

IOT Y CONTROL ELECTRÓNICO DE UN REACTOR ANAEROBIO SEMICONTINUO

IOT AND ELECTRONIC CONTROL OF A SEMI-CONTINUOUS ANAEROBIC REACTOR

Norma Graciela Silva Ortiz

Universidad Nacional de Asunción, Facultad Politécnica, Paraguay
norma.silva@pol.una.py

Ever Arnaldo Quiñonez González

Universidad Nacional de Asunción, Facultad Politécnica, Paraguay
ever.qg@pol.una.py

José Manuel Ortellado Cabañas

Universidad Nacional de Asunción, Facultad Politécnica, Paraguay
manujoselo97@fpuna.edu.py

Santiago Ezequiel Ozuna Cabrera

Universidad Nacional de Asunción, Facultad Politécnica, Paraguay
santiagoozuna@fpuna.edu.py

Recepción: 8/diciembre/2025

Aceptación: 28/diciembre/2025

Resumen

Este artículo presenta un sistema de automatización y monitoreo para un reactor anaerobio semicontinuo en laboratorio, orientado al proceso de digestión de lodos contaminantes en aguas residuales. El sistema controla la agitación, temperatura y toma de datos durante la etapa mesofílica de la producción de gas metano mediante el microcontrolador ESP32, sensores de *pH* y metano. Al finalizar el tiempo hidráulico, el sistema decanta, descarga el efluente, mide el *pH* y realiza una nueva carga para iniciar otro ciclo.

La medición del *pH* y metano se transmiten en tiempo real a una plataforma web y una aplicación móvil, además se visualiza en una pantalla LCD las fases del proceso. El proyecto desarrollado en conjunto con los grupos de investigación GIEM y GIBTA de la UNA ofrece gráficos, historial de datos con opción de exportar los datos en formato de hojas de cálculo con mediciones para análisis y toma de decisiones.

Palabras Clave: Aplicación móvil, automatización, biodigestor semicontinuo, IoT, supervisión remota.

Abstract

This article presents an automation and monitoring system for a laboratory-scale semicontinuous anaerobic reactor, focused on the digestion of sludge contaminants in wastewater. The system controls agitation, temperature, and data acquisition during the mesophilic stage of methane gas production using the ESP32 microcontroller, pH, and methane sensors. At the end of the hydraulic retention time, the system allows settling, discharges the effluent, measures pH, and performs a new loading to start another cycle. The pH and methane measurements are transmitted in real time to a web platform and a mobile application, and the process phases are also displayed on an LCD screen. The project, developed in collaboration with the GIEM and GIBTA research groups of UNA, provides graphs, historical data, and the option to export the data in spreadsheet format for analysis and decision-making.

Keywords: Automation, IoT, mobile application, real-time monitoring, semi-continuous biodigester.

1. Introducción

La digestión anaeróbica de lodos en aguas residuales es una tecnología eficiente para reducir la carga contaminante y generar biogás, principalmente metano y CO_2 , con beneficios ambientales y energéticos [Vivanco, 2019]. Los reactores semicontinuos permiten mantener la actividad de microorganismos metanogénicos mediante alimentación periódica [Urbina, 2024], aunque los consorcios microbianos son sensibles a variaciones de operación, lo que puede afectar la producción de biogás [Ambulkar, 2004]. Entre las variables críticas se incluyen temperatura, pH, sólidos totales y tipo de residuo [Igoni, 2008], [Castrillon, 2002].

En laboratorios y plantas piloto, el control de condiciones mesofílicas estables (30 – 38 °C) y la alimentación periódica son esenciales para mantener la eficiencia microbiana [Juan, 2011], [Hernández, 2012], [Ramírez, 2016]. La monitorización del

biogás suele depender de equipos costosos o métodos manuales, limitando la trazabilidad y la optimización de la producción [Ramírez, 2017].

El avance de IoT y microcontroladores de bajo costo, como ESP32, permite automatizar y monitorear procesos biotecnológicos, integrando sensores y plataformas web/móviles para supervisión remota y análisis en tiempo real [Mosquera, 2022], [Gamboa, 2019]. Actualmente, en el Laboratorio de Biotecnología Ambiental de la Universidad Nacional de Asunción, los reactores anaerobios carecen de sensores electrónicos y sistemas de registro de datos, lo que dificulta la evaluación continua y la toma de decisiones basadas en evidencia.

Este trabajo presenta un sistema de automatización y monitoreo para un reactor semicontinuo que controla agitación y temperatura, mide *pH* y captura datos de biogás durante la fase mesofílica. Los datos se transmiten en tiempo real a una plataforma web y aplicación móvil, se visualizan en pantalla LCD local y se exportan en formato de hoja de cálculo para análisis histórico, optimización de parámetros y toma de decisiones.

