

**PID TEMPERATURE CONTROL AND PH DOSAGE FOR METHANE
PRODUCCION FROM ANAEROBIC DIGESTION OF ORGANIC SOLID
WASTE**

**CONTROL PID DE TEMPERATURA Y DOSIFICACIÓN DE PH PARA LA
PRODUCCIÓN DE GAS METANO A PARTIR DE LA DIGESTIÓN
ANAERÓBICA DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS**

Ing. Brayhan Criollo, Ing Jose David Alvarado, MSc. Humberto Numpaque

Universidad de Cundinamarca

Facultad de Ingeniería, Programa Ingeniería Electrónica, Grupo de Investigación de
Tecnológicas de la Información y Comunicaciones GITEINCO. Fusagasugá,
Cundinamarca, Colombia.

E-mail: {bcriollo, jdalvarado, hnumpaque} @mail.unicundi.edu.co

Abstract: The production of biogas from anaerobic digestion (AD) of organic fraction of solid waste is an alternative method to obtain a renewable energy source. However, to achieve this purpose it's necessary to control some critical variables in the process such as pH and temperature; those can modifying the dynamics of biogas production. The temperature range to favor the DA process used is understood thermophilic between 30°C to 40°C; and pH between 6.5 and 7.5. This paper presents the development of a digital PID control system temperature, a measuring system in line pH and dosage of hydrochloric acid (HCl) and sodium hydroxide (NaOH) to adjust pH within a reactor type Batch five liters of capacity.

Keywords: Anaerobic digestion, biogas, positional PID control, pH electrode.

Resumen: La producción de biogás a partir de digestión anaeróbica (DA) de fracción de residuos sólidos orgánicos es un método alternativo para obtener una fuente renovable de energía. Sin embargo, para lograr este propósito es necesario controlar algunas variables críticas del proceso como: el pH y la temperatura, que permiten modificar la dinámica de producción de biogás. El rango de temperatura para favorecer el proceso de DA utilizado es el termofílico comprendido entre los 30°C a 40°C; y el pH entre 6.5 y 7.5. Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema de control PID digital de temperatura, un sistema de medición en línea de pH y dosificación de ácido clorhídrico (HCl) e Hidróxido de Sodio (NaOH) para regular el pH al interior de un reactor tipo Batch de cinco litros de capacidad.

Palabras clave: Digestión anaerobia, Biogás, Control PID posicional, electrodo de pH.

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia se generan alrededor de 27.500 toneladas/día de residuos sólidos de los cuales el 65% son residuos sólidos orgánicos (Jaramillo Henao & Zapata Marquez, 2011), la composición física es Metal 2%, Plástico 13%, papel 3%, vidrio 1%, y principalmente de residuos de alimentos 81% (Marmolejo, Torres, Oviedo, & Bedoya, 2009). Estos residuos son recolectados y

almacenados especialmente en rellenos sanitarios y botaderos a cielo abierto lo que genera un impacto negativo en términos económicos y ambientales.

En la actualidad existen diferentes disposiciones legales sobre la gestión de los residuos sólidos (RS), como plantas de manejo (Marmolejo L. , Torres, Oviedo, Garcia, & Diaz, 2011), que permiten mitigar los impactos ambientales

generados reciclando la mayor cantidad posible de los residuos recolectados (Logreira, Molinares, Sisa, & Manga, 2008), pero este manejo no se aplica para los residuos sólidos orgánicos (RSO), a los cuales generalmente se espera a que realicen la descomposición, proceso en el cual se generan diferentes gases, olores, líquidos entre otros, de los que no se realiza ningún tipo de aprovechamiento económico y que impactan negativamente en el ambiente. Lo que se busca es una alternativa para explotación del potencial energético de los RSO que permita minimizar el tiempo y maximizar producción Biogás (CH₄) a partir de los RSO en Fusagasugá.

La Universidad de Ibagué en conjunto con la Universidad de Cundinamarca han venido desarrollando el proyecto titulado "Modelización, simulación, control y optimización de la producción de metano e hidrogeno por vía digestión anaerobia de residuos orgánicos, urbanos y agrícolas", el cual fue aprobado por la Vicerrectoría y Dirección de Investigación de la Universidad de Ibagué con el código 11-241-COL0022914 acta CI 14-2011, en el marco de la convocatoria interna para la inscripción y financiación de proyectos de investigación.

