

## **Diseño y Simulación de Control de temperatura y pH para el inicio de un biorreactor tipo Batch**

### **Design and simulation of temperature and pH control for the start a Batch type Bioreactor**

**Angie Katherine Lizcano-Pulido<sup>1</sup>, Andrea Carolina Morales-Toscano<sup>2</sup>, Walter Naranjo-Lourido<sup>3</sup>, Javier Eduardo Martínez-Baquero<sup>4</sup>**

**Resumen:** Para el diseño, desarrollo, puesta en marcha y operación general de sistemas de digestión anaeróbica que obtienen energía de residuos orgánicos, es necesario implementar el monitoreo y control de variables críticas dentro de la metanogénesis. El biorreactor recrea las condiciones ideales para esas bacterias (inóculo), que se reproducirán rápidamente y aumentarán la generación de energía. Este proceso es proporcional a la descomposición de la materia.

Este documento presenta el diseño de un sistema automatizado que monitorea y controla dos parámetros fundamentales para la puesta en marcha de un biorreactor tipo Batch: temperatura y pH. Se realizó un diseño experimental en dos biorreactores tipo Lote compuestos por un sustrato común (residuo orgánico), y un inóculo específico para cada uno.

---

<sup>1</sup> Especialista en Instrumentación y Control Industrial. Universidad de los Llanos. Colombia. E-mail: [angie.lizcano@unillanos.edu.co](mailto:angie.lizcano@unillanos.edu.co)

<sup>2</sup> Especialista en Instrumentación y Control Industrial. Universidad de los Llanos. Colombia. E-mail: [acmorales@unillanos.edu.co](mailto:acmorales@unillanos.edu.co)

<sup>3</sup> Doctor en Ingeniería. Universidad de los Andes. Colombia. Docente Catedrático Universidad de los Llanos. Colombia. E-mail: [wwaranjo@unillanos.edu.co](mailto:wwaranjo@unillanos.edu.co) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0697-4282>

<sup>4</sup> Especialista en Instrumentación y Control Industrial. Universidad de los Llanos. Colombia. Docente de Planta Universidad de los Llanos. Colombia E-mail: [jmartinez@unillanos.edu.co](mailto:jmartinez@unillanos.edu.co) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4377-7867>

El diseño experimental utiliza sensores y actuadores de pH, temperatura y flujo, además, un algoritmo de control opera el sistema de temperatura y pH. Este control ajusta cada variable para garantizar un máximo crecimiento bacteriano dentro del biorreactor, que genera la mayor cantidad de biogás posible.

**Palabras clave:** Biodigestión anaeróbica, Biorreactor Batch, Control integral proporcional (PI), Metanogénesis, pH, Producción de metano, Temperatura.

**Abstract:** For the design, development, startup, and general operation of anaerobic digestion systems that obtain energy from organic waste, it is necessary to implement the monitoring and control of critical variables within methanogenesis. The bioreactor recreates the ideal conditions for those bacteria (inoculum), which will reproduce quickly and increase the energy generation. This process is proportional to the matter decomposition.

This document presents the design of an automated system that monitors and controls two fundamental parameters for starting a Batch-type bioreactor: temperature and pH. An experimental design was performed on two Batch-type bioreactors composed of a common substrate (organic waste), and a specific inoculum for each one.

The experimental design uses sensors and actuators of pH, temperature, and flow. Also, a control algorithm operates the temperature and pH system. This control adjusts each variable to guarantee a maximum bacterial growth within the bioreactor, which generates as much biogas as possible.

**Keywords:** Anaerobic biodigestion, Bioreactor Batch, Proportional integral control (PI), Methanogenesis, pH, Methane production, Temperature.