Los objetivos del estudio son: (i) diseñar e implementar un sistema basado en ESP32 y sensores para un reactor semicontinuo, (ii) Integrar un teclado y una pantalla LCD como interfaz de usuario para la automatización y control del ciclo operativo del sistema (iii) proporcionar herramienta de visualización y gestión remota a través de una plataforma web y aplicación móvil, y (iv) evaluar la operatividad de la malla calefactora bajo condiciones mesofílicas típicas de digestión de lodos.

2. Métodos

Este estudio se desarrolló bajo un enfoque de investigación aplicada y tecnológica, orientado al diseño e implementación de un sistema automatizado para un reactor semicontinuo, empleando herramientas del Internet de las Cosas (IoT). El enfoque metodológico combinó diagnóstico técnico, desarrollo electrónico, integración de hardware y software, así como validación experimental en condiciones controladas de laboratorio. En una primera etapa, se realizó un diagnóstico técnico del reactor semicontinuo del laboratorio del Grupo de

Investigación en Biotecnología (GIBTA), mediante entrevistas semiestructuradas a los técnicos responsables. Se identificaron los parámetros críticos del proceso, tales como volumen útil, temperatura operativa en el rango mesofílico (35 – 38 °C), agitación, tipo de alimentación y variables a monitorear *pH* y metano. Esta información sirvió de base para el diseño del biodigestor semicontinuo experimental y un sistema automatizado adaptado a las condiciones reales del proceso biotecnológico.

El sistema fue desarrollado por el Grupo de Investigación en Electrónica y Mecatrónica (GIEM) de la Facultad Politécnica. Se seleccionó el microcontrolador ESP32 por su capacidad de procesamiento, conectividad Wi-Fi integrada y compatibilidad con múltiples periféricos. Para la medición de metano se utilizó el sensor MQ-4, calibrado mediante gas metano generado en laboratorio y contrastado con su curva característica. El sensor de *pH* E201C-BNC fue calibrado utilizando soluciones buffer estándar. Las señales analógicas fueron acondicionadas mediante el convertidor ADS1115, de 16 *bits* y protocolo *I²C*, lo que garantizó precisión en la adquisición de datos.

Para la interacción local con el usuario, se integró un teclado matricial que permite controlar las distintas etapas del ciclo operativo, y una pantalla LCD 16x2, que muestra el estado del sistema. Esta interfaz fue programada para facilitar el uso operativo y asegurar una visualización clara del proceso.

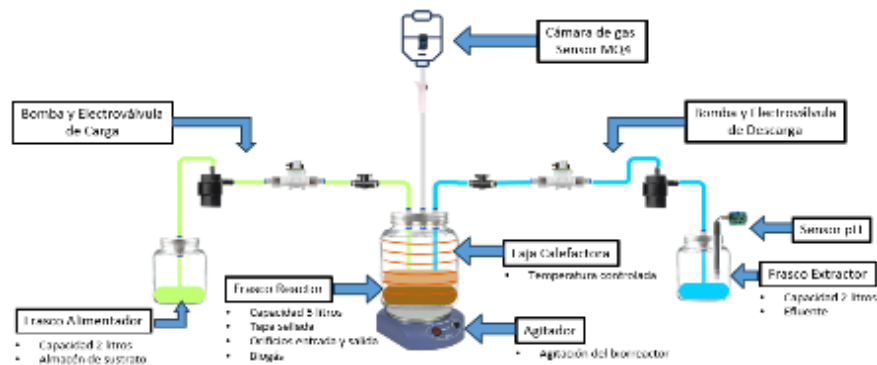
La gestión remota de los datos procesados de los sensores *pH* y MQ-4 se implementó a través de la plataforma ThingSpeak, que permite el almacenamiento, análisis y visualización en la nube. Se habilitó una aplicación móvil con acceso mediante API Keys, lo que permitió el monitoreo remoto del sistema desde dispositivos móviles en tiempo real.

El control térmico fue asegurado mediante una faja calefactora y un termostato digital, configurados para mantener una temperatura constante de 37 °C, reproduciendo condiciones mesofílicas típicas de digestión anaerobia, la validación de la estabilidad térmica se realizó mediante una prueba de operación continua durante 7 días. Las mediciones de *pH* fueron contrastadas con un equipo multiparamétrico patrón (EDGE) y del metano mediante el método de muestra de

volúmenes de la concentración de metano en aire, para validar la precisión de los sensores implementados.