El proyecto consta de tres etapas; la etapa inicial fue implementar un reactor anaeróbico tipo Batch de cinco litros con sus respectivos módulos de sensores de pH, presión y temperatura; en la segunda etapa se diseñó e implemento un sistema de control de temperatura para favorecer el proceso de DA según (Díaz , Rodríguez, Lizarazo, Duenas , Penaranda, & Bernal , 2011) en el rango mesofílico (40°C), para favorecer el crecimiento de la población bacteriana al interior del reactor que genera el biogás. Y la tercera etapa fue implementar un dosificador de ácido clorhídrico (HCL) e hidróxido de sodio (NaOH) para estabilizar el pH del sustrato.

2. DESARROLLO

Para establecer los efectos de la temperatura y el pH en la producción de biogás se construyó un biorreactor anaeróbico tipo Batch (Ramon, Gastelbondo, & Bedoya, 2006) basados en el modelo de estructura definida por (Chae, Jang, Yim , & Kim, 2008) que posee un sistema para regular la temperatura y el pH en el sustrato, con una capacidad de almacenamiento de 5 litros. En la figura 1 presenta el diagrama de bloques del reactor empleado.

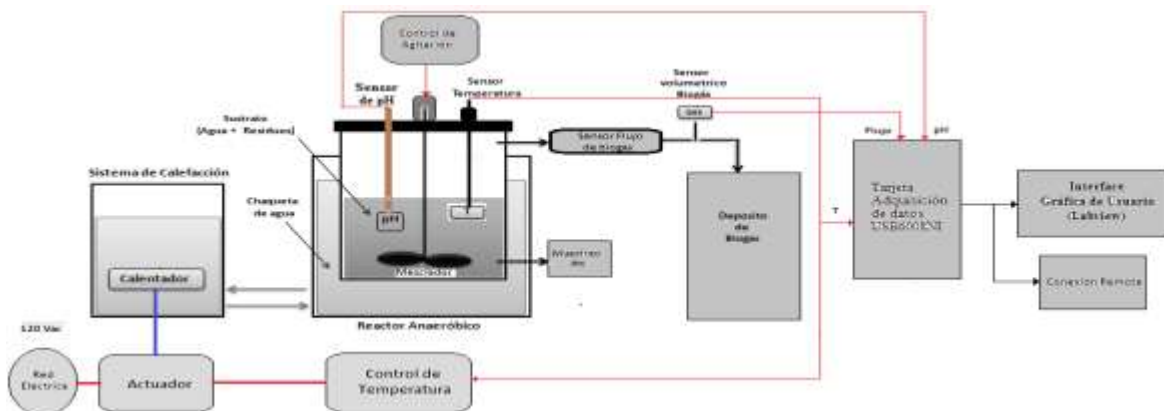


Fig. 1. Diagrama de bloques del reactor empleado.

SENSOR DE TEMPERATURA. Este sensor es el que retroalimentará al sistema de control, por consiguiente debe ser acondicionado en el rango de temperaturas de 20°C a 60°C; de acuerdo a esto se seleccionó el sensor digital DS18S20 Dallas, el cual para su funcionamiento requiere las librerías y el compilador como lo describe el diagrama de bloques de la figura 2.



Fig. 2. Diagrama de bloques del sensor de temperatura.

INSTRUMENTACION DEL ACTUADOR. Una vez conocida la naturaleza resistiva del actuador y su funcionamiento con energía alterna AC, se implementó un sistema de PWM sincronizado con la red eléctrica, el cual permite realizar un control haciendo una variación del ciclo útil desde una señal en DC, a una carga en AC.

La etapa de PWM sincronizado presenta un funcionamiento descrito por el diagrama de bloques de la figura 3

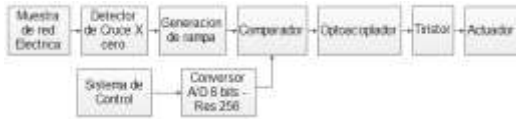


Fig. 3. Diagrama de bloques para el PWM sincronizado a la red.

En el sistema de PWM sincronizado, se utilizó un microcontrolador PIC16F873, donde se implementaron las rutinas e interrupciones para generar la señal de PWM, el cual tiene el diagrama de flujo de la figura 4.

