

Automatización y control de un biodigestor anaeróbico para la producción de biogás a partir del POME

Automation and control of an anaerobic biodigester for biogas production from POME

Autor Est. Luis Humberto Urueña Ardila¹, Director PhD. Carlos Arturo Vides Herrera¹

¹universidad de pamplona, Facultad de ingeniería y arquitectura, Ingeniería electrónica, Semillero de Investigación en Sistemas Electrónicos Embebidos (SISEE), Pamplona, Norte Santander, Colombia.

Correspondencia: Luis Humberto Urueña Ardila
Correo electrónico: luis.urueña@unipamplona.edu.co

Recibido: 03/10/2025
Revisado: 06/11/2025
Aceptado: 29/12/2025

Citar así: Urueña Ardila, L.H “Automatización y control de un biodigestor anaeróbico para la producción de biogás a partir del POME”, SEI, vol. 8, nº 1, pp. 1-10, Abrev. diciembre, 2025. Recuperado de <https://doi.org/10.24054/8aravv73>

Copyright: © 2025. Universidad de Pamplona, Colombia. La Revista Semilleros de Investigación proporciona acceso abierto a todo su contenido bajo los términos de la licencia Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).

Agradecimientos: A la Universidad de Pamplona y al Dr. Carlos Arturo Vides Herrera coordinador del semillero de investigación de sistemas electrónicos embebidos (SISEE) perteneciente al programa de Ingeniería Electrónica. A la coordinación de semillero de investigación y la vicerrectoría de investigaciones de la Universidad de Pamplona

Resumen.

El agua residual generada en la producción de palma de aceite (POME) representa un problema ambiental importante, debido a su alta carga orgánica y a la emisión de gases de efecto invernadero cuando no se trata adecuadamente. Ante esta situación, este trabajo se orienta al diseño e implementación de un sistema de automatización y control para un biodigestor anaeróbico tipo batch, con el propósito de maximizar la producción de biogás a partir de este residuo. La metodología se basa en la instrumentación del reactor mediante sensores de temperatura, pH, gases y presión, integrados a una plataforma ESP32 que permite la adquisición continua de datos. Además, se implementa un control PI para la regulación térmica y un control difuso para la estabilización del pH, ya que estas variables influyen directamente en el rendimiento del proceso. A esto se suma un sistema de supervisión en tiempo real desarrollado en Python mediante comunicación WebSocket. Como principales avances, se destacan la caracterización térmica del sistema, el diseño de la etapa de potencia con cruce por cero y la implementación del monitoreo continuo del proceso.

Palabras clave: Biogás, POME, biodigestor anaeróbico, automatización, control.

Abstract

Wastewater generated during palm oil production (POME) represents a significant environmental challenge due to its high organic load and the release of greenhouse gases when it is not properly treated. In response to this issue, this study focuses on the design and implementation of an

automation and control system for a batch-type anaerobic biodigester, aimed at maximizing biogas production from this residue. The proposed methodology is based on the instrumentation of the reactor using temperature, pH, gas, and pressure sensors integrated into an ESP32-based platform, allowing continuous and reliable data acquisition. In addition, a PI control strategy is implemented for thermal regulation, while a fuzzy control approach is used to stabilize pH, since even small variations in these parameters can strongly affect biological performance. Furthermore, a real-time monitoring system developed in Python using WebSocket communication enables continuous supervision of the process. The main achievements include the thermal characterization of the system, the design of a zero-crossing power stage, and the implementation of continuous process monitoring.

Keywords: Biogas, POME, anaerobic biodigester, automation, control.

1. INTRODUCCIÓN

La industria palmicultora genera grandes volúmenes de Palm Oil Mill Effluent (POME), un residuo caracterizado por su elevada demanda química de oxígeno que, cuando no es tratado de manera adecuada, produce impactos ambientales significativos y difíciles de ignorar [1]. Y es que, en muchos casos, estos efluentes son descargados sin un manejo apropiado, afectando cuerpos de agua, suelos y la calidad del aire en las zonas cercanas a las plantas de procesamiento.