Diseño propuesto

Se propuso el diseño y la construcción de un biorreactor anaerobio semicontinuo [Gil, 2012], constituido por un recipiente de vidrio con capacidad de 5,000 *ml*, hecho con una tapa especialmente diseñada y sellada herméticamente para permitir la carga controlada del sustrato, el almacenamiento del biogás generado y la extracción de muestras para su análisis. La configuración estructural fue elaborada para alojar adecuadamente la biomasa, tal como se observa en la Figura 1, el biorreactor está conectado a dos recipientes de vidrio de 2,000 *ml*: uno para almacenar el sustrato y otro para recolectar el efluente. La alimentación y extracción se realizan mediante bombas y electroválvulas controladas por temporización.

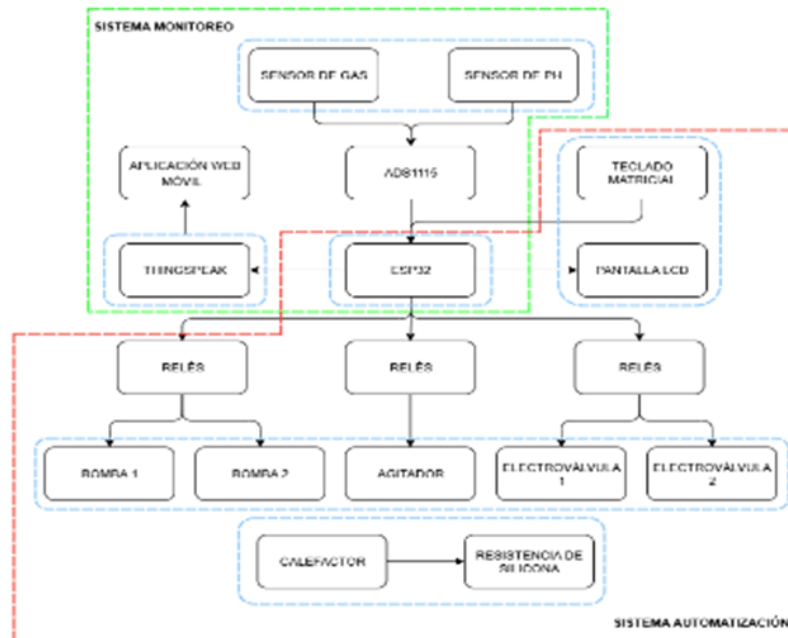


Fuente: elaboración propia

Figura 1 Diagrama del sistema del completo.

El ciclo inicia con agitación y una temperatura a 37 °C durante el tiempo de retención hidráulica (TRH), seguido de sedimentación, extracción de muestra para medición de *pH* y alimentación con volumen equivalente, manteniendo operación semicontinua. Durante la agitación, el biogás generado se analiza en tiempo real con un sensor MQ-4 ubicado en una bolsa de suero que funciona como cámara de acumulación de gas. Todo el proceso es gestionado por una unidad de control basada en una placa electrónica, organizada en dos sistemas funcionales, en la Figura 2 muestra que el sistema cuenta con dos módulos: “Automatización”, que

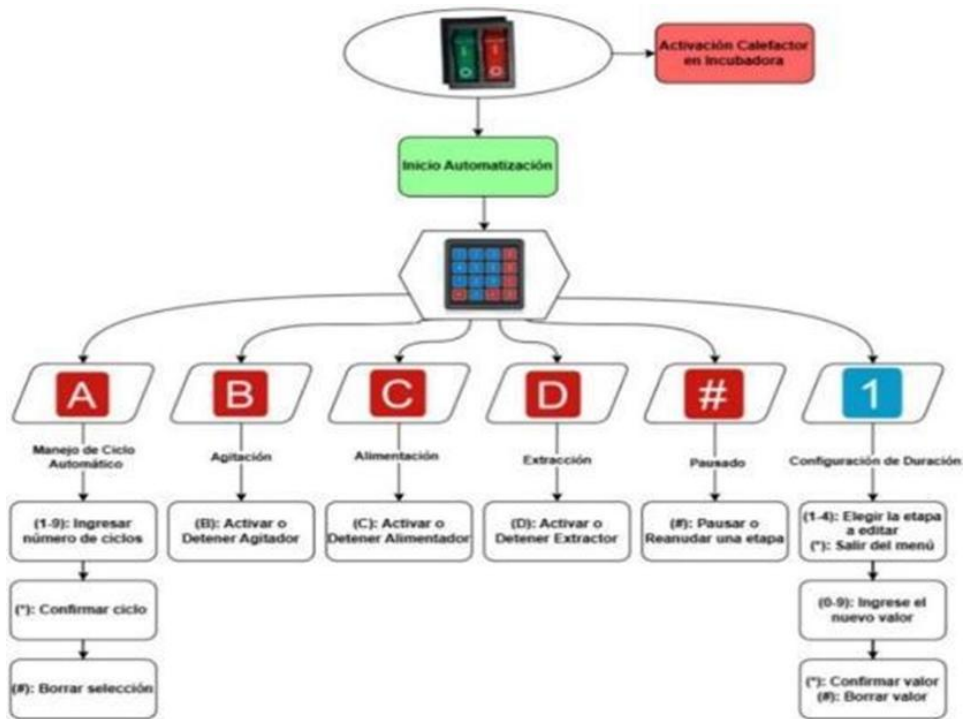
regula: agitación, sedimentación, alimentación, extracción y temperatura; y “Monitoreo”, que procesa y envía los datos de los sensores a ThingSpeak [MathWorks, s. f.], plataforma IoT en la nube para visualización y análisis en tiempo real, con acceso remoto e integración web y móvil.



