

Evaluación del potencial energético del biogás: Control PI en un microcontrolador para la producción de biogás

Cindy Lorena Díaz M.

Estudiante décimo semestre Ingeniería electrónica, Universidad de Cundinamarca. Estudiante integrante del grupo de investigación GITEINCO. cdiaz@mail.unicundi.edu.co

Humberto Numpaque L.

Ingeniero Electrónico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Magíster en ingeniería de control industrial. Docente del Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad de Cundinamarca, e investigador grupo GITEINCO. hnumaque@mail.unicundi.edu.co

Steven Martínez V.

Estudiante décimo semestre Ingeniería electrónica, Universidad de Cundinamarca. Estudiante integrante del grupo de investigación GITEINCO. smartinezv@mail.unicundi.edu.co

Ilber Adonayt Ruge R.

Ingeniero Electrónico, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Magíster en ingeniería de control industrial. Docente del Departamento de Ingeniería Electrónica, UPTC. iruge@mail.unicundi.edu.co

Recibido: 7 de noviembre de 2013 Aprobado: 10 de diciembre de 2013

Artículo investigación científica y tecnológica, como producto elaborado en la Universidad de Cundinamarca.

Resumen

El siguiente trabajo presenta el desarrollo de un Reactor Anaeróbico Tipo Batch de nueve litros, el cual permite generar Biogás a partir de la descomposición de Residuos Sólidos Orgánicos (RSO). Para esto se diseñaron e implementaron tres reactores con capacidad de tres litros cada uno, los reactores fueron instrumentados con sensores de temperatura y un sistema de calentamiento térmico mediante chaqueta de agua, el cual está compuesto por una resistencia eléctrica de 1000 W y un módulo de regulación de potencia eléctrica. El sistema de calentamiento térmico a través de un controlador PI permite controlar la temperatura de los reactores alrededor de 35°C (Rango mesofílico del proceso de Digestión Anaeróbica).

Una vez Instrumentado el reactor se procedió a realizar la identificación del proceso (Temperatura Vs. Voltaje de entrada al regulador de potencia eléctrica) mediante el método de Smith, posteriormente se sintonizó un control PI con el método de Ziegler Nichols y se implementó en un micro-controlador de ocho bits.

Palabras Claves: Algoritmo de Control, Biodigestor Tipo Batch, Controlador PI, Descomposición Anaeróbica.

Abstract

This work presents the development of an Anaerobic Batch Reactor Type of nine liters which can generate biogas from the decomposition of Organic Solid Waste (RSO). To achieve this, three reactors were designed and implemented with three-liter capacity. The reactors were equipped with temperature sensors and a thermal heating system which consist of a water jacket which is composed by a 1000 W electrical resistance and a regulation modulus of electrical power. The thermal heating system through a PI controller can control the reactor temperature around 35 °C (mesophilic range Anaerobic Digestion process).

Key words: Algorithm Control, Batch Type Biodigestor, PI controller, decomposition Anaerobic.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica ha sido una constante evolutiva a través de los años y a medida que esta crece también crece la necesidad de disminuirla para mejorar la calidad de vida de los seres vivos. A causa de esto se considera generar energías alternativas las cuales permitan suplir las necesidades del ser humano a partir de la utilización de los recursos naturales existentes. Una de las energías alternativas que en la actualidad ha estado en constante estudio y evolución es la producción de Biogás a partir de digestión anaeróbica de residuos sólidos orgánicos (RSO).

Por la anterior razón, la Universidad de Cundinamarca sede Fusagasugá, ha decidido contribuir en dicha temática mediante la formulación y desarrollo del proyecto de investigación "Evaluación del Potencial Energético del Biogás Producido Mediante Digestión Anaeróbica de Fracción de Residuos Sólidos" [1], cuya finalidad es estudiar el efecto de la temperatura en la calidad y potencial energético del biogás producido por DA de RSO durante doce semanas, y compararlo con combustibles convencionales para evaluar si éste puede ser empleado como fuente de energía alternativa.