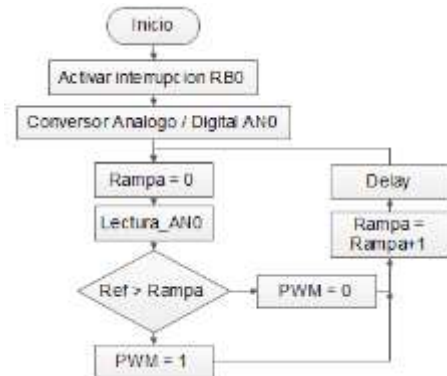


Fig. 4. Diagrama de bloques del sistema de PWM sincronizado con la red eléctrica.

OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA

Una vez obtenidos los anteriores sistemas PWM sincronizado y el sensor de temperatura (entrada y salida respectivamente); se procedió a interconectar el sistema en lazo abierto como es mostrado en la figura 5 para obtener la curva de reacción del sistema en el tiempo.



Fig. 5. Diagrama de bloques de la planta en lazo abierto.

Esta curva de reacción es necesaria para la obtención de un modelo (función de transferencia) que posteriormente permitirá implementar un sistema de control.

Inicialmente se energizó el sistema con un escalón de 1V, y se encontró que su respuesta tuvo una estabilización en 30°C, para después cambiar el escalón a 1.5v, estabilizándose nuevamente esta vez en 40.2°C, y posteriormente obtener la respuesta a un último escalón a 2v, y se obtuvo la curva de reacción de la figura 6.

Una vez obtenida la curva de reacción del sistema a tres escalones en lazo abierto, se analizó que el escalón de 1.5V es el que asegura el rango termofílico de 30°C a 40°C según

(Sambo, Garba, & Danshehu, 1995), el cual corresponde al diseño del controlador, y por consiguiente a la identificación del sistema.

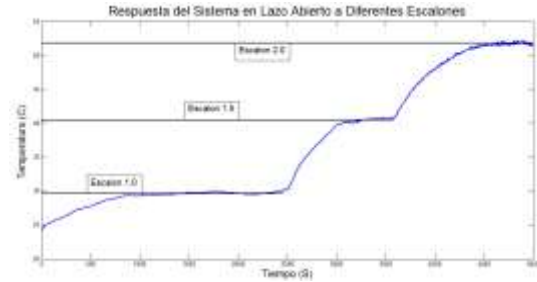


Fig. 6. Respuesta en lazo abierto del sistema a diferentes escalones.

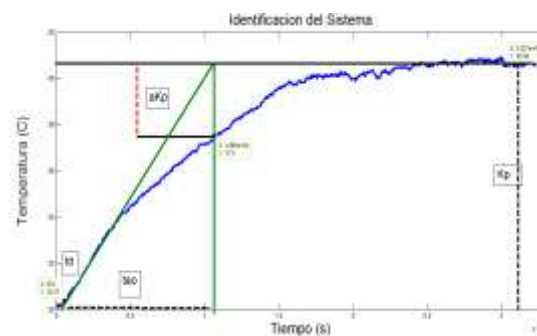


Fig. 7. Respuesta en lazo abierto del sistema con estabilización a 40°C

Se realizó la respectiva identificación de la respuesta al escalón aplicado mediante el método de Van Der Grinten para la identificación de sistemas dinámicos, el cual define el modelo de función de transferencia del sistema con las ecuaciones 1 y 2 según (Lennart, 1999).

$$a = \frac{1}{e} \rightarrow G(s) = Kp \frac{e^{-\tau ds}}{\tau s + 1} \quad (1)$$

$$a \neq \frac{1}{e} \rightarrow G(s) = Kp \frac{e^{-\tau ds}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (2)$$

Para este caso $a \neq (1/e)$ ya que $0.2819 \neq 0.3679$. Lo que define que el sistema es de segundo orden y que se utilizará la ecuación 2.

Mediante esta técnica, se debe analizar de la figura 7 el aKp, τ_d , τ_0 y Kp para determinar la función de transferencia que describe el sistema; por análisis de la figura 7 se encuentra un tiempo muerto de 510s, según (Arroyo, Díaz, & Pinzon, 2011) este tiempo es debido a la dinámica del proceso de los sistemas de temperatura.