Ante este panorama, la digestión anaerobia ha ganado un papel relevante en los últimos años como una alternativa eficiente y sostenible para el tratamiento del POME. Esta tecnología no solo permite reducir la carga contaminante del residuo, sino que además aprovecha el proceso biológico para producir biogás, una fuente de energía renovable con alto potencial de aprovechamiento [2], [3]. En otras palabras, se transforma un problema ambiental en una oportunidad energética.

Ahora bien, diversos estudios recientes coinciden en que el desempeño del proceso anaerobio depende en gran medida del control de variables operativas clave, especialmente la temperatura y el pH, ya que estas influyen directamente en la actividad y estabilidad de los microorganismos metanogénicos [4], [5]. La verdad es que

incluso pequeñas desviaciones fuera de los rangos óptimos pueden provocar desequilibrios en el sistema y reducir de forma significativa la producción de metano.

A pesar de su importancia, en biodigestores de pequeña escala el control de estas variables suele realizarse de manera manual, apoyándose en mediciones esporádicas y ajustes empíricos. Este tipo de operación, aunque común, genera inestabilidad en el proceso y, como consecuencia, una disminución en la eficiencia energética del sistema [6].

En este contexto, la incorporación de sistemas embebidos de bajo costo, como la plataforma ESP32, ha abierto nuevas posibilidades para el desarrollo de soluciones accesibles de monitoreo y control automático. Gracias a su capacidad de procesamiento, conectividad y facilidad de integración con sensores, estas plataformas permiten la supervisión en tiempo real del biodigestor y favorecen la toma de decisiones basada en datos, incluso en aplicaciones a pequeña escala [7], [8].

2. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

El Palm Oil Mill Effluent (POME) es uno de los residuos más problemáticos generados por la industria de la palma de aceite, debido a su elevada demanda química de oxígeno y a su potencial para generar metano, un gas de

efecto invernadero con alto impacto climático [1]. En regiones como el Norte de Santander, la disposición inadecuada de este efluente representa un riesgo ambiental y sanitario para los cuerpos de agua y las comunidades cercanas [7].

Si bien los biodigestores anaeróbicos permiten transformar el POME en biogás, muchos de estos sistemas operan sin un control automático adecuado. La ausencia de regulación precisa de la temperatura y el pH provoca inestabilidad térmica, desbalances químicos y una disminución en la eficiencia global del proceso anaerobio [4], [6].

Además, la falta de monitoreo continuo dificulta la identificación temprana de fallas operativas y limita la optimización de la producción de biogás. Desde el punto de vista técnico, esta situación evidencia la necesidad de desarrollar sistemas de automatización y control que permitan mantener condiciones operativas estables dentro del biodigestor, especialmente en aplicaciones de pequeña escala donde el control manual sigue siendo predominante [8].

3. JUSTIFICACIÓN DE PROBLEMA

La implementación de un sistema automático de monitoreo y control para biodigestores anaeróbicos constituye una estrategia clave para mejorar la estabilidad del proceso, aumentar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental asociado al tratamiento del POME. Desde una perspectiva ambiental, el proyecto promueve el uso de tecnologías limpias orientadas a la mitigación del cambio climático mediante la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y el aprovechamiento energético de residuos agroindustriales [2], [3].

Desde el ámbito social, el desarrollo de soluciones basadas en sistemas embebidos de bajo costo facilita la adopción de tecnologías de automatización en contextos rurales y en pequeños productores, donde el acceso a

sistemas industriales de control suele ser limitado [7].

Finalmente, desde la ingeniería electrónica, este trabajo integra estrategias modernas de control, como el control proporcional-integral (PI) y la lógica difusa, aplicadas a procesos biotecnológicos mediante plataformas embebidas con capacidad de comunicación en tiempo real. De este modo, se fortalece la automatización de procesos sostenibles y se contribuye al desarrollo de soluciones tecnológicas replicables y escalables [8], [9].