El presente documento muestra un avance del proyecto en mención el cual está actualmente en ejecución. Aquí se muestra la realización de un prototipo de reactor anaeróbico tipo Batch que permite la generación de Biogás a partir de la descomposición de RSO; partiendo de la implementación del prototipo a escala, se instala sobre éste una etapa de potencia (PWM de onda completa sincronizado con la red) que es la encargada de regular el voltaje que le es entregado a la resistencia eléctrica para que ésta mantenga constante la temperatura del reactor en la fase mesofílica (35°C), la señal de control para la etapa de potencia es generada a través de un controlador PI el cual es diseñado en un Algoritmo y que para su implementación es llevado a un Microcontrolador.

II. MÉTODOS Y MATERIALES

Una de las partes más importantes del desarrollo del proyecto 'Evaluación del Potencial Energético del Biogás Producido Mediante Digestión Anaeróbica de Fracción de Resi-

duos Sólidos' [1], es la generación de un Prototipo de Reactor Anaeróbico tipo Batch, en donde las variables principales a monitorear son la temperatura y el pH, debido a esto se establece que el tanque instalado dentro del reactor debe tener un Manómetro, que permita visualizar la presión actual que posee el tanque al momento de sacar la muestra, un Motor y un Mezclador, que en conjunto sean un sistema de agitación para el sustrato en descomposición, una Válvula de extracción de gas, el cual permita la toma de la muestra de gas y finalmente un sistema que permita la toma de la muestra del sustrato en descomposición; la Fig. 1, muestra el diseño a escala de uno de los tanques que formaron parte del reactor.

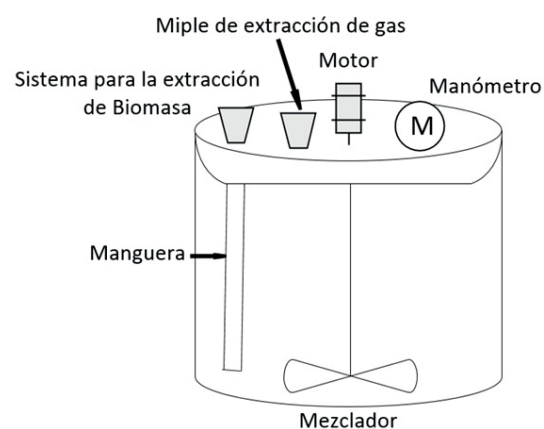
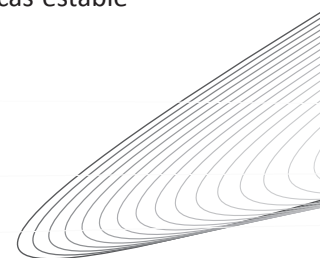


FIGURA 1. MODELO A ESCALA DE UNO DE LOS TANQUES QUE FORMAN PARTE DEL REACTOR IMPLEMENTADO. Fuente: Criollo, Martínez, Numpaque y Ruge.

Teniendo definidos los parámetros del tanque se hace la construcción del reactor, al cual se le estableció que debía cumplir con las siguientes características; su temperatura debía ser controlada a través de un controlador implementado sobre un Microcontrolador, el pH debía ser medido de forma Off-line, la calidad del biogás debía ser evaluada mediante la extracción de muestras del sustrato en descomposición y del gas generado, la chaqueta de agua que circulara entre los tanques debía ser climatizada a través de una resistencia eléctrica; y finalmente dicho sistema debía estar conformado por tres Biodigestores con las mismas características, esto con la finalidad de hacer la validación de los resultados obtenidos. La Fig. 2, muestra el prototipo a escala que se implementó, el cual cumple con todas las características establecidas.



