez, F., & Sulbaran, B. (2023). Latinoamérica ante el desafío de las Energías Renovables. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/373011759_Latinoamerica_ante_el_desafio_de_las_Energias_Renovables [Consultado: 17 septiembre 2025]
- [2] Karimi, K. et al. (2019). Biogas production from food wastes: A review on recent developments and future perspectives. *Bioresource Technology Reports*, 7, 100202. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100202> [Consultado: 17 septiembre 2025]
- [3] Colina-Calvo, A. O. (2024). A comprehensive review of Peru's energy scenario: advancing energy access, sustainability, and policy implications. *Revista Kawsaypacha Sociedad Y Medio Ambiente*, 14, D-006. <https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202402.d006> [Consultado: 17 septiembre 2025]
- [4] Cruz Ticona (2022). *Diseño e implementación de un sistema de monitoreo y adquisición de datos de parámetros eléctricos y ambientales de un sistema fotovoltaico conectado a la red de 3Kw*. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUNJ_b562bcd3be3ec5acd529d5a0dec9e12e?utm_source [Consultado: 17 septiembre 2025]
- [5] Rivadencira et al. (2024). Biogas in Cajamarca: A comprehensive approach to solid waste management and sustainable development. *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12600196> [Consultado: 17 septiembre 2025]
- [6] Carlos, V. R. J. (2022, November 30). *La brecha digital en las zonas altoandinas de la provincia de Cajabamba, región de Cajamarca, Perú*: <https://repositorio.flacsoandes.edu.ec/items/76ddf0b6-6772-4287-a5e0-79ed3871f238> [Consultado: 17 septiembre 2025]
- [7] Daniel, U. Y. J. (2019, March 15). Módulos autosustentables para la infraestructura educativa primaria en la zona rural de Cajamarca, distrito de Asunción. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/626350> [Consultado: 17 septiembre 2025]
- [8] *Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI*. (2024). Plataforma Del Estado Peruano. <https://www.gob.pe/inei/> [Consultado: 08 octubre 2025]



ANEXO C-COMPONENTES INTERNOS DEL PROTOTIPO



ANEXOS

ANEXO A-IMAGEN REFERENCIAL DE LA PLANTA RESIDUAL DE CAJAMARCA



ANEXO B-RECOLECCIÓN DE DATOS