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema de automatización y control para un reactor anaeróbico en la producción de biogás utilizando efluentes de la palma de aceite (POME) como sustrato.

4.1 Objetivos específicos

1. Desarrollar la automatización del reactor anaeróbico.
2. Diseñar una estrategia de control para las variables del proceso.
3. Implementar el sistema de control de las variables críticas.
4. Validar el funcionamiento del sistema automatizado a partir de diferentes pruebas.

5. METODOLOGIA

La metodología empleada en este estudio se diseñó con el propósito de desarrollar, implementar y validar un sistema de automatización y control para un biodigestor anaeróbico tipo batch destinado a la producción de biogás a partir de Palm Oil Mill Effluent (POME). Al tratarse de un proceso biológico altamente sensible a las condiciones de operación, fue necesario adoptar un enfoque metodológico estructurado, progresivo y claramente

definido, similar al empleado en estudios recientes sobre digestión anaerobia de residuos agroindustriales [1], [9].

El procedimiento seguido se organizó como una secuencia lógica de etapas que inicia con la selección e investigación de los sensores, actuadores y del biodigestor, continúa con la elección del hardware y software del sistema embebido, avanza hacia la caracterización experimental y el desarrollo de los algoritmos de control, y culmina con la implementación del sistema automatizado y el monitoreo de las variables del proceso. Esta estructura metodológica permite garantizar la trazabilidad de la investigación y asegurar la coherencia entre los objetivos planteados y los resultados obtenidos, tal como se recomienda en metodologías aplicadas a sistemas de digestión anaerobia controlados [10].

Con el fin de presentar de manera clara la secuencia metodológica adoptada, en la Figura 1 se ilustra el flujo general de las etapas que conforman el desarrollo del sistema de automatización y control del biodigestor.

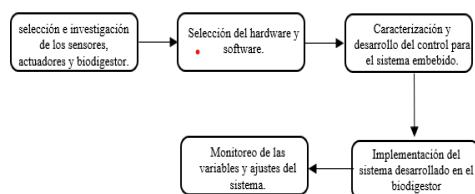


Figura 1. Metodología aplicada para el desarrollo del sistema de automatización y control del biodigestor.

Fuente: Autor.

5.1 Selección e investigación de los sensores, actuadores y biodigestor a usar.

En una primera etapa se realizó una revisión técnica y bibliográfica orientada a seleccionar el tipo de biodigestor más adecuado para el desarrollo experimental. Se optó por un biodigestor anaeróbico tipo batch, principalmente por su simplicidad operativa, facilidad de instrumentación y amplia utilización en estudios académicos y

experimentales a pequeña escala, donde se busca analizar el comportamiento del proceso bajo condiciones iniciales controladas [8], [9].

Este tipo de reactor permite trabajar con ciclos cerrados, lo que facilita el análisis del efecto de variables críticas como la temperatura y el pH sobre la producción de biogás, reduciendo la incertidumbre asociada a sistemas de alimentación continua y mejorando la estabilidad del proceso [10].

Con el fin de ilustrar la configuración física del reactor empleado, en la Figura 2 se presenta el diseño general del biodigestor utilizado en el estudio, donde se identifican los principales elementos estructurales y los puntos de instrumentación.

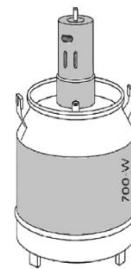


Figura 2. Diseño del biodigestor.

Fuente: Autor.

Selección de sensores del proceso

1. Sensor de temperatura

La temperatura constituye una de las variables más relevantes en la digestión anaerobia, ya que regula la actividad metabólica de los microorganismos responsables de la producción de biogás. Por esta razón, se seleccionó una galga termocupla tipo K, debido a su amplio rango de operación, robustez mecánica y adecuada respuesta ante cambios térmicos, características que la hacen adecuada para procesos térmicos y biotecnológicos [11].

Para la adquisición de la señal generada por la termocupla se empleó el módulo MAX6675, el cual integra compensación de unión fría y conversión digital de la señal, permitiendo su lectura directa por el sistema embebido a través del protocolo SPI [12].