Para resolver la ecuación 2 se deben despejar las variables de las ecuaciones 3,4 y 5.

$$\tau_d = \tau'_d - \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + 3\tau_2} = 3.208 \times 10^3 \quad (3)$$

$$\tau_1 = \tau^* \frac{3ae-1}{1+ae} = -6.072 \times 10^3 \quad (4)$$

$$\tau_2 = \tau^* \frac{1-ae}{1+ae} = 8.1064 \times 10^3 \quad (5)$$

La función de transferencia que describe el sistema después de despejar la ecuación 2 es la mostrada en la ecuación 6.

$$G(s) = \frac{21e^{-510s}}{(-6072s + 1)(8106s + 1)} \quad (6)$$

Una vez obtenida la función de transferencia se obtuvo la respuesta de la misma y se comparó con la respuesta natural del sistema la cual es mostrada en la figura 8.

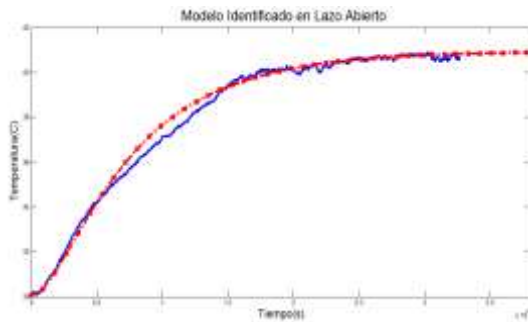


Fig. 8. Respuesta de la función de transferencia.

SISTEMA DE CONTROL

Para el diseño del sistema de control se establecieron los parámetros siguientes:

- Valor del sobre impulso menor del 5% para una entrada de escalón que sea menor o igual a 5V
- Error en estado estacionario sea igual a cero
- Tiempo de establecimiento sea $< 2\tau$ del sistema.

Dadas las anteriores características se identificó que el sistema debe llevar las especificaciones de un sistema de control por posición (Ogata, 1996), como el mostrado en el diagrama de bloques de la figura 9.

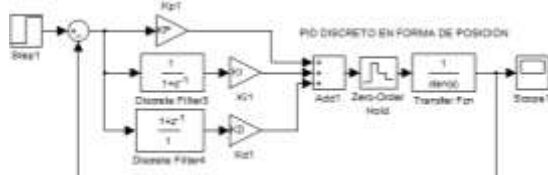


Fig. 9. Diagrama de bloques del sistema de control en la forma de posición.

Una vez obtenida la función de transferencia que describe la planta, se procede a generar el sistema de control basado en el método de Kaiser Chiara (KC) según (De keyser & Ionescu, 2010), para obtener las constantes del controlador PID.

Inicialmente se realizó la simulación de la función de transferencia de la planta con un relé como se muestra en la figura 10.

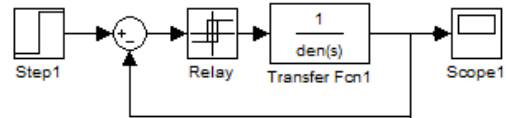


Fig. 10. Realimentación con Relé, Kaiser Chiara (KC).

De esta simulación se encuentran los datos de las variables de $\alpha = 2.1$, y $Tc = 6000$. Mediante las cuales se obtuvo las variables del controlador PID con las ecuaciones 7 a la 12.

$$Kc = \frac{4d}{\pi * \alpha} = 31.054 \quad (7)$$

$$Kp = Kc * \text{Cos}(50) = 0.464 \quad (8)$$

$$Ti = Tc * \frac{1 + \text{Sen}(50)}{\pi * \text{Cos}(50)} = 4095 \quad (9)$$

$$Ki = \frac{Kp}{Ti} = 0.00113 \quad (10)$$

$$Td = 0.25 * Ti = 1023 \quad (11)$$

$$Kd = Kp * Td = 475.11 \quad (12)$$

Las variables obtenidas del controlador fueron en el dominio del tiempo, pero debido a las características del Microcontrolador, es necesario discretizar estas variables según (Ogata, 1996) con las ecuaciones 13 a la 15.

$$KP = Kp - \frac{Kp * Ts}{2 * Ti} = 0.4606 \quad (13)$$

$$KI = \frac{Kp * Ts}{Ti} = 0.0068 \quad (14)$$

$$KD = \frac{Kp * Td}{Ts} = 7.9186 \quad (15)$$

Una vez terminado el diseño del control PID, se ajustaron las constantes para posteriormente implementarse en el dispositivo Arduino Uno R3 con un Setpoint de 40°C; y su respuesta en el tiempo es la mostrada en la figura 11.