Fuente: elaboración propia

Figura 2 Diagrama de bloque del Sistema de automatización y monitoreo.

La Figura 3 muestra el diagrama de flujo de control del sistema de automatización diseñado para el biodigestor experimental. El sistema se inicia mediante un interruptor doble: el verde energiza la fuente de alimentación de 12 V, habilitando todos los módulos electrónicos, mientras que el rojo activa un termostato conectado a una resistencia calefactora, permitiendo el calentamiento controlado del frasco reactor. Al energizar el sistema, se habilita una interfaz local mediante un teclado matricial, que permite al usuario seleccionar y controlar las funciones del biodigestor automatizado. Las opciones incluyen: ejecución del ciclo automático (A), activación del agitador (B), alimentación de sustrato (C), extracción del efluente (D), y pausa del proceso (#). Además, mediante la opción (1), es posible configurar la duración de cada etapa del ciclo operativo (agitación, sedimentación, alimentación y extracción).

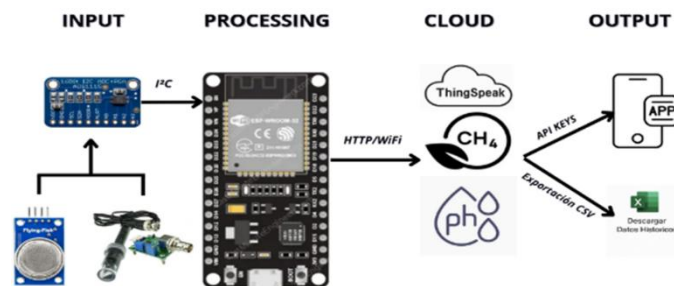


Fuente: elaboración propia

Figura 3 Diagrama de flujo del sistema de automatización.

Esquema de funcionamiento del monitoreo de datos

La Figura 4 muestra el flujo de datos desde los sensores MQ-4 y pH , cuyos valores son digitalizados por el ADS1115 y enviados al ESP32 mediante I^2C . El microcontrolador procesa la información y la transmite vía Wi-Fi a ThingSpeak, donde se registran y gestionan las mediciones. Los datos pueden visualizarse en tiempo real en dashboards web o móviles y descargarse en formato CSV para análisis en Excel, permitiendo generar historiales, evaluar el comportamiento del sistema y aplicar metodologías de control y análisis de tendencias.

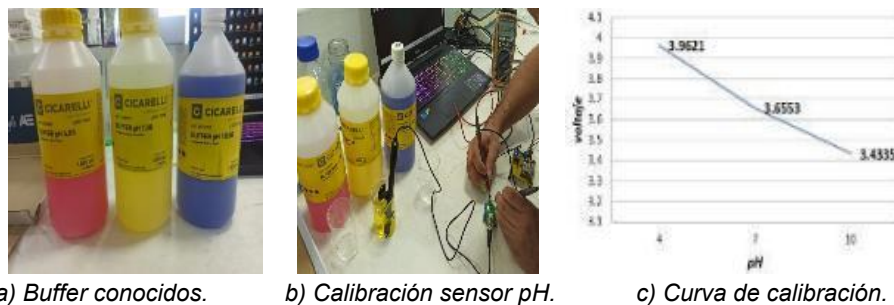


Fuente: elaboración propia

Figura 4 Esquema del sistema de monitoreo.

Calibración de los sensores

La calibración del sensor de pH se realizó mediante la adquisición de lecturas utilizando soluciones estándar comerciales con valores de pH 4, 7 y 10. La Figura 5 muestra el proceso de calibración, la medición de la salida del sensor para cada solución buffer realizada en el laboratorio de Química de FACEN. Para calibrar el sensor MQ-4, se generó metano de manera controlada en el laboratorio de FACEN y se utilizó junto con la curva del fabricante para establecer la relación entre la respuesta del sensor y la concentración de metano en aire. La Tabla 1 muestra los valores de las muestras de disoluciones de metano en aire con concentraciones entre 300 ppm y 10,000 ppm , utilizados para la calibración.



Fuente: elaboración propia

Figura 5 Proceso de calibración sensor pH .

Tabla 1 Muestra de volumen disolución de metano.