## 1. Introducción

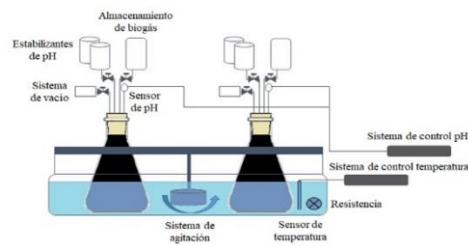
Los biodigestores representan una fuente de energía renovable, viable desde mediados del siglo XIX, al ser implementados en el tratamiento de aguas negras sometidas a digestión anaeróbica. Sin embargo, su potencial fue tenido en cuenta sólo hasta la crisis de los combustibles fósiles, donde se incursionó en la

investigación y mejoramiento de estos sistemas. Desde entonces, los biodigestores fueron considerados como una opción para disminuir la cantidad de residuos sólidos generados. Estos residuos son aprovechados para generar biogás y fertilizantes naturales, generando una alternativa factible para contrarrestar la dependencia de los combustibles fósiles [1,2].

Para que ocurra el proceso bioquímico al interior de un biodigestor, se requieren condiciones óptimas de temperatura y pH, que permitan un rápido crecimiento de los microorganismos. Esta proliferación bacteriana degrada velozmente la materia orgánica y por ende se incrementa la producción de biogás. En este caso, el control de temperatura es crucial puesto que garantiza una rápida descomposición de la materia orgánica. Los rangos de temperatura propicios pueden variar entre los 12 a 37° C, para los organismos mesófilos; y de 49 a 65 °C, para los termófilos; sin embargo, es común trabajar en el rango mesofílico (37 °C) debido a que es fácil mantener la temperatura estable sin requerir de grandes transferencias de energía. En el caso del pH, mantener este parámetro en condiciones idóneas permite la coexistencia de las poblaciones microbianas y la composición del biogás producido. Para que ocurra la metanogénesis es necesario mantener un pH entre 6.5 a 7.5, debido a que valores inferiores inhiben la fermentación e incluso la detienen. Una alteración del pH produce biogás pobre en metano y, por tanto, menores cualidades energéticas [3].

Por lo anterior, durante el arranque de un biodigestor tipo Batch se hace necesario un monitoreo constante de la temperatura y el pH. Con esto se pretende tomar acciones correctivas para garantizar condiciones óptimas que incentiven el crecimiento bacteriano y favorezcan el desarrollo de cada etapa en la digestión anaerobia. Como resultado se logra la degradación del material orgánico obteniendo un alto potencial energético del biogás.

**Figura 1.** Esquema del diseño experimental.



Fuente: elaboración propia.

## 2. Descripción del trabajo

Este diseño plantea el monitoreo y control de temperatura y pH para un sistema de digestión anaerobia de material orgánico. Este control permite garantizar el arranque de un biodigestor tipo Batch, el cual está cargado con una relación inóculo/sustrato predefinida. Para este control, se diseñó la instrumentación que monitorea los parámetros. Dicho control garantiza condiciones idóneas para una alta reproducción de los microorganismos en la mezcla, así como la estabilidad del sistema.

El sustrato utilizado corresponde a una mezcla homogeneizada de material orgánico compuesta por desechos de frutas, hortalizas y tubérculos. Los inóculos seleccionados corresponden a lodo activo para el tratamiento de aguas residuales y a un inóculo biológico para el tratamiento de pozos sépticos. Dichos biorreactores fueron establecidos en un matraz Erlenmeyer y ubicados en un sistema de calentamiento común para garantizar condiciones comunes de temperatura (37 °C).

## 3. Generalidades del diseño experimental

Para el diseño experimental, se proponen dos biorreactores tipo Batch que utilizarían dos matraces Erlenmeyer adecuados con pintura epóxica con el fin de minimizar el paso de luz que pudiese inhibir la replicación de los microorganismos. Los matraces serían ubicados en un recipiente de vidrio con agua, donde se ubicaría la resistencia para calentar este fluido. Dicho recipiente contaría con un sistema de agitación para distribuir y homogeneizar el calor del fluido, así como el sensor para el monitoreo de la temperatura.

Cada biorreactor tendría con un sensor de pH, así como su sistema de vacío para eliminar el aire del recipiente antes de cargar el sustrato/inóculo y garantizar las condiciones anaeróbicas. El montaje experimental también contaría con dos recipientes para contener las soluciones ácida y básica, y sus respectivas electroválvulas. Lo anterior con el fin de dosificar de acuerdo al comportamiento del pH medido al interior de los reactores, tal como lo muestra la figura 1.