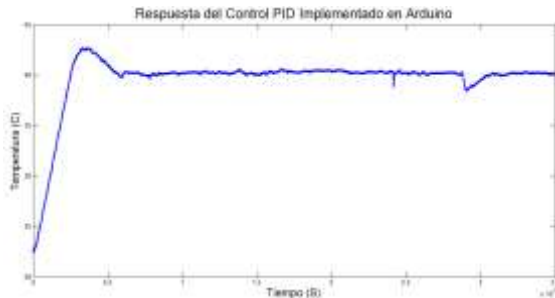


Fig. 11. Respuesta del controlador implementado.

Donde se comprueba el correcto funcionamiento del sistema, con rechazo a perturbaciones, el máximo sobrepico es aproximadamente al diseñado del 5% y no presenta error en estado estacionario.

INSTRUMENTACION DEL DOSIFICADOR DE PH

Se diseñó el dosificador de HCL e NaOH para mantener el pH dentro del reactor en un rango de 6.8 – 7.2 para favorecer el proceso de crecimiento de las poblaciones bacterianas y a su vez esta variable de pH indicara las etapas de fermentación de las bacterias (Ramón, Barragan, & Romero, 2007).

Inicialmente para instrumentar el electrodo de pH es importante mencionar que estos presentan alta impedancia de entrada en el rango de 50MΩ o 500MΩ, y su funcionamiento es como una fuente de voltaje, donde el voltaje producido es proporcional a la concentración de iones de hidrogeno, y por lo tanto es equivalente al logaritmo de la concentración de iones como lo presenta la ecuación 16.

$$pH = -\log_{10}(ah) \quad (16)$$

En la instrumentación de la sonda de pH, se obtuvo la respuesta de voltaje a diferentes buffer de 1 al 13, el cual mostro el comportamiento de la figura 12.

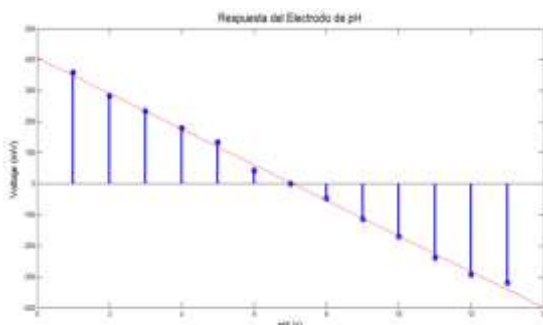


Fig. 12. Comportamiento de la sonda de pH a diferentes buffer de pH.

De acuerdo a este comportamiento se estableció que el sistema deberá tener:

1. Amplificación con amplificador operacional (AO) de bajo ruido y una alta impedancia de entrada que supere o iguale la impedancia de la sonda de pH.
2. Filtrado de ruido eléctrico.
3. Conversión A/D para el microcontrolador a utilizar.

Se diseñó e implementó el circuito de medición de pH, el cual presenta variaciones de voltaje de acuerdo a los diferentes buffer de calibración como lo son el pH 4 y pH 7. La figura 13 muestra el circuito implementado para la instrumentación del sensor.

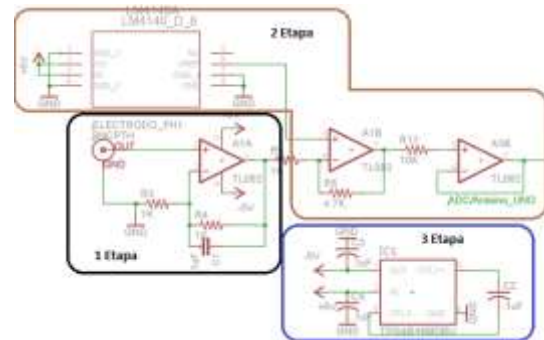


Fig. 13. Circuito implementado para la instrumentación del electrodo de pH.