Con el propósito de ilustrar los elementos utilizados para la medición de la temperatura, en la Figura 3 se muestran la galga termocupla tipo K y el módulo MAX6675 empleados en el sistema.



Figura 3. A) Galga termocupla tipo k. B) Modulo maxx6675.

Fuente: internet.

2. Sensor de pH

El pH es una variable crítica en la digestión anaerobia, ya que pequeñas desviaciones pueden provocar desequilibrios en el proceso, acumulación de ácidos grasos volátiles y disminución en la producción de metano. Para su medición se empleó un electrodo de pH tipo E-201-C, ampliamente utilizado en procesos biotecnológicos y de tratamiento de aguas residuales por su sensibilidad y estabilidad en rangos cercanos a la neutralidad [13], [14].

La señal del electrodo fue acondicionada mediante un módulo analógico encargado de amplificar y adaptar el voltaje a niveles compatibles con la entrada analógica del microcontrolador. Asimismo, se consideró la calibración periódica del sensor como un aspecto fundamental para garantizar la confiabilidad de las mediciones durante el proceso experimental [14].

En la Figura 4 se presentan el electrodo de pH y el módulo de acondicionamiento utilizados en el sistema.



Figura 4 . A) Electrodo de pH tipo E-201 C. B) Modulo para el electrodo.

Fuente: internet.

3. Sensores de gases (CH_4 y CO_2)

Para el monitoreo cualitativo del biogás

generado se emplearon sensores semiconductores tipo MQ-4 y MQ-2, destinados a la detección de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), respectivamente. Estos sensores se caracterizan por su bajo costo y facilidad de integración, lo que los hace adecuados para prototipos experimentales y sistemas de investigación a pequeña escala [15], [16].

Si bien estos sensores no proporcionan mediciones cuantitativas de alta precisión, permiten identificar tendencias en la generación de biogás y detectar variaciones significativas en la composición gaseosa del sistema, lo cual resulta útil en etapas preliminares de investigación [17].

La Figura 5 muestra los sensores MQ-4 y MQ-2 empleados para la detección de los gases del biogás.

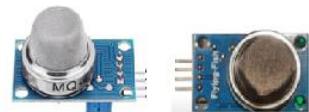


Figura 5. A) Electrodo de pH tipo E-201 C. B) Modulo para el electrodo.

Fuente: internet.

4. Sensor de presión y variables ambientales.

Con el objetivo de estimar el volumen de biogás producido y compensar variaciones ambientales, se integró un módulo AHT20 + BMP280, el cual permite la medición de presión atmosférica, temperatura y humedad relativa. Este tipo de sensores digitales presenta buena estabilidad, bajo consumo energético y comunicación mediante el protocolo I²C, características que facilitan su integración con sistemas embebidos y aplicaciones de monitoreo ambiental [18], [19].

En la Figura 6 se presenta el módulo AHT20 + BMP280 utilizado para la medición de las variables ambientales asociadas al proceso.

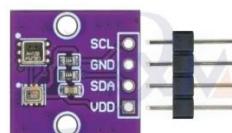


Figura 6. Módulo AHT20+BMP280 para la adaptación del volumen del biogás.

Fuente: internet.

Selección de actuadores

Para el control térmico del biodigestor se empleó una resistencia calefactora tipo abrazadera, seleccionada por su facilidad de instalación y su capacidad para distribuir el calor de manera uniforme alrededor del reactor. Este tipo de dispositivos es ampliamente utilizado en sistemas experimentales de calentamiento de recipientes cilíndricos y procesos térmicos de laboratorio [18].

Con el fin de ilustrar el elemento utilizado para el calentamiento del biodigestor, en la Figura 7 se presenta la resistencia calefactora tipo abrazadera empleada en el sistema.



Figura 7. Resistencia calefactora tipo abrazadera.

Fuente: Autor.