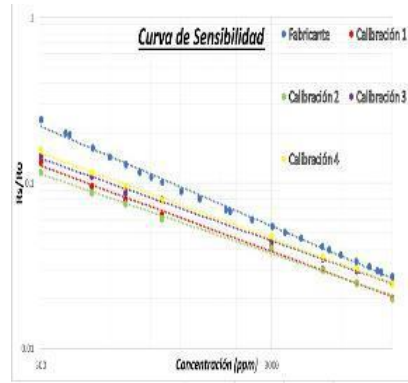
Volumen de disolución CH_4 [ml]	Volumen de CH_4 puro [ml]	Concentración de CH_4 teórico en aire [ppm]
3.0	0	300
5.0	0	500
7.0	0	700
10.0	0	1,000
10.0	2.0	3,000
10.0	4.0	5,000
10.0	6.0	7,000
10.0	9.0	10,000

Fuente: elaboración propia

La Figura 6 presenta el proceso de calibración del sensor. En la Figura 6a se muestra la obtención del gas metano generado químicamente, mientras que en la Figura 6b las curvas obtenidas durante la calibración, comparadas con la curva característica proporcionada en el datasheet (curva azul).



a) Sistema de obtención del gas metano.



b) Calibración del sensor MQ4.

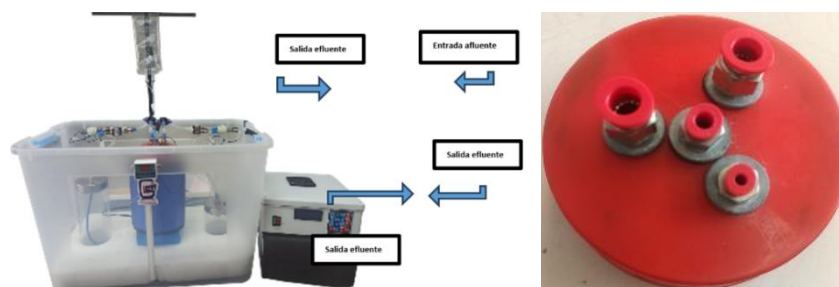
Fuente: elaboración propia

Figura 6 Proceso de calibración sensor MQ4.

3. Resultados

Se presentan los resultados obtenidos durante la fase de implementación, integración y validación del sistema automatizado propuesto:

- **Implementación del diseño del sistema y validación técnica.** En primer lugar, se exponen los resultados relacionados con la construcción del biorreactor, del sistema embebido y la validación técnica de los sensores mediante calibración y comparación con un equipo patrón.
- **Estructura del biodigestor experimental.** La Figura 7a muestra una estructura compuesta por un biorreactor cilíndrico de vidrio, un frasco de alimentación y uno de extracción. Su tapa, Figura 7b, cuenta con cuatro orificios: uno para evacuación de gases, dos para alimentación y extracción de líquido, y uno para un sensor de temperatura que permite monitoreo continuo de esta variable crítica durante el proceso.



a) Estructura completa del biodigestor.

b) Tapa con cuatro orificios.

Fuente: elaboración propia

Figura 7 Biorreactor Semicontinuo.

La Tabla 2 presenta las especificaciones del biorreactor que cumplen con los requerimientos solicitados por el GIBTA.

Tabla 2 Requerimientos solicitados por el GIBTA.

Características	Escala Laboratorio
Material	Vidrio
Componentes	Recipiente de 2,000 ml para alimentación de sustrato, recipiente de 2,000 ml para toma de muestra, recipiente de 5,000 ml para la digestión
Tipo	Superficial de cúpula fija
Régimen	Semicontinuo
Biomasa	Preparada en Laboratorio
Conectores	Tipo push

Fuente: elaboración propia

El biorreactor fue sometido a diversas pruebas para verificar su hermeticidad: prueba con solución de jabón diluido Figura 8a y prueba de burbujeo Figura 8b, con el fin de observar la aparición de burbujas bajo el agua cuando se aplica presión. Además, se monitoreó la presión Figura 8c mediante un sensor amplificado AEP TP3 con el software Arduino IDE 2.3.4 durante un día se comprobó que se mantiene constante.



a) Prueba solución de jabón diluido. b) Prueba de burbujeo. c) Medición de presión.

Fuente: elaboración propia

Figura 8 Pruebas de Hermeticidad.

- **Sistema de automatización del biorreactor experimental.** En la Figura 9 se presenta la implementación del sistema de automatización del biodigestor:
 - ✓ El circuito de control Figura 9a está alojado en una caja diseñada para gestionar las distintas etapas de operación del biorreactor.

- ✓ El control de temperatura Figura 9b se realiza mediante una faja calefactora instalada en el exterior del biorreactor, permitiendo transferir calor de forma eficiente sin contacto directo con la biomasa.



a) Circuito de control.

b) Faja calefactora.

