

# Control de temperatura en la generación de biogás con contenido ruminal bovino

Álvaro Pulido-Aponte<sup>1,\*</sup>, Hernán Mauricio Rivera-Escobar<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>*Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia*

<sup>2</sup>*Programa de Ingeniería en Control, Facultad tecnológica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia*

*Fecha de recepción: 22 de julio de 2020 — Fecha de aceptación: 3 de abril de 2022*

## Resumen

El contenido ruminal bovino, un material que se encuentra en el primer estómago del ganado, representa una gran amenaza ya que su carga orgánica es vertida en gran porcentaje a las fuentes hídricas, desatando complejos impactos ambientales. A pesar que este material de alta complejidad microbiológica y química presenta potencial en la producción de biogás, sigue siendo limitada la construcción de modelos estructurados de control que optimicen su producción como subproducto con aprovechamiento energético. En el presente artículo, se informa sobre una iniciativa para la generación de biogás a partir de contenido ruminal bovino, mediante la implementación de un control de temperatura por realimentación de estados del sistema de calentamiento. Para ello, se realizaron pruebas experimentales en digestores tipo batch con cargue de contenido ruminal a diferentes concentraciones y durante 37 días, estableciendo las condiciones óptimas de cargue y temperatura en función de la presión de gas registrada diariamente. Paso seguido, se determinó un modelo de identificación paramétrica para el sistema de calentamiento, a partir del cual se controló la temperatura de la biomasa contenido ruminal. Como resultado, se estableció para las condiciones no controladas una relación de cargue de la biomasa a razón 1:1 con  $H_2O$  destilada, y para las condiciones controladas se evidenció un aumento en la eficiencia en la generación de presión de biogás. Estos resultados sugieren que la implementación de modelos de identificación paramétrica son una alternativa viable para el control de temperatura asociada a procesos de biodigestión anaerobia de contenido ruminal bovino.

**Palabras Clave:** ruminal, bioreactor, realimentación, temperatura, biogás, control

## Temperature control in the generation of biogas with bovine ruminal content

## Abstract

The bovine ruminal content, a material found in the first stomach of cattle, represents a great threat since its organic load is poured in large percentage to the water sources, unleashing complex environmental impacts. Although this material of high microbiological and chemical complexity has potential in the production of biogas, the construction of structured control models that optimize the production of biogas as a byproduct with potential energy use is still limited. In the present article, an initiative is reported for the generation of biogas from bovine ruminal content, through the implementation of a temperature control by feedback of heating system states. For this, experimental tests were carried out on batch-type digesters with ruminal content loading at different concentrations and for 37 days, establishing the optimal loading and temperature conditions based on the gas pressure recorded daily. Next, a parametric identification model was determined for the heating system, from which the temperature of the ruminal content biomass was controlled. As a result, a charge ratio of the biomass at 1:1 ratio with distilled  $H_2O$  was established for the uncontrolled conditions, and for the controlled conditions an increase in the efficiency in

---

\*apulidoa@unal.edu.co

**Nota:** Este artículo de investigación es parte de Ingeniería-Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 27, No. 1, 2023, ISSN: 2448-8364

the generation of biogas pressure was evidenced. These results suggest that the implementation of parametric identification models are a viable alternative for temperature control associated with anaerobic biodigestion processes of bovine ruminal content.

**Keywords:** ruminal, bioreactor, feedback, temperature, biogas, control

## 1. Introducción

Un problema a escala mundial asociado a la demanda creciente de la carne procedente del ganado bovino, es la generación e inadecuada disposición de los subproductos obtenidos de su sacrificio, entre los que se destacan grandes cantidades de material biosólido, como lo es, el contenido ruminal bovino (CRB) [1]. Con frecuencia el (CRB) es depositado de forma directa a las cuencas hidrográficas, causando una acumulación de la carga orgánica contaminante y un aumento en las demandas química de oxígeno ( $DQO$ ) y bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ), desencadenando un impacto negativo sobre los acuíferos y el medio ambiente en general [2]. Plantear iniciativas novedosas que conduzcan a establecer otros usos para este material biosólido, ayudaría, al menos en parte, a reducir su vertimiento sobre las fuentes hídricas y mitigaría su impacto ambiental [3] [4].

Debido a su naturaleza biológica y composición química, el CRB bajo procesos de biodigestión anaeróbica, ha sido propuesto como un potencial sustrato catalítico en la producción de biogás para diversas biomásas [5] [6], sugiriendo así, una opción rentable, eficaz y sostenible de energía limpia alternativa [7] [8]. Sin embargo, estudios recientes han demostrado que una de las principales ventajas del CRB, radica en que su conversión a biogás es independiente de la inoculación de microorganismos aislados, no obstante, no escapa del efecto de otras variables físico-químicas sobre la eficiencia del proceso, como la temperatura, el pH, la concentración de los reactantes, entre otras [1].

La manipulación y control de la temperatura, puede afectar la cinética de crecimiento de las poblaciones microbianas asociadas a la biomasa y por ende en la eficiencia del proceso, en términos de la concentración y el volumen del gas aprovechable como biocombustible [9] [10]. Sin embargo, el CRB es una biomasa pobremente utilizada, situación que ha dificultado la representación y control de los fenómenos asociados a su biodigestión anaerobia mediante modelos estructurados [11]. A la fecha se han realizado avances respecto al control de procesos de biodigestión anaeróbica de biomasa, que en la práctica se generalizan en los métodos clásicos de diseño.

La realimentación de las variables de estado resulta útil cuando estos métodos clásicos de control ofrecen una dificultad en la asignación de los polos de forma independiente, ya que es usual encontrar restricciones en el número de grados de libertad para algunos sistemas con orden superior o igual a dos; sin embargo, no todas