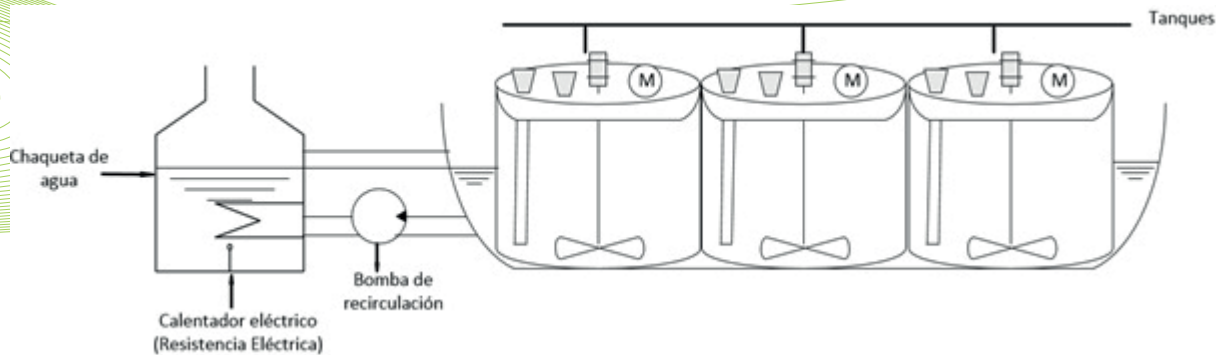


FIGURA 2. PROTOTIPO A ESCALA DEL REACTOR ANAERÓBICO TIPO BATCH IMPLEMENTADO.
Fuente: Criollo, Martínez, Numpaque y Ruge.

III. ETAPA DE POTENCIA DEL PROTOTIPO DE REACTOR ANAEROBICO TIPO BATCH

Este sistema es el encargado de variar el voltaje RMS que llega a la resistencia eléctrica, variando así su potencia de entrada, haciendo que aumente o disminuya la temperatura de esta según sea necesario. Éste consta de tres etapas fundamentales:

A. Detector de cruce por cero: En esta etapa el circuito detecta cuando la red eléctrica cruza por cero (punto de simetría de la señal sinusoidal de la red eléctrica convencional) y genera un pulso por cada cruce, existiendo así dos pulsos por cada período de la señal de la red, es decir uno por el semiciclo positivo y otro por el negativo.

B. Generador de señal PWM de control: Esta etapa toma el pulso generado por el detector de cruce por cero y genera una señal PWM, mediante la comparación de una señal rampa con un nivel de referencia (señal de control) la cual permite disparar el TRIAC a un ángulo determinado, dando paso así al control de la potencia de entrada de la resistencia eléctrica que gobierna el sistema. Al variar la referencia se permite variar el ciclo útil de la señal PWM, la cual tiene el doble de frecuencia de la señal de la red (120 Hz). Este sistema es generado sobre un Algoritmo que para su implementación es llevado a un Microcontrolador. La Fig. 3, muestra el diagrama de flujo que describe el funcionamiento del mismo.

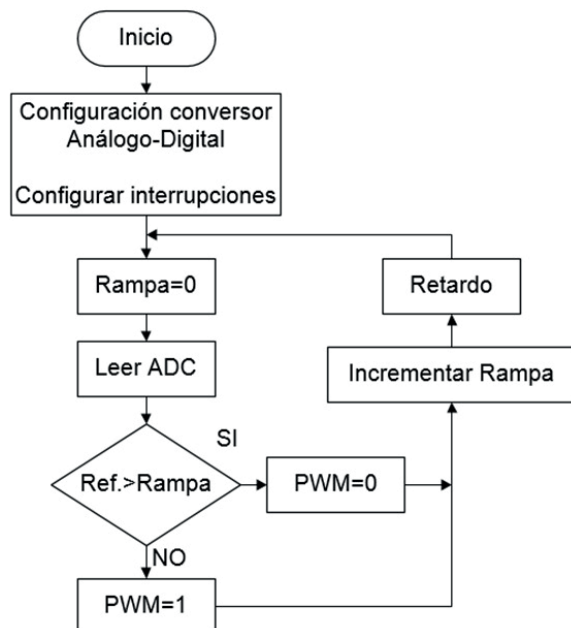


FIGURA 3. DIAGRAMA DE FLUJO DEL CÓDIGO DE LA ETAPA DE POTENCIA DEL SISTEMA.