El control del pH se realizó mediante bombas peristálticas, encargadas de dosificar soluciones correctoras de manera controlada. Este tipo de bombas permite un control preciso del caudal, evita la contaminación cruzada del fluido y es ampliamente utilizado en procesos químicos y biológicos [19].

Adicionalmente, se integraron microbombas para las operaciones de llenado y vaciado del biodigestor, facilitando el manejo del sustrato durante las pruebas experimentales. En la Figura 8 se muestran los actuadores utilizados para la dosificación y el manejo de fluidos.



Figura 8. A) Bomba de dosificación o peristáltica. B)

Microbomba.

Fuente: Autor.

5.2 Selección del hardware y software del sistema embebido.

La adquisición de datos, el procesamiento de la información y la ejecución de los algoritmos de control se centralizaron en un sistema embebido basado en el microcontrolador ESP32. La elección de esta plataforma se fundamentó en su capacidad de procesamiento, conectividad WiFi-integrada y compatibilidad con múltiples interfaces de comunicación, lo que la hace adecuada para aplicaciones de monitoreo y control en tiempo real [20].

Para facilitar la comprensión de la asignación de pines y las interfaces disponibles en la plataforma, en la Figura 9 se presenta la distribución de pines del microcontrolador ESP32 utilizado en el proyecto.

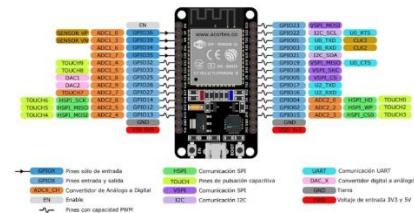


Figura 9. Distribución de pines de la ESP32 V1

Fuente: internet

5.3 Caracterización del sistema y diseño de los controles.

Antes de implementar las estrategias de control, se realizó una caracterización experimental del sistema térmico del biodigestor mediante pruebas en lazo abierto. Para ello, se aplicó potencia máxima a la resistencia calefactora y se registró la evolución de la temperatura en función del tiempo, siguiendo procedimientos similares a los reportados en estudios de control térmico de biodigestores a pequeña escala [7], [9].

El control de la temperatura se implementó

mediante un controlador proporcional-integral (PI), seleccionado por su simplicidad, robustez y buen desempeño en procesos térmicos. Por su parte, el control del pH se desarrolló utilizando lógica difusa, debido a la naturaleza no lineal del proceso de digestión anaerobia y a la dificultad de obtener un modelo matemático preciso, como se ha reportado en investigaciones recientes sobre control de pH en sistemas biológicos [15].

5.4 Implementación del sistema de control en el biodigestor

Finalmente, se procedió a la integración del sistema automatizado en el biodigestor, conectando los sensores, actuadores y la unidad de control. La supervisión del proceso se realizó mediante una aplicación de escritorio desarrollada en Python, la cual permite visualizar en tiempo real las variables del sistema a través de comunicación WebSocket, un protocolo ampliamente utilizado en sistemas de monitoreo en tiempo real y aplicaciones SCADA experimentales [21].

El monitoreo continuo de las variables permitió realizar ajustes al sistema y evaluar su desempeño bajo condiciones experimentales controladas, sentando las bases para futuras mejoras y ampliaciones del sistema desarrollado.

6. Avances

Como avance principal del presente trabajo, se realizó la caracterización experimental del biodigestor anaeróbico con el fin de comprender su comportamiento dinámico y establecer una base sólida para el diseño e implementación de los sistemas de control automático. Esta caracterización se llevó a cabo bajo condiciones controladas, considerando la configuración física del reactor, la instrumentación instalada y las pruebas experimentales realizadas en lazo abierto. La Tabla 1 resume las principales características técnicas, operativas y dinámicas del biodigestor, obtenidas a partir

de la etapa experimental y del diseño del sistema desarrollado.