#### **4. Sensores e instrumentación**

Para el diseño, se requieren dos sensores de pH, un sensor de temperatura y dos sensores de gas; así mismo se necesitan dos válvulas en cada biorreactor para la dosificación estabilizadora de pH. El sistema de control fue planeado y diseñado en el programa IDE Arduino y la adquisición y visualización de datos se realizó a través de LabVIEW. Cabe anotar que se realizaron dos controles totalmente independientes para cada parámetro.

Para el control de la temperatura se seleccionó un sensor DS18B20 y, a través de, un control PID se estabiliza la temperatura de referencia a través de la potencia en la resistencia térmica. La variación de la potencia se controla por el ángulo de fase para mantener los 37 °C.

El medidor de pH seleccionado es el PH- 4502C, que también utiliza un control PID. Con las variaciones del parámetro se abre la dosificación de la solución y se cuantifica la cantidad necesaria para recuperar las condiciones que garantizan el pH idóneo para la actividad de las bacterias. Así mismo, se seleccionaron los sensores (MQ- 2 y MQ-4) de CH<sub>4</sub> (gas metano) para recolectar datos e identificar cuál inóculo proporcionó más gas y, de esta manera, establecer el sistema de mejor producción.

#### **5. Etapas previas al experimento**

##### **5.1. Preparación, selección y caracterización del sustrato y del inóculo**

El sustrato consistirá en una mezcla de 500 g de material orgánico compuesta por desechos de frutas, hortalizas y tubérculos. Este material será previamente triturado y homogeneizado empleando agua

destilada con el fin de compactar los sólidos. Esta técnica no añadiría impurezas y facilita el proceso de digestión.

## **5.2. Inicio de los biorreactores**

El inicio de la generación de metano tardará cerca de tres semanas después de agregar el inóculo. Este proceso se puede descomponer en cuatro fases. En la primera fase, llamada hidrólisis, las enzimas de las bacterias se encargan de descomponer los residuos de moléculas complejas a solubles, pasando de proteínas, grasas y celulosa a aminoácidos y azúcares [4].

Para la segunda fase, se presenta un proceso fermentativo en el cual los azúcares y aminoácidos son transformados principalmente en ACV (ácidos grasos volátiles). En este proceso se obtienen otros subproductos como  $H_2$ ,  $CO_2$  y alcoholes. Esta fase de acidogénesis se produce en un pH entre 5.0 y 6.9 [4]

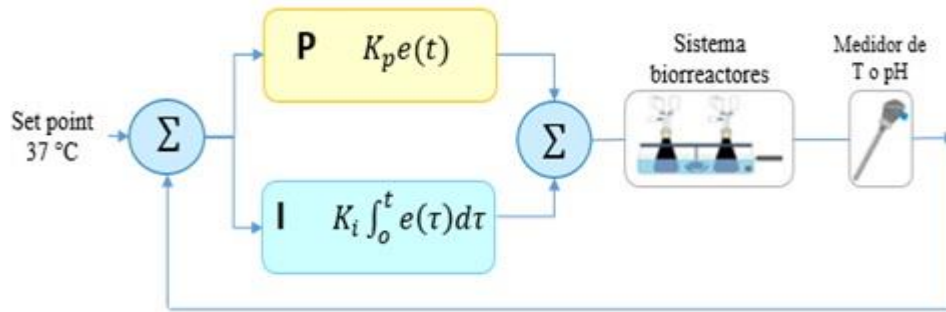
Durante la tercera fase, la aceto-génesis, los ACV, butírico y propiónico, son oxidados por las bacterias acetogénicas dando lugar al  $H_2$  y al ácido acético. Así mismo, se produce  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ , así como bicarbonatos y algunos derivados del amonio. En la fase de aceto-génesis, el pH permanece en rango ácido, entre 6.5 y 6.9.

En la fase final, la metanogénesis, las bacterias metanogénicas se alimentan del  $H_2$  y el ácido acético y los transforman principalmente en metano, sin embargo, durante este proceso también se produce  $CO_2$  y  $N_2$ , así como sales de ácido orgánicos. En esta fase el pH es alcalino y se encuentra en un rango entre los 6.9 y 7.5 [4].