C. Etapa final de potencia: Esta etapa recibe la señal PWM que permite variar el ángulo de disparo del TRIAC, el cual genera la variación del voltaje sobre la carga entre 0V-120Vrms, variando así la temperatura de la resistencia eléctrica de acuerdo a la referencia que se debe encontrar entre 0V-5Vdc (señal de control).

La unión de estas tres etapas constituye el dispositivo de potencia que se encarga de hacer el accionamiento del sistema implementado, la Fig. 4, muestra el diagrama de bloques de la etapa de potencia del sistema que fue diseñado e implementado.

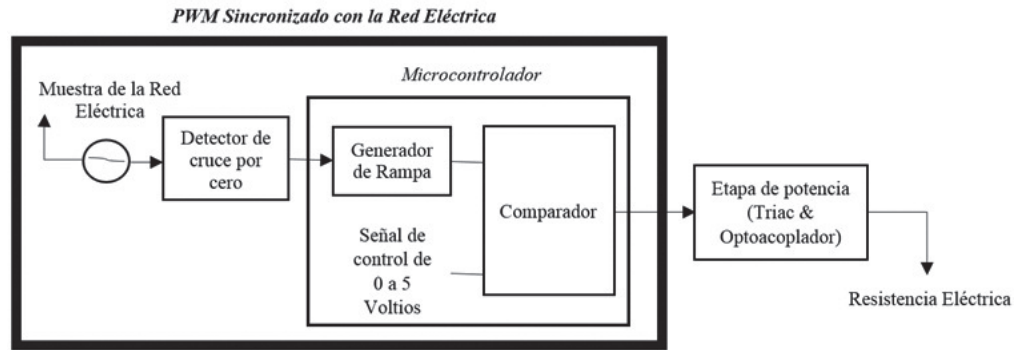


FIGURA 4. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA ETAPA DE POTENCIA DEL SISTEMA

IV. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR

Para el diseño del controlador se inicia llevando a cabo la adecuación del sensor de temperatura de la planta; para dicho propósito se trabajó con el sensor de temperatura Dallas DS18S20, el cual tiene alta sensibilidad ante las variaciones de temperatura, este es manejado mediante un Microcontrolador el cual permite visualizar por una LCD la temperatura actual, como se puede observar en la Fig. 5

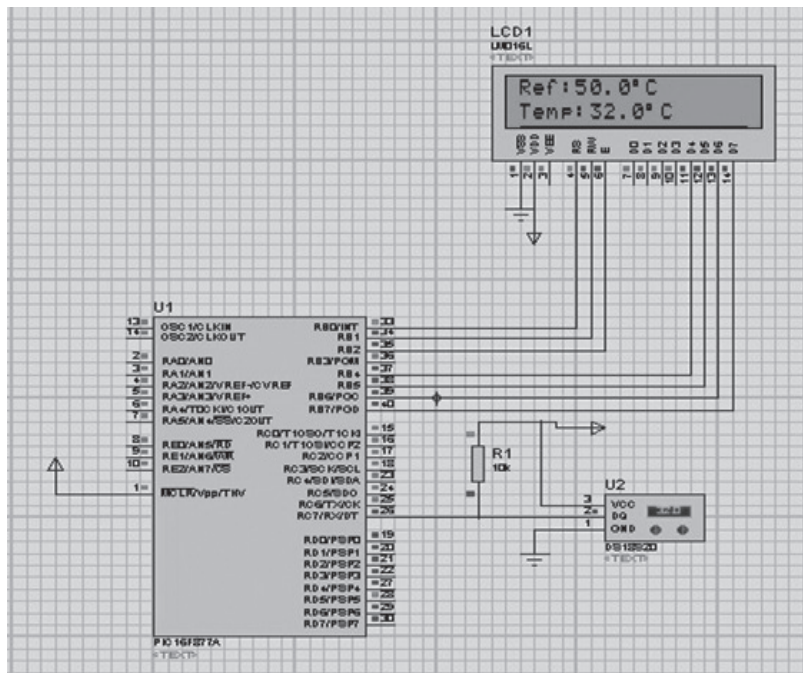


FIGURA 5. DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA. SIMULACIÓN APOYADA EN EL SOFTWARE PROTEUS.