Parámetro	Descripción / Valor característico	Observaciones técnicas
Tipo de biodigestor	Batch (discontinuo)	Adecuado para análisis experimental y control de variables
Material del reactor	Aluminio	Buena conductividad térmica y resistencia mecánica
Volumen útil	≈ 1–2 L (escala de laboratorio)	Definido para pruebas controladas
Sustrato tratado	Palm Oil Mill Effluent (POME)	Alta carga orgánica
Régimen térmico	Mesofílico	Rango típico de operación biológica
Sistema de calentamiento	Resistencia calefactora tipo abrazadera	Distribución uniforme del calor
Potencia térmica nominal	700 W – 120 V	Operación a potencia máxima en lazo abierto
Sensor de temperatura	Termocupla tipo K + MAX6675	Lectura digital con compensación de unión fría
Rango de temperatura medido	Ambiente hasta ≈ 70 °C	Según prueba de calentamiento
Tiempo de respuesta térmica	Lento (orden de minutos)	Propio de sistemas térmicos con inercia
Variable manipulada (temperatura)	Potencia aplicada a la resistencia	Controlada mediante disparo de TRIAC
Variable controlada (temperatura)	Temperatura interna del biodigestor	Medida en el centro del reactor
Sensor de pH	Electrodo E-201-C	Medición continua con acondicionamiento analógico
Rango de pH operativo	Aproximadamente 6.5 – 7.5	Rango óptimo para metanogénesis
Actuadores de pH	Bombas peristálticas (ácido/base)	Dosificación controlada
Sensores de biogás	MQ-4 (CH_4) y MQ-2 (CO_2)	Monitoreo cualitativo
Sensor de presión	BMP280	Estimación indirecta de volumen de biogás

Parámetro	Descripción / Valor característico	Observaciones técnicas
Plataforma de control	ESP32	Procesamiento y comunicación en tiempo real
Tipo de control térmico	Control PI	Diseñado a partir de la caracterización
Tipo de control de pH	Lógica difusa	Adecuado para proceso no lineal
Tipo de prueba realizada	Lazo abierto (calentamiento)	Base para identificación del sistema
Finalidad de la caracterización	Diseño y ajuste de controladores	Mejora de estabilidad del proceso

6.1 Avances en la caracterización térmica del biodigestor.

Como parte de los avances del proyecto, se realizó la caracterización experimental del comportamiento térmico del biodigestor anaeróbico mediante pruebas en lazo abierto, con el objetivo de analizar la dinámica del sistema y obtener información relevante para el diseño del controlador de temperatura.

La prueba consistió en aplicar potencia máxima a la resistencia calefactora tipo abrazadera instalada alrededor del reactor, mientras se registró de manera continua la evolución de la temperatura interna del biodigestor. Durante el ensayo, la medición de temperatura se realizó mediante una termocupla tipo K ubicada en la zona central del reactor, lo que permitió obtener una representación adecuada del comportamiento térmico global del sistema.

Los resultados obtenidos evidencian un incremento progresivo de la temperatura, característico de sistemas térmicos con elevada inercia, donde la respuesta presenta una pendiente inicial moderada y un tiempo de establecimiento del orden de varios minutos. Este comportamiento confirma que el biodigestor puede ser modelado como un sistema de primer orden con retardo despreciable, condición comúnmente reportada en procesos térmicos de pequeña

escala.

En la Figura 10 se presenta la curva de respuesta (temperatura vs tiempo) obtenida durante la prueba en lazo abierto, donde se observa el aumento de la temperatura desde condiciones ambientales hasta valores cercanos al régimen térmico deseado para la digestión anaerobia.

Figura 10. Respuesta térmica del biodigestor ante la aplicación de potencia máxima (prueba en lazo abierto).

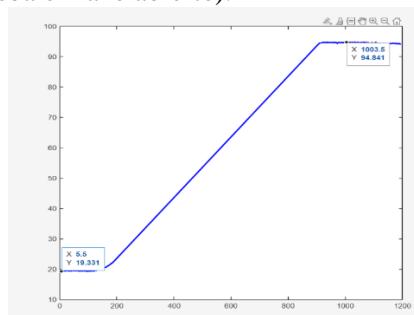


Figura 1. Comportamiento del biodigestor ante un escalón del 100%

Fuente: Autor

6.2 Diseño del sistema de detección de cruce por cero para el control PI de temperatura

Para implementar el control proporcional-integral (PI) de la temperatura del biodigestor fue necesario diseñar un sistema de detección de cruce por cero de la señal de alimentación en corriente alterna, el cual permite sincronizar la activación de la resistencia calefactora con la red eléctrica. Esta estrategia es ampliamente utilizada en sistemas de control de potencia por ángulo de disparo, ya que reduce interferencias electromagnéticas y mejora la precisión del control térmico.