Todas las bacterias del proceso se encuentran de forma simbiótica. Las bacterias encargadas de la acidogénesis predisponen el entorno para la actividad de las bacterias metanogénicas, al garantizar condiciones anaerobias y que reciban compuestos de cadena corta. Los productos intermedios de las bacterias acidogénicas son consumidos por las metanogénicas, evitando que haya condiciones tóxicas para las acidogénicas [5].

Por tanto, es tan importante, durante estas fases iniciales, controlar el pH para que los biorreactores tengan las condiciones necesarias para llegar a producir el biogás. El seguimiento de estas fases se realizará a través de la adquisición de datos y el seguimiento gráfico; la estabilidad del pH se garantizará a través de la adición de la solución alcalinizante o acidificante según se requiera.

**Figura 2. Esquema del diseño experimental y controlador PI.**



Fuente: elaboración propia.

## 6. Requerimientos del experimento

El desarrollo del experimento comprende el montaje, previa selección del sustrato e inóculo del biorreactor; la adquisición de datos y graficación de resultados. Así mismo, se consideran cuatro etapas para llevar el seguimiento del proceso. Estas etapas son descritas a continuación:

### 6.1. Etapa 1 – Arranque de los biorreactores.

Con este experimento se determinará la producción de metano bajo una condición de temperatura en el rango mesofílico (37 °C), para dos biorreactores cargados con un sustrato en común y dos inóculos diferentes. El objetivo del experimento será el arranque de los biorreactores, tipo Batch, por lo cual se deben garantizar las condiciones óptimas de pH y temperatura en las tres fases previas a la metanogénesis.

### 6.2. Etapa 2 – Adquisición de datos.

Se hace necesario definir la forma en la que se adecuaron los sensores de temperatura, pH y gas. Así como el algoritmo que permite el control y la visualización de esta información.

- Temperatura del baño de calentamiento de cada matraz siguiendo el valor de referencia.
- Nivel de pH de la mezcla en cada biorreactor.
- Volumen del biogás generado en la fase de metanogénesis.

### 6.3. Etapa 3 – Seguimiento a la agitación.

La agitación se llevará a cabo en el baño de calentamiento con el fin de garantizar una distribución de calor homogénea en el fluido.

### 6.4. Etapa 4 – Presentación de resultados de experimentación.

Para presentar los resultados se realizará la retroalimentación del valor medido con el detector de CH<sub>4</sub>. A su vez, se mostrará un gráfico de la producción de metano en una interfaz gráfica de usuario (GUI). De esta manera se conocerá si efectivamente se dio el arranque de los biorreactores. Así mismo, durante el alcance de la metanogénesis, el control verificará la temperatura y el pH ajustando la potencia en la resistencia de calentamiento, el nivel de agitación y la adición de solución (ácida o base) que se utilizará.

## 7. Materiales requeridos para la experimentación

La Tabla 1 detalla los materiales y sensores a utilizar en el arranque del biorreactor tipo Batch. Cada implemento fue cuidadosamente escogido pensando en la forma más práctica para minimizar el tiempo de arranque frente a la producción del biogás.

**Tabla 1.** Listado de materiales y sensores.

2 Erlenmeyer de 500 ml	1 refractaria	2 sensores de pH PH-4502C
2 tapones de caucho	1 agitador	1 sensor de temperatura DS18B20
2 bolsas de almacenamiento de gas	1 resistencia eléctrica	1 sensor de gas MQ-4
1 lata de pintura epóxica en aerosol (negra)		

Fuente: elaboración propia.



## 8. Diseño de los controladores

En esta sección se define los tipos de controlador utilizados en el arranque del biodigestor.

### 8.1. Control de temperatura

Para el control de temperatura del baño de calentamiento, mostrado en la figura 2, se utilizará un control PI.