Debido a las características del sensor, se seleccionó el amplificador operacional TL082, el cual es un amplificador operacional de entrada JFET con bajo nivel de ruido y alta impedancia de entrada alrededor de $10^{12}\Omega$. Inicialmente se configuró una primera etapa de amplificación con configuración de amplificador no inversor con una ganancia de $Gain = (1 + (R7/R8)) = 2$ y un filtro con el capacitor C9 para disminuir el ruido electrónico ya que el electrodo es altamente sensible a éste.

Las sondas de pH teóricas presentan una variación de 58mV entre cada unidad de pH, y en pH 7 genera 0V. El electrodo de pH produce voltajes negativos a partir de pH 8 al 14 denominados bases, y variaciones de voltaje positivos en el rango de pH 6 al 1 denominados ácidos; por esto se configuró una segunda etapa la cual garantiza que la señal que se envía al microcontrolador estará en el rango de 0 a 5v (señal interpretada por el microcontrolador); por esto se utilizó el integrado LM4140A el cual es una fuente de alta precisión y bajo ruido, generando 1V en la entrada positiva del amplificador y se adicionó una ganancia $Gain = (1 + (R10/R9)) = 5.7$.

Debido a que el funcionamiento del amplificador requiere una fuente de +5V y -5V para ser energizado, se implementó el inversor de voltaje TPS60400 que entrega la fuente VCC y VEE para la polarización del amplificador operacional TL082.

De acuerdo con (Texas Instruments, 2013), una correcta lectura de pH depende de la temperatura como se muestra en la figura 14. Esta temperatura es relacionada en la ecuación 17.

$$pH(X) = pH(S) + \frac{(E_s - E_x) * F}{R * T * \ln(10)} \quad (17)$$

Dónde:

- pH(X) = pH de solución desconocida (S)
- pH(S) = pH de una solución estándar = 7
- Es = Potencial eléctrico del pH 7
- Ex = Potencial eléctrico de la solución desconocida
- F = $9.6485309 * 10^4 \text{ C mol}^{-1}$ (constante de Faraday)
- R = $8.314510 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ (Constante universal del gas)
- T = Temperatura en grados Kelvin

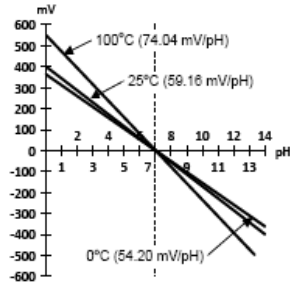


Fig. 14. (Texas Instruments, 2013), Variación de la medida de sensor de pH con la temperatura.

La ecuación 17 puede ser simplificada como lo describe la ecuación 18.

$$pH(X) - pH(S) = (E_s - E_x) * \frac{F}{R * T * \ln(10)}$$

$$pH(X) = \Delta E * \frac{-5038}{T} + pH(S) \quad (18)$$

Esta ecuación 18 se incluyó en las rutinas de programación en lenguaje C orientado a microcontroladores, para procesar la lectura del sensor y generar un Sketch programado al Arduino Uno R3, el cual lee el puerto analógico AN2 durante 16 veces cada 50 milisegundos y los almacena en un vector para después separar 10 datos en un nuevo vector y sacar una media aritmética en busca de obtener la respuesta eléctrica del sensor instrumentado. Finalmente se

procesa la ecuación 18 con la información de la temperatura en grados kelvin y la constante del valor del potencial eléctrico del electrodo al medir un buffer 7 (pH(S)). La sintaxis del código se puede evidenciar con el siguiente diagrama de flujo de la figura 15.

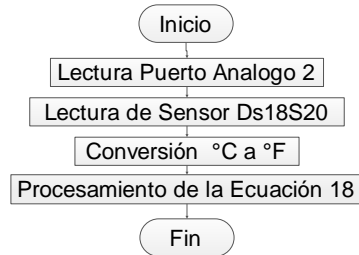


Fig. 15. Diagrama de flujo para la medición de pH.

Una vez depurado el circuito análogo y la programación del hardware, se realizó la lectura de los buffer de calibración 4 y 7, arrojando el comportamiento mostrado en la figura 16.