El sistema de cruce por cero se diseñó a partir de un optoacoplador con detección de cruce, el cual permite aislar eléctricamente el circuito de potencia del sistema de control basado en el microcontrolador ESP32. De este modo, cada vez que la señal de la red eléctrica atraviesa el valor de cero voltios, el optoacoplador genera un pulso lógico que es enviado a una entrada digital del

microcontrolador.

Estos pulsos de sincronización son utilizados como referencia temporal para el control PI, ya que permiten identificar el inicio de cada semiciclo de la señal de corriente alterna. A partir de esta referencia, el controlador calcula el retardo de disparo correspondiente, en función del error entre la temperatura medida y el valor de referencia, ajustando así la potencia suministrada a la resistencia calefactora.

La etapa de potencia se implementó mediante un TRIAC, el cual es activado a través de un optoacoplador de disparo, garantizando el aislamiento y la seguridad del sistema. El disparo del TRIAC se realiza después de un tiempo de retardo calculado por el controlador PI, contado a partir del instante de cruce por cero detectado. De esta manera, se logra un control continuo y gradual de la potencia aplicada, evitando conmutaciones abruptas que podrían afectar la estabilidad térmica del biodigestor.

En la Figura 10 se presenta el diagrama funcional del sistema de detección de cruce por cero y control de potencia implementado, donde se observa la interacción entre la red eléctrica, el circuito de detección, el microcontrolador y la etapa de potencia.

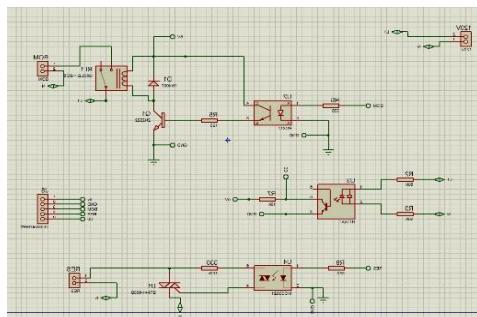


Figura 10. Diseño y simulación en proteus para la etapa de potencia con cruce por ceros.

Fuente: Autor

En la imagen se observa el esquemático del circuito de control de potencia con cruce por cero realizado en software de simulación

(Proteus). El diseño incluye un optoacoplador que detecta el cruce por cero de la señal de corriente alterna, un microcontrolador encargado de generar el disparo en el momento adecuado y un triac con su respectivo optoaislador (MOC) para controlar la potencia entregada a la carga. También se incorporan resistencias, diodos y condensadores como elementos de protección y acoplamiento, garantizando el correcto funcionamiento del sistema y el aislamiento entre la parte de control y la parte de potencia.

6.2.1 Pruebas experimentales de la etapa de potencia y sincronización por cruce por cero.

Con el fin de validar experimentalmente el correcto funcionamiento de la etapa de potencia y del sistema de detección de cruce por cero, se realizaron pruebas en laboratorio utilizando instrumentación de medición digital. Durante estos ensayos, el circuito físico fue conectado a la red eléctrica y supervisado mediante un osciloscopio digital, permitiendo analizar en tiempo real las señales involucradas en el proceso de control de potencia.

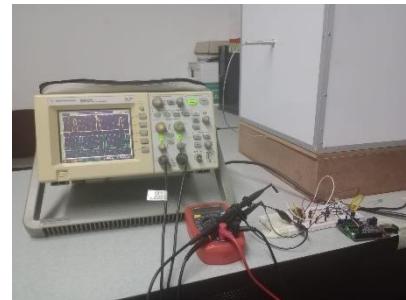


Figura 3. Pruebas de la etapa de potencia.