Este control está definido por la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_i \int_0^t e(t) dt \quad (1)$$

Donde  $K_p$  es el ajuste proporcional, el cual controla el tiempo de alcance de la temperatura ideal (37 °C). Por otra parte,  $K_i$  representa el coeficiente que elimina el error de estado estacionario. Esta variable  $K_i$  es igual a  $\frac{K_p}{T_i}$ , donde  $T_i$  representa el tiempo que ajusta la acción integral. La función de transferencia resultante se expresa mediante la ecuación (2):

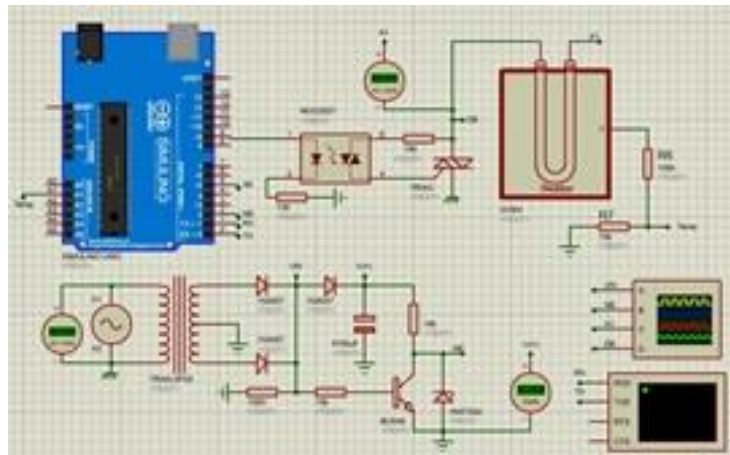
$$CPI(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2)$$

$$T = T_a + (T_o - T_a)e^{-kt} \quad (3)$$

Por su parte, la ecuación (2) describe el cambio de temperatura que responde a un sistema de primer orden. Esta ecuación ayuda a implementar del control PI.

A través del control proporcional se establece la presencia de un error que favorezca que la acción sea diferente de cero. Mediante la acción integral un error pequeño garantizará una acción de control creciente; en caso de que el error sea negativo, el control será decreciente [6]. Este trabajo propone la utilización de un Arduino UNO para variar la potencia del resistor térmico mediante el control de ángulo de fase. Para aislar el control de la etapa de potencia se utilizará un optoacoplador, como se observa en la figura 3.

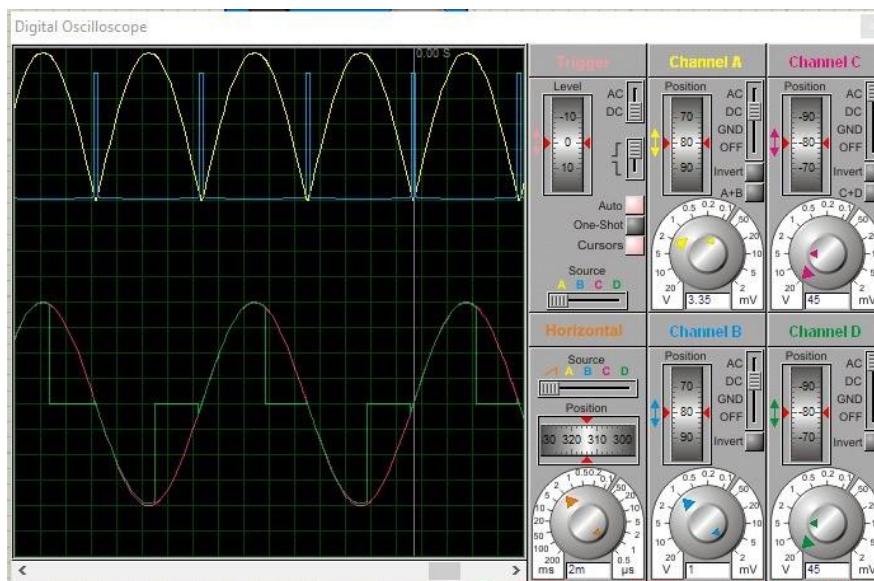
**Figura 3. Esquemático del control de temperatura usando triac.**



Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, el control de temperatura utiliza el triac para modificar la cantidad de potencia transferida a la resistencia. Como resultado de este control de disparo se observa la respuesta de voltaje entregado a la carga, en la figura 4, según la simulación realizada en Proteus.