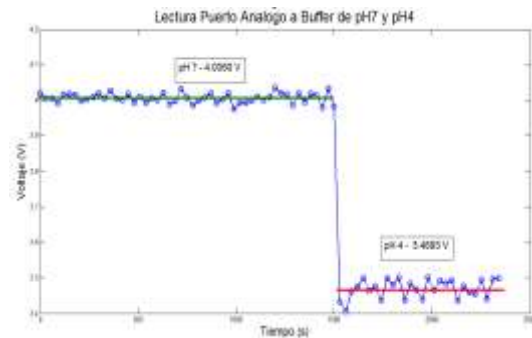


Fig. 16. Medidas de voltaje de muestras de buffer pH 7 y pH 4.

Realizada la calibración del sensor, se comprobó el sistema de amplificación mediante la medida de los diferentes buffer de pH, como lo indica la figura 17.

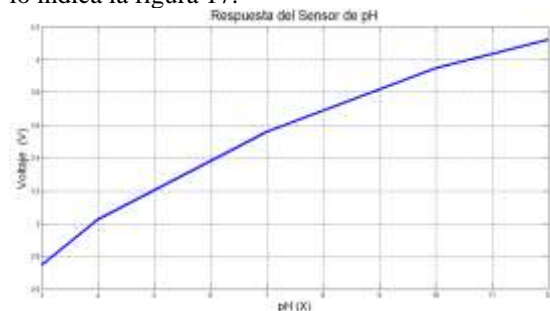


Fig. 17. Comprobación de la etapa de amplificación.

Posteriormente se obtuvo la respuesta de linealidad de dos bombas peristálticas, las cuales presentan las siguientes características:

- Volts:DC 12V
- Current:80mA

- Relative humidity 80%
- Flow rate:0-100 ml/min
- Rotate speed:0.1-100 rpm

Se polarizaron las bombas a 5V, con un ciclo útil de 80%, y se censo la posición del motor con un encoder rotacional para la dosificación por gotas, esta curva es la mostrada en la figura 18.



Fig. 18. Linealidad de las bombas peristálticas.

En la figura 18 se determinó que la dosificación de una gota de líquido contiene (0.05ml), y se requieren de 250ms, y que a dos gotas se obtienen (0,11ml), y se requieren 450ms. Se realizó la equivalencia por gotas vs delay, para determinar una constante en el programa del dosificador, el cual tiene el diagrama de bloques de la figura 19.

El código mostrado en la figura 19 es basado en condicionales, donde se busca establecer que el pH se mantenga entre 6,8 – 7,2 con la aplicación de ácido (HCL) y base (NaOH) mediante la actuación de las bombas dosificando el número de gotas que el sistema indique.

Este se basa en tres niveles por encima y por debajo para realizar la dosificación respectiva de acuerdo a la proximidad del rango establecido.

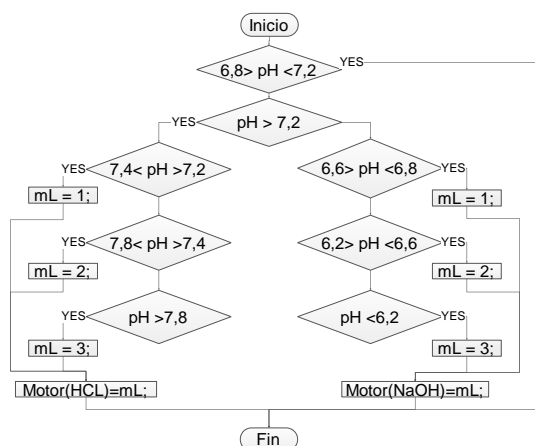


Fig. 19. Diagrama de flujo del sistema para dosificador de (HCL) y (NaOH).

Al realizar pruebas se comprobó que el sistema respondió a lo esperado cuando se hicieron

perturbaciones en el rango ácido y base como se muestra en la figura 20.

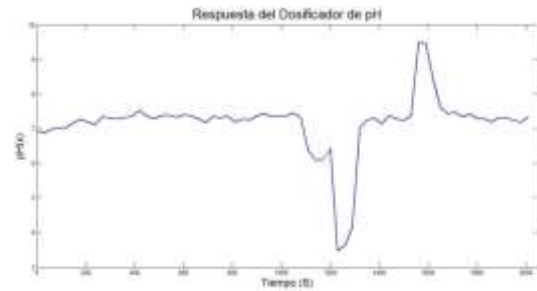


Fig. 20. Respuesta del dosificador de ácido clorhídrico e hidróxido de sodio.