Para diseñar e implementar el control fue necesario determinar la función de transferencia del sistema la cual se obtuvo a través del método de Smith (Dogan Ibrahim, 2006) ésta relaciona la temperatura del sistema (variable a controlar) en función del voltaje de referencia del sistema del regulador de potencia (variable manipulada); para este propósito se partió de un voltaje de referencia de 0V al cual le correspondía la temperatura ambiente del sistema y se aplicó un escalón de 5 voltios a la etapa de potencia utilizada, para posteriormente hacer el registro de los incrementos de temperatura hasta el punto en donde el sistema llegó a su temperatura máxima (Punto de ebullición – temperatura ambiente), dicho comportamiento se puede observar en la Fig. 6

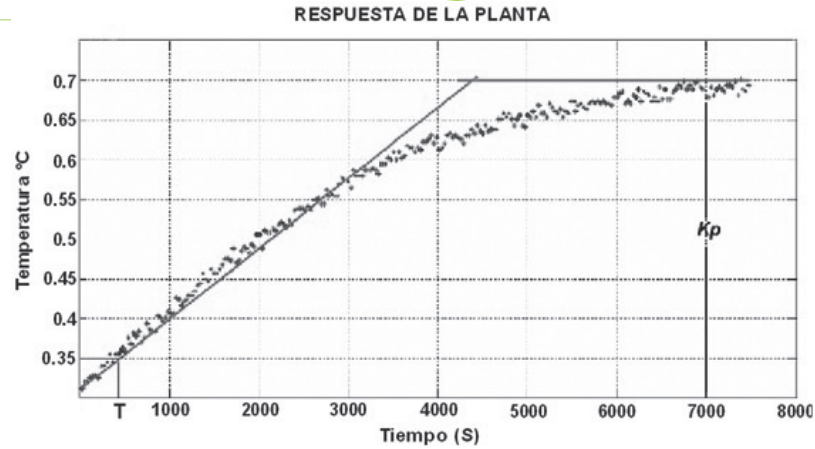


FIGURA 6. RESPUESTA DEL SISTEMA ANTE EL ESCALÓN APLICADO. APOYADA EN EL SOFTWARE MATLAB.

La respuesta obtenida tiene el comportamiento de un sistema de primer orden, mediante el método de Smith para un sistema de primer orden se llegó a la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{Kp * e^{-tds}}{Ts + 1} \quad [1]$$

Aplicando esto a la curva de reacción obtenida se tiene que;

$$K = \frac{Yf - Yi}{Uf - Ui} = \frac{69,43 - 31,19}{5 - 0} = 7,684 \quad [2]$$

$$\tau = 2700s \quad [3]$$

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} = \frac{7,684}{2700s + 1} \quad [4]$$

Ya habiendo obtenido la función de transferencia (Ecu. 4) y haciendo la comparación de la gráfica del modelo obtenido (Rojo) con la respuesta real del sistema (Azul), se procedió a realizar algunos ajustes en la función de transferencia obtenida, ya que no satisfacía del todo el modelo que se buscaba; con estas modificaciones se llegó a la función de transferencia utilizada para el diseño del controlador (Ecu. 5), la cual se aproxima al comportamiento real del sistema. La Fig. 7, muestra el paralelo que se realizó entre el modelo real del sistema y la función de transferencia obtenida.