Fuente: elaboración propia

Figura 9 Sistema de automatización.

- **Validación de la precisión de los sensores.** Se compararon las lecturas del sensor pH calibrado del sistema con el equipo patrón (EDGE) como se muestra en la Figura 10, para verificar la exactitud de las mediciones. En el caso del pH , las diferencias no superaron el 5% de error relativo, lo cual se consideró aceptable para el entorno experimental.



Fuente: elaboración propia

Figura 10 Lecturas del sensor de pH .

La Tabla 3 presenta los resultados obtenidos de la calibración del sensor pH , donde los valores promedio muestran una buena concordancia con los puntos de referencia. Además, el coeficiente de variación (CV) indica una variabilidad muy baja, lo que refleja la consistencia de las mediciones, Tabla 4.

Tabla 3 Resultados de calibración de *pH*.

Buffer (<i>pH</i>)	Promedio obtenido (<i>pH</i>)	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
4	4.324	0.109	2.521
7	7.348	0.207	2.817
10	10.081	0.361	3.581

Fuente: elaboración propia

Tabla 4 Resultados de mediciones de *pH*.

Buffer (<i>pH</i>)	Valor referencia (EDGE)	Valor medido (sistema)	Error Relativo (%)
7	7.04	7.348	4.38
10	10.24	10.081	1.55

Fuente: elaboración propia

Para el metano, la relación entre la lectura del sensor MQ-4 y la concentración teórica de CH_4 se ajustó a un modelo lineal, obteniéndose un coeficiente de determinación $R^2 > 0.99$ para las disoluciones preparadas de concentración conocida. La ecuación utilizada para la curva de calibración, es la Ecuación 1, donde y es la lectura digital procesada del sensor, x la concentración de metano en *ppm*. a la constante asociada al valor inicial de la señal y b el parámetro que define la pendiente exponencial del modelo. El comportamiento se representa en la Figura 11, se observa la curva ajustada y su correspondencia con los puntos experimentales obtenidos durante la calibración.

$$y = ae^{bx} \tag{1}$$



Fuente: elaboración propia

Figura 11 Curva de calibración del Mq-4.

En la Tabla 5 se presenta el resultado de las mediciones del sensor MQ4 calibrado.

Tabla 5 Resultados de mediciones de metano.

Volumen de disolución CH_4 [ml]	Volumen de CH_4 puro [ml]	Concentración de CH_4 teórico en aire [ppm]	Concentración promedio de CH_4 medido en aire [ppm]	Desviación Estándar	Coefficiente de variación
3.0	0	300	272.58	3.49	1.28
5.0	0	500	527.48	14.50	2.75
7.0	0	700	759.22	18.59	2.45
10.0	0	1,000	1,079.60	6.00	0.56
10.0	2.0	3,000	2,693.46	43.49	1.61
10.0	4.0	5,000	5,173.43	79.30	1.53
10.0	6.0	7,000	7,245.25	21.00	0.29
10.0	9.0	10,000	11,110.38	224.29	2.02

Fuente: elaboración propia

- **Visualización de datos de manera local.** De manera local se observa mediante una pantalla LCD en tiempo real la etapa operativa (Figura 12), junto con el tiempo de ejecución.



a) Agitación.

b) Sedimentación.

c) Extracción.

Fuente: elaboración propia

Figura 12 Visualización local en LCD.

- **Visualización de datos en ThingSpeak.** La Figura 13 muestra la visualización en tiempo real de los datos registrados por los sensores en la plataforma ThingSpeak. Se presentan gráficos de tendencia para ambas variables, Figura 13, junto con indicadores que reflejan los valores actuales: pH 7.0 y 596 ppm de metano respectivamente. Estos datos evidencian el correcto funcionamiento del sistema de monitoreo IoT, permitiendo un seguimiento continuo de los parámetros clave del proceso.
- **Vista previa de la aplicación web.** En la Figura 14 se muestran las principales interfaces de la aplicación: creación de cuenta e inicio de sesión y visualización de gráficos de metano.