4. CONCLUSIONES

La estrategia implementada para la regulación de pH se muestra en la figura 20, la cual presento un funcionamiento adecuado de dosificación en el sustrato para garantizar que el pH se mantenga en el rango establecido, para la verificación se realizaron perturbaciones que permitieron bajar la medida del electrodo de un nivel neutral a un ácido, para consecutivamente subir la medida a un nivel alcalino.

El sistema de estabilización de pH permitió mantener el pH dentro del reactor en rangos establecidos entre 6,5 y 7,5 según (liu, Yuan, Zeng, Li, & Li, 2008) para el proceso de producción de biogás mediante digestión anaeróbica. Este sistema de estabilización tuvo como parámetro esencial la agitación del sustrato, la cual según (Noone, 1990) es beneficiosa ya que pone en contacto la materia orgánica con los microorganismos.

El efecto de la temperatura en el sustrato modifica significativamente la respuesta dinámica del en el reactor tipo Batch, ya que la acción de los microorganismos implícitos en el proceso aceleran o inhiben la actividad de producción de biogás. Por lo tanto se recomienda asegurar que el sistema de control no tenga perturbaciones mayores a una hora ya que se puede hacer perder el proceso de crecimiento de las bacterias o hasta parar el proceso de producción.

REFERENCIAS

- Arroyo, E., Díaz , J., & Pinzon, O. (2011). Comparison of different control techniques applied to real time temperature control. *Revista Colombiana de tecnologías de avanzada*, 94-101.

- Chae, K., Jang, A., Yim, S., & Kim, I. (2008). The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure. *Bioresour Technol.*
- De Keyser, R., & Ionescu, C. (2010). Modelling, Identification, and Control, 30th IASTED international conference, Proceedings. *30th IASTED international conference on Modelling, Identification, and Control (AsiaMIC 2010)* (págs. 303 - 310). Phuket: ACTA Press.
- Díaz, M., Rodríguez, D., Lizarazo, H., Duenas, F., Penaranda, L., & Bernal, O. (2011). Design and construction of a prototype for the use of biogas in the cure of virginia tobacco for flue cured ovens. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada.*
- Jaramillo Henao, G., & Zapata Marquez, L. M. (2011). *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia*. Medellín: Monografía Universidad de Antioquia.
- Lennart, L. (1999). *System identification (2nd ed.): theory for the user*. Nueva Jersey: Prentice Hall PTR Upper Saddle River.
- Liu, C.-f., Yuan, X.-Z., Zeng, G.-m., Li, W.-w., & Li, J. (2008). Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Bioresour Technology*, 882-888.
- Logreira, N., Molinares, N., Sisa, N., & Manga, J. (2008). APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS DOMICILIARIOS. *I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*. Castellon, España: REDISA.
- Marmolejo, L., Torres, P., Oviedo, E., & Bedoya, D. (2009). Flujo de residuos: Elemento base para la sostenibilidad del aprovechamiento de residuos sólidos municipales. *Ingeniería y Competitividad*, 79 - 93.
- Marmolejo, L., Torres, P., Oviedo, R., García, M., & Díaz, L. (2011). Análisis del funcionamiento de plantas de manejo de residuos sólidos en el norte del valle del Cauca, Colombia. *Revista EIA*, 163-174.
- Noone, G. (1990). The treatment of domestic wastes. En *Anaerobic digestion: a waste. Critical Reports on Applied Chemistry*, 139-170.
- Ogata, K. (1996). *Sistemas de control en tiempo discreto segunda edición*. Mexico: Prentice Hall Hispanoamericana S.A.
- Ramón, J., Barragan, W., & Romero, L. (2007). Basic and detail engineering development for the automation of a biogas generating pilot plant. *Revista colombiana de tecnologías de avanzada.*
- Ramón, J., Gastelbondo, W., & Bedoya, J. (2006). Automatization design of a biogas generating plant. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada.*
- Sambo, A., Garba, B., & Danshehu, B. (1995). Effect of some operating parameters on biogas production rate. *Renewable Energy*, 343-344.
- Texas Instruments. (2013, Abril). *ti.com*. Retrieved Agosto 2013, from Texas Instruments: <http://www.ti.com/lit/an/snoa529a/snoa529a.pdf>