**Figura 4. Voltaje en la resistencia cuando se aplica el control por ángulo de fase.**



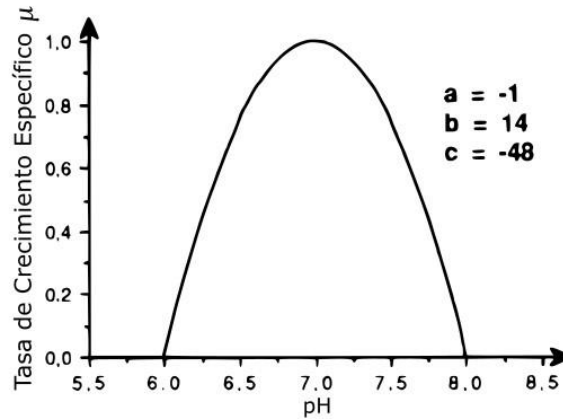
Fuente: elaboración propia.

## 8.2. Control de pH

El control de pH funciona de manera similar al control de temperatura. Es decir, que ambos sistemas se asocian a un sistema de primer orden, por lo cual se esperan cambios lentos en el pH. Este tipo de

cambios lentos pueden ser controlados utilizando un algoritmo tipo PI. La figura 5 relaciona el pH del inóculo/sustrato donde el máximo crecimiento bacteriano corresponde al pH neutro.

**Figura 5.** Tasa de crecimiento bacteriano respecto al pH de la mezcla [7].



Fuente: elaboración propia.

La anterior gráfica está definida por la ecuación 4. Del análisis de esta ecuación se puede determinar que existe reducción de la población bacteriana en dos rangos,  $6.0 < \text{pH} < 8.0$ , de acuerdo a [7].

$$\mu(\text{pH}) = a(\text{pH}^2) + b(\text{pH}) + c \quad (4)$$

Cada cambio de pH está asociado a una fase específica dentro del arranque del biorreactor. El control de pH deberá actuar si la mezcla inóculo/sustrato sale del rango de operación. Si el pH está dentro del rango, no habrá ningún control y se dejará evolucionar las fases de inicio del biorreactor sin intervención alguna, acorde a lo estipulado en la sección 2.3.2 [7].

## 9. Simulación del biorreactor

El control seleccionado es el brindado por Hassam et al. Las ecuaciones siguientes muestran la evolución de los procesos que relacionan las variables que enlazan los procesos de las fases de iniciales, desde la hidrólisis hasta la metanogénesis. Para esto se muestra cada una las ecuaciones diferenciales que corresponden a las fases de diferencias [8, 9].

$$\frac{dx_1}{dt} = (\mu_1 S_1 - \alpha D) X_1 \quad (5)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = (\mu_2 S_2 - \alpha D) X_2 \quad (6)$$

$$\frac{dS_1}{dt} = D(S_{\{1,in\}} - S_1) - k_1\mu_1 S_1 X_1 \quad (7)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = D(S_{\{2,in\}} - S_2) - k_2\mu_1 S_1 X_1 - k_3\mu_2 S_2 X_2 \quad (8)$$

$$\frac{dz}{dt} = D(Z_{in} - Z) \quad (9)$$

$$\frac{dC}{dt} = D(C_{in} - C) - q_c + k_4\mu_1 S_1 X_1 + k_5\mu_2 S_2 X_2 \quad (10)$$

$$CH_4 = k_6 \mu_2, \max \frac{S_2}{\left\{S_2 + K_{S_2} + \frac{S_2^2}{K_{I_2}}\right\}} X_2 \quad (11)$$

Donde  $X_1$  corresponde a la concentración de las bacterias acidogénicas,  $X_2$  es la concentración de las bacterias metanogénicas,  $S_1$  a la concentración del sustrato orgánico,  $S_2$  a la concentración de los ácidos volátiles,  $\mu_1$  a la tasa de crecimiento específico de las bacterias acidogénicas,  $\mu_2$  a la tasa de crecimiento específico de las bacterias metanogénicas,  $D$  al coeficiente de dilución,  $k_1$  al rendimiento de la concentración del sustrato,  $k_2$  al rendimiento de producción de ácidos grasos volátiles (AGV),  $k_3$  al rendimiento del consumo del AGV,  $k_4$  al rendimiento de la producción de  $CO_2$  con  $X_1$ ,  $k_5$  al rendimiento de la producción de  $CO_2$  con  $X_2$  y  $k_6$  que corresponde a la producción de  $CH_4$  [8] [9].