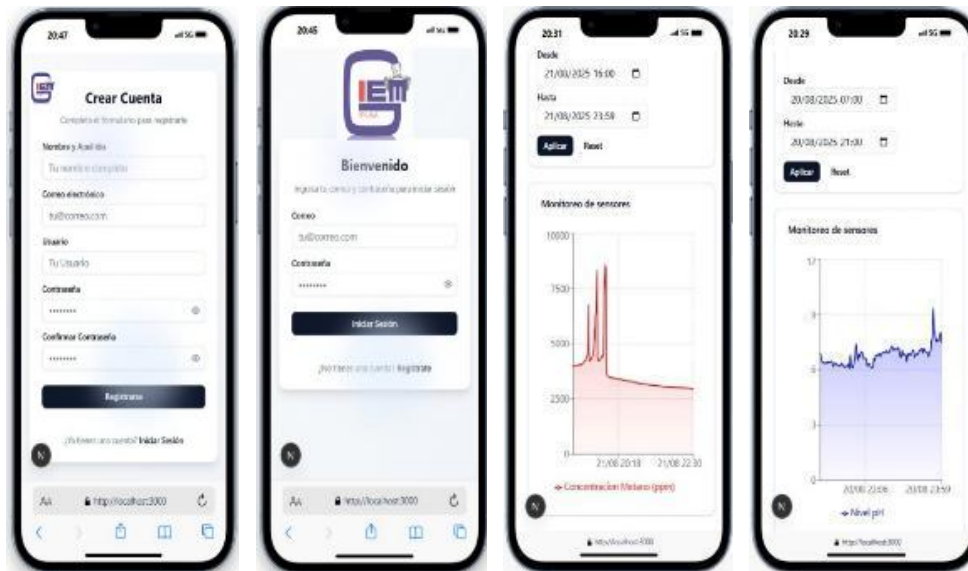
a) Visualización de lecturas de pH.



b) Visualización de lecturas de metano.

Fuente: elaboración propia

Figura 13 Visualización local en LCD.



a) Primera vista.

b) Segunda vista.

c) Vista CH₄.

d) Vista pH.

Fuente: elaboración propia

Figura 14 Interfaz de la aplicación web.

- **Operatividad y confiabilidad del sistema bajo condiciones mesófilicas.** En la Tabla 6 se ven los registros diarios de la temperatura el cual cumple con las condiciones requeridas por el Laboratorio de FACEN.

Tabla 6 Registro de temperaturas.

Fecha	Temperatura promedio registrada [C°]
27 – 07 – 2025	37.5
28 – 07 – 2025	36.8
29 – 07 – 2025	37.2
30 – 07 – 2025	37.7
31 – 07 – 2025	36.9
01 – 08 – 2025	38.1
02 – 08 – 2025	37.7
03 – 08 – 2025	37.1

Fuente: elaboración propia

4. Discusión

Los resultados obtenidos validan el cumplimiento de los objetivos planteados. El sistema, basado en ESP32 y sensores calibrados (MQ-4 y E201C-BNC), permitió un monitoreo confiable de *pH* y metano, con un error relativo inferior al 5%, similar al desempeño reportado por [Kiplimo,2024]. A diferencia de trabajos como los de [Mutungwazi,2018] o [Guimarães,2023], que emplean biodigestores con control parcial, este sistema integró automatización completa del ciclo operativo.

La interfaz local mediante teclado y pantalla LCD ofreció control directo de las etapas del proceso [Merino, 2019], y destacándose por su flexibilidad y autonomía.

La plataforma IoT ThingSpeak permitió supervisión remota en tiempo real, como en [Mukasine, 2023], aunque con la ventaja de integración más eficiente del ESP32 frente a soluciones basadas en Raspberry Pi o Arduino [Abdurrahman, 2020].

El control térmico, mediante resistencia calefactora, mantuvo condiciones mesofílicas estables (35 – 39 °C), con desempeño comparable. [Vides, 2024] y mejoras en distribución térmica gracias al agitador magnético. En conjunto, el sistema propuesto representa una solución accesible, modular y replicable para entornos académicos o pilotos de biotecnología.

5. Conclusiones

Los resultados de esta investigación demuestran la viabilidad técnica y operativa de un sistema automatizado para un biorreactor anaerobio semicontinuo, orientado al tratamiento de lodos contaminantes en condiciones mesofílicas. El diseño basado en el microcontrolador ESP32 permitió integrar sensores analógicos, sistemas de

control térmico, una interfaz de usuario local y una plataforma de monitoreo remoto, cumpliendo con los objetivos propuestos. La calibración de los sensores de *pH* y MQ-4, así como su validación frente a equipos patrón, evidenció un comportamiento confiable, con un margen de error aceptable para aplicaciones experimentales.

La interfaz local con teclado y pantalla LCD ofreció un control directo, flexible y autónomo del ciclo operativo del reactor. Además, la integración con la plataforma IoT ThingSpeak y una aplicación móvil posibilitó el envío de datos en tiempo en tiempo real del gas metano y *pH*, lo cual amplía las capacidades de seguimiento y análisis del proceso.

Por último, el sistema de calefacción mantuvo adecuadamente la temperatura dentro del rango mesofílico, favoreciendo las condiciones necesarias para la digestión anaerobia.

Como trabajo futuro, se plantea ampliar la evaluación del sistema con diferentes tipos de inóculos y tiempos de retención hidráulica, a fin de analizar la eficiencia comparativa de producción de metano.