Fuente: Autor

En la imagen se muestra la prueba experimental del sistema en laboratorio, donde el circuito físico se conecta y se mide su comportamiento mediante un osciloscopio digital. Se pueden apreciar las sondas conectadas al prototipo, que permiten observar la señal de disparo y la forma de onda de salida en la carga.

Referencias

- [1] M. S. Saad, M. D. H. Wirzal y Z. A.

- Putra, «Review on current approach for treatment of palm oil mill effluent: Integrated system,» *Journal of Environmental Management*, vol. 286, nº 112209, 2021.
- [2] D. e. a. Dominic, «Recent developments in biological processing of palm oil mill effluent (POME),» *Biology*, vol. 11, nº 4, p. 525, 2022.
- [3] S. S. e. a. ... Mahmonds, «Water reclamation from palm oil mill effluent (POME) : Recent technologies , by-product recovery , and challenges,» *Journal of Water Process Engineering*, vol. 52, p. 103488, 2023.
- [4] I. U. e. a. ... Khan, «Innovative solutions for palm oil mill effluent treatment,» *ACS ES&T Water*, 2024.
- [5] M. M. Aziz y A. R. Abu-Bakar, «Recent advances on palm oil mill (POME) pretreatment and anaerobic reactor for sustainable production,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 119, p. 109593, 2020.
- [6] M. A. Ghanavati, E. Vafa y M. Shahrokhi, «Control of an anaerobic bioreactor using a fuzzy supervisory controller,» *of proces control*, vol. 103, pp. 87-99, 2021.
- [7] K. Sbarciog, D. Vande Wouwer y J. C. Scherpen, «Nonlinear control of anaerobic digestion systems : A review,» *Control Engineering Practice*, vol. 104 , p. 104623, 2020.
- [8] S. ... e. a. Zenani, «A review of the application of fuzzy logic in bioenergy technologies,» *Processes* , vol. 11, p. 1427, 2023.
- [9] S. e. a. Kalamaras, «A low-cost IoT system based on the EPS32 microcontroller for efficient monitoring of a pilot anaerobic biogas reactor,» *Applied Sciences* , vol. 14, nº 2, p. 634, 2024.
- [10] M. A. e. a. Hannan, «IoT-Based monitoring and control of biogas plants :A review,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 114014-114029, 2020.
- [11] E. Sysyms, «EPS32-WROOM -32 Datasheet,» 2022.
- [12] A. Devices, «MAX6675 Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital,» 2021.
- [13] B. Sensortec, «BMP280 Digital Pressure Sensor -DAtasheet,» 2021.
- [14] A. Electronics, «AHT20 Temperature and Humidity Sensor -Datasheet,» 2022.
- [15] Whatwg, «WebSockets Standar (Living Standarr),» 2022.
- [16] K. J. Astrom y T. Hagglund, *PID Controllers: Theory , Desingn, and Tuning*, ISA, 2021.
- [17] J. ... Bentley, *Principles of Measurement Systems*, Pearson Education, 2005.
- [18] J. B. Holm-Nielsen, T. Al Seadi y p. Oleskowicz -Popiel, «The future of anaerobic digestion and biogas utilization,» *Bioresource Technology*, vol. 100, nº 22, pp. 5478-5484, 2009.
- [19] R. M. El-Mashad, «Process stability indicators in anaerobic digestion systems,» *Waste management* , vol. 102, pp. 348-356, 2009.
- [20] A. F. Ward, p. Hobbs, H. p. y D. Jones, «Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources,» *Bioresource Techology*, vol. 99, nº 17, pp. 7928-7940, 2008.
- [21] I. e. a. Angelidaki, «Anaerobic digestion of agro-industrial residues,» *Water Science and Technology*, vol. 52, nº 1-2, pp. 1-9, 2005.
- [22] Whatwg, «WebSockets (Living Standard),» 2022.