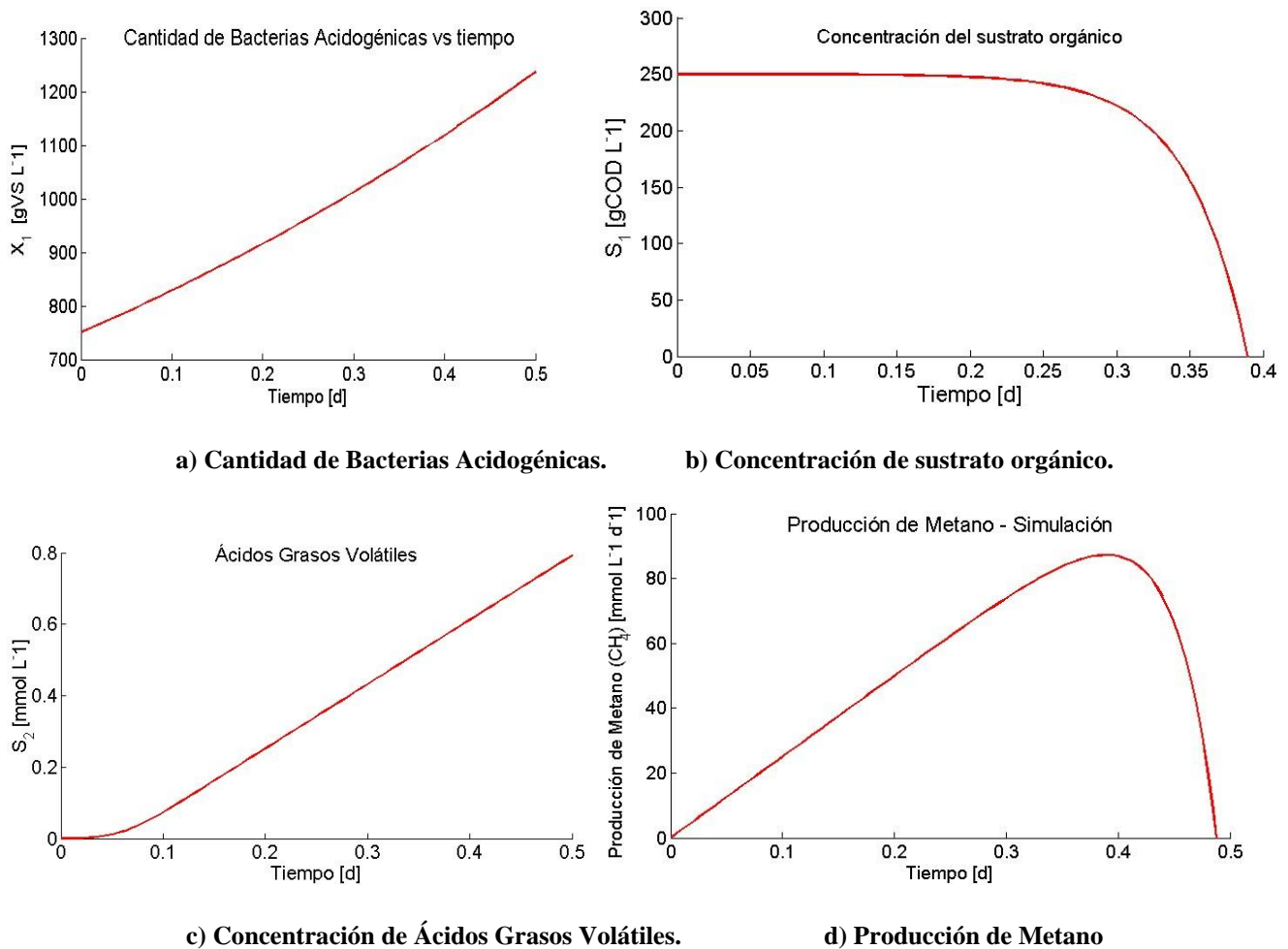
El modelo anterior, llamado modelo AMOCO, es el más generalizado y utilizado en el diseño y simulación de biodigestores anaeróbicos. Este modelo permite comprender el proceso de cambios químicos que ocurren durante el alcance de la etapa metanogénica.