6. Referencias y Bibliografía

- [1] Abdurrahman, A. H., Kirom, M. R. y Suhendi, A., (2020). Medición del volumen de producción de biogás y sistema de monitoreo basado en IoT, Conferencia Internacional IEEE sobre Comunicación, Redes y Satélite, doi: <https://doi.org/10.1109/Comnetsat50391.2020.9328948>.
- [2] Ambulkar, A. R., Shekdar, A. V., (2004). Prospects of biomethanation technology in the Indian context: a pragmatic approach, *Resources. Conserv Recycl*, doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(03\)00037-5](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(03)00037-5).
- [3] Castrillon, L., Vazquez, I., Maranon, E., Sastre, H., (2002). Anaerobic thermophilic treatment of cattle manure in UASB reactors. *Waste Manage*, doi: 10.1177/0734247X0202000406.
- [4] Gamboa, C. A., Cubillos, J. C., (2019). Sistema de monitoreo autónomo del control para proceso de digestión anaerobia con transmisión de datos en tiempo real. Tesis de grado, Universidad de Ibagué. <http://repositorio.unibague.edu.co:80/jspui/handle/20.500.12313/1326>.

- [5] Gil, M. J., Soto, A. M., Usma, J. I., & Gutiérrez, O. D., (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción + Limpia*. ISSN 1909-0455.
- [6] Guimarães C. de S., da S. Maia D. R., (2023). Development of Anaerobic Biodigester for the Production of Biogas Used in Semi-Continuous System Bioprocesses: An Efficient Alternative for Co-Digestion of Low Biodegradability Biomass, doi: <https://doi.org/10.3390/biomass3010002>.
- [7] Hernández, H. A. H., (2012). Diseño de un biodigester instrumentado electrónicamente para la generación de biogás en casa habitación. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000677469>.
- [8] Igoni, A. H., Ayotamuno, M. J., Eze, C. L., Ogaji, S. O. T., Probert, S. D., (2008). Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.07.013>.
- [9] Juan Benito, P. F., Rediseño y ensayo de un biodigester en la granja experimental de la universidad autónoma de Chapingo, 2011.
- [10] Kiplimo, E., Van der Veen M. T. H., de Lange M. A. F. J. L., Ragas A. M. J., de Gouw, J. R., (2024). Addressing Low-Cost Methane Sensor Calibration Using Machine Learning, *Atmosphere*. <https://doi.org/10.3390/atmos15111313>.
- [11] MathWorks. Configure Accounts and Channels. En *ThingSpeak™ User's Guide*, s.f.
- [12] Merino Chumacero M. E., (2019). Diseño e implementación de reactor anaerobio semicontinuo para aprovechamiento de cáscaras de cacao, Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica, Piura, Perú. <https://hdl.handle.net/11042/4239>.
- [13] Mosquera, L. M., (2022). Diseño e Implementación un prototipo IoT para el monitoreo de parámetros ambientales aplicados al cultivo de arroz utilizando ESP32 y ThingSpeak. Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22884>.
- [14] Mukasine, A., L. Sibomana, K. Jayavel, K. Nkurikiyeyezu y E. Hitimana, (2023). Modelo de análisis de correlación de parámetros ambientales utilizando un

marco IoT en el contexto de generación de energía a partir de biogás.
<https://doi.org/10.3390/fi15080265>.

- [15] Mutungwazi, A., Mukumba, P., and Makaka, G., Biogas digester types installed in South Africa: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81, pp. 172–180, 2018.
- [16] Ramírez, G. C., (2016). Valoración de la producción de biogás durante un proceso de digestión anaerobia con contenido ruminal de origen bovino bajo condiciones de tiempo, carga y temperaturas diferenciales, Manizales. <https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/2771>.
- [17] Ramírez, V. A., Cuevas, L. M., Vargas, A., Pérez, F. R., (2017). Generación de biogás en un biodigestor automatizado. Universidad Tecnológica de Querétaro, Querétaro, México. ISSN 2410-3934.
- [18] Urbina, L. E., Ramos, M. A., (2024). Diseño de un biodigestor anaerobio de flujo semicontinuo para la obtención de biogás a partir de residuos de higuera y excretas bovinas. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/11356>.
- [19] Vides Herrera, C. A., García A. P., Ospino Castro, A. J., (2024). Automatización de un digestor anaerobio con sistema embebido para la producción de biogás a partir de residuo del aceite de palma, *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, doi: 10.24054/rcta.v2i44.2992.
- [20] Vivanco, E., Yaya, R., Chamy, R., (2019). Manual técnico sobre tecnologías biológicas anaerobias aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales. Red Tritón 316RT0508, Programa CYTED. ISBN 978-84-09-08638-2.