$$G(s) = \frac{8,5}{3000s + 1} \quad [5]$$

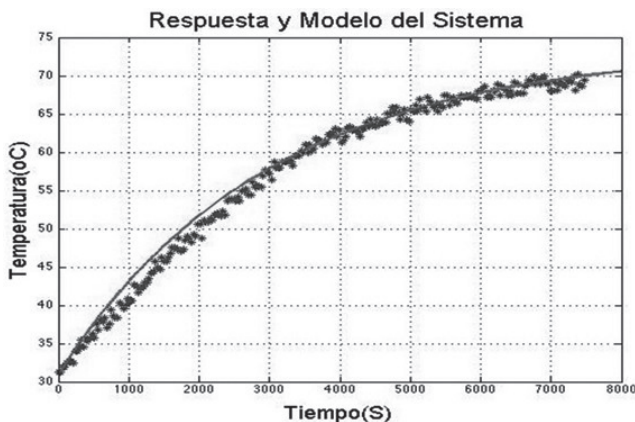


FIGURA 7. MODELO OBTENIDO VS. MODELO REAL

Ya con esta información establecida se procedió a hacer el diseño de un controlador el cual cumpliera con las siguientes características:

- Error en estado estacionario igual a cero
- Sobre impulsó menor o igual a un 5%
- Tiempo de establecimiento < 2 del sistema
- Señal de control menor o igual a 5V (Requerimiento de la Etapa de potencia)

Para ello, mediante la herramienta Tune de Simulink de Matlab, se adquiere la respuesta en lazo cerrado del sistema ante una entrada paso, el esquema utilizado para tal fin se muestra en la Fig. 8, observándose que el controlador que cumple con estas características es un controlador PI (Proporcional Integral).

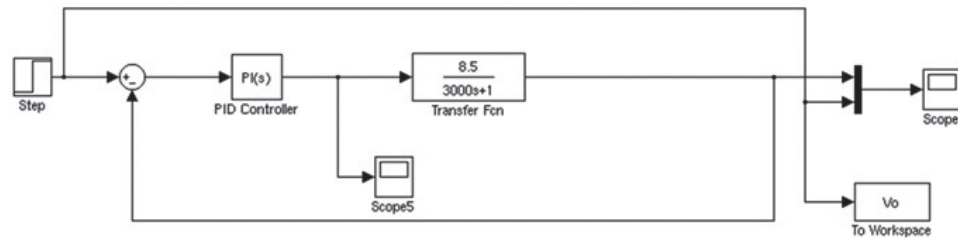


FIGURA 8. ESQUEMA DE SINTONIZACIÓN DE UN CONTROLADOR PI ANÁLOGO

Teniendo que la función de transferencia de un controlador PI en el dominio de Laplace [3] es:

$$PI = K_p + \frac{K_i}{s} \quad [6]$$

Donde K_p es la constante proporcional del controlador y K_i la constante integral. Mediante la técnica de sintonización de PI descrita se obtuvo la siguiente función de transferencia del controlador:

$$PI = 0,312 + \frac{0,00011}{s} \quad [7]$$

Utilizando la razón matemática obtenida (Ecu. 7), se obtiene la respuesta del sistema ante un escalón y la señal de control, la cual es mostrada en la Fig. 9.

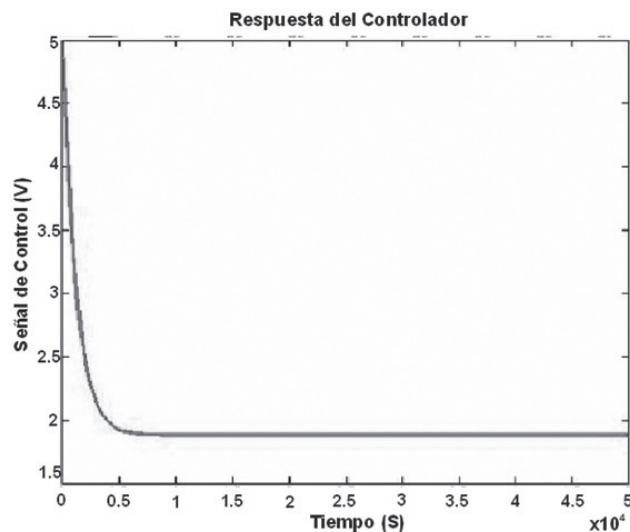


FIGURA 9. SEÑAL DEL CONTROL PI

El controlador diseñado es de tipo analógico, por lo tanto se hace necesario discretizar la función de transferencia obtenida mediante el uso de la transformada Z, para ello se hizo uso del comando de discretización de Matlab el cual contiene la siguiente estructura:

$$G(z)=c2d(Tf,Ts,'Zoh')$$

En donde;

Tf= Función de transferencia en S

Ts= Tiempo de muestreo en segundos

Zoh=Método de discretización

En donde el período de muestreo empleado para discretizar la función de transferencia fue de 300 segundos, este valor se seleccionó como una décima

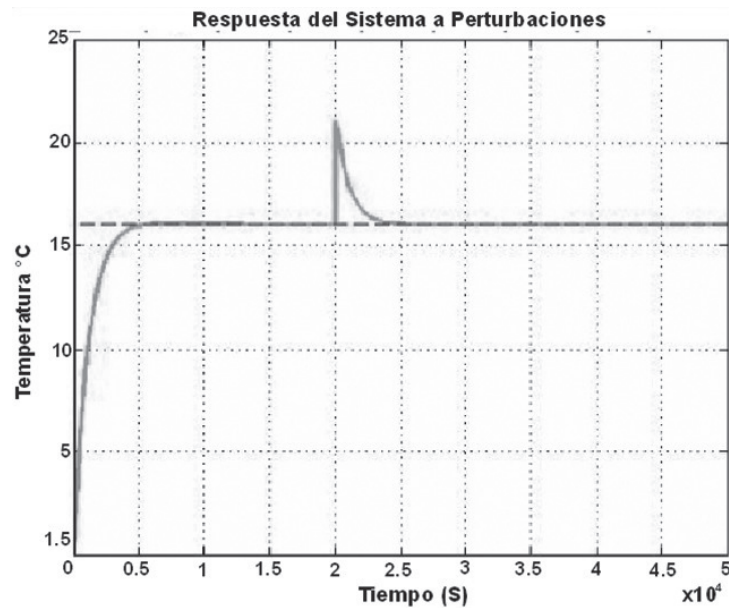


FIGURA 10. RESPUESTA DEL SISTEMA DISCRETIZADO

Para la implementación del controlador PI discreto obtenido; fue necesario llevar dicha función de transferencia a una ecuación en diferencias [3], la cual fue programada en un Microcontrolador de ocho bits de gama media de la familia microchip, la función de transferencia en modo de ecuación de diferencia implementado se muestra a continuación (Ecu. 9):

$$U(n) = 0,312E(n) - 0,279E(n-1) + U(n-1) \quad [9]$$

Donde:

U(n) = Señal de control

E(n) = Señal de error

E(n - 1) = Señal de error anterior

U(n - 1) = Señal de control anterior

Una vez obtenida la ecuación de diferencia se plasmó el sistema de lazo cerrado, mediante un algoritmo que describió el funcionamiento de éste, dicho algoritmo se muestra en el diagrama de flujo de la Fig. 11, este algoritmo se programó en un Microcontrolador y de esta manera queda diseñado e implementado el controlador PI.

Para el correcto entendimiento del algoritmo implementado debe de entenderse que las variables que intervienen en el sistema son:

$U(n)$ = Señal de control
 $U(n0)$ = Señal de control anterior
 $U(n)max$ = Señal de control máxima 5V
 $U(n)min$ = Señal de control mínima 0
 Ref = Temperatura deseada
 $E(n)$ = Señal de error
 $E(n0)$ = Señal de error anterior

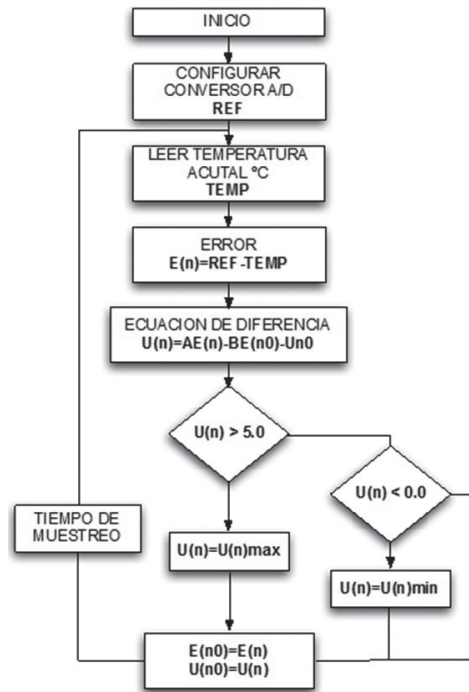


FIGURA 11. ALGORITMO DE CONTROL

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para validar la respuesta del sistema de control con la planta real se partió de una temperatura inicial de 27°C y se ajustó la temperatura deseada en 35°C, donde se pudo apreciar que el sistema logró estabilizarse en un tiempo de 17 minutos, donde permaneció estable hasta el minuto 35, punto en el que se varió la temperatura deseada a 40°C, el sistema logró dicha referencia en 10 minutos y luego se estabilizó, dicho comportamiento se puede observar en la Fig. 12. Mostrando que el sistema responde más rápido debido a la dinámica del mismo; el control funciona de forma adecuada manteniendo el error en estado estacionario igual a cero, presenta sobre impulsos por debajo del 5% y logra una estabilización en un tiempo muy corto en comparación al τ del sistema que está alrededor de los 3000 segundos.

VI. CONCLUSIONES

La implementación de tres tanques dentro del reactor, permite tener una mayor cantidad de datos y así poder garantizar una ma-

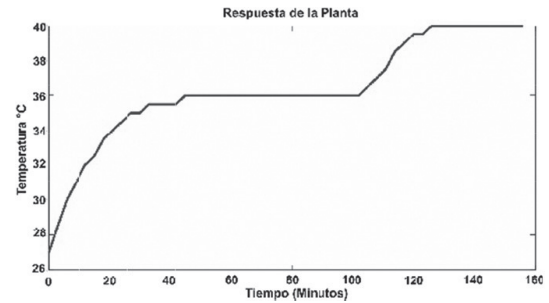


FIGURA 12. RESPUESTA DEL SISTEMA REAL CONTROLADOR.

yor veracidad al momento de hacer el análisis de la información obtenida y entregar un resultado con respecto a la calidad del biogás obtenido durante el proceso de descomposición.

La implementación del controlador PI en el Microcontrolador, permite reducción en el Hardware del sistema implementado; haciendo así más robusto su Software y permitiendo tener un mejor dominio sobre la instrumentación implantada en el reactor.

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen las contribuciones del ingeniero J. D. Alvarado, durante el desarrollo del proyecto.

REFERENCIAS

Criollo B., Martínez S., Numpaque H. y Ruge I. "Evaluación del potencial energético del biogás: Experimento Piloto". Artículo, memorias de la I Semana de Investigación Universitaria de la Universidad de Cundinamarca SIU de C 2013, ISBN 978-958-98231-8-7. Pág. 77-79.

Dogan Ibrahim. (2006) "Microcontroller Based Applied Digital Control". John Wiley & Sons, Ltd. 313 Pg.

Numpaque H. y Ruge I. "Evaluación del potencial energético del biogás producido mediante digestión anaeróbica de fracción orgánica de residuos sólidos". Proyecto de Investigación en ejecución (2013). Universidad de Cundinamarca.

Yadvika, Santosh, T. R. Sreekrishnan, Sengeeta K. y Vineet R. "Enhancement of biogás production from solid substrates using different techniques- a review". Bioresource Technology. Elsevier.