En la etapa de acidogénesis, las bacterias acetogénicas  $X_1$  consumen el sustrato  $S_1$  y se producen los ácidos grasos volátiles (AGV) y dióxido de carbono, de acuerdo con la ecuación (12). Durante la etapa de metanogénesis, las bacterias metanogénicas consumen los AGV, y se produce metano y dióxido de carbono, siguiendo la ecuación (13).



Para la simulación computacional del biorreactor, se tendrán en cuenta las ecuaciones 3 a la 11 [8, 9].

**Figura 6. Resultados de las variables de estado del proceso.**



Fuente: elaboración propia.

## 10. Resultados y conclusiones

Como resultado de implementar las ecuaciones simplificada del modelo AMOCO, se tiene que:

- El control de temperatura corresponde a un sistema simple de primer orden. En este caso, el control se desagrega del biorreactor controlando la temperatura del agua del baño termostático. Por equilibrio térmico se autorregula la temperatura del biorreactor.
- El control de temperatura sólo aplica para un rango entre  $6.0 < \text{pH} < 8.0$ . Para garantizar que las fases de generación de ácidos grasos volátiles y ácido acético evolucionen de manera natural.
- La figura 6 muestra el crecimiento bacteriano mientras en la figura 7, disminuye la concentración de sustrato orgánico en la mezcla.

- Por otra parte, la figura 8 muestra cómo se incrementan los ácidos grasos volátiles con el transcurrir de la simulación, dando paso a la fase acetogénica.

Como resultado principal se muestra la evolución de producción del metano - figura 9. Es de destacar que existe un pico de producción del biogás. Posterior a 0.4 d, se disminuye la tasa de producción debido a la disminución de la concentración del sustrato orgánico. Esto indica que hay sobrepoblación de bacterias y su alimento escasea.

## Referencias

- [1] K. Cagua, O. Amell y L. Olmos, "Estudio comparativo entre las propiedades de combustión de la mezcla biogás-aire normal y biogás-aire enriquecido con oxígeno", Revista Ingeniería e Investigación, vol. 1, pp. 233-241, 2011.
- [2] R. Liriano, "Aplicación de biofertilizantes como alternativa nutricional, ambiental y económica en la agricultura urbana", España: Universidad de Girona, 2005.
- [3] A. Padilla y J. Rivero, "Producción de Biogás y compost a partir de Residuos Orgánicos recolectados del complejo arqueológico Huaca de la Luna", Ciencia y Tecnología, vol. 1, pp. 29-43, 2016
- [4] L. O. González Salcedo y Y. Olaya Arboleda, "Fundamentos para el diseño de Biodigestores, Departamento de Ingeniería", 2009.
- [5] M. T. Madigan, J. M. Martinko y J. Parker, "Biología de los microorganismos", 10 ed, 2004.
- [6] A. Pulido y J. Espitia, "Diseño e implementación de un sistema de supervisión, monitoreo y control de temperatura, presión y tiempo de proceso en un sistema de digestión anaerobia de biomasa (contenido ruminal bovino) a escala de laboratorio", Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016.
- [7] G. Bastin, "On-line estimation and adaptive control of bioreactors", Elsevier, vol. 1, 2013.
- [8] S. Hassam, E. Ficara, A. Leva y J. Harmand, "A generic and systematic procedure to derive a simplified model from the anaerobic digestion model No. 1 (ADM1)", Biochemical Engineering Journal, pp. 99, 193-203, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2015.03.007>
- [9] E. Ficara, S. Hassam, A. Allegrini, A. Leva, F. Malpei y G. Ferretti, "Anaerobic digestion models: a comparative study. IFAC Proceedings.", vol. 45, no. 2, pp. 1052- 1057, 2012. <https://doi.org/10.3182/20120215-3-AT-3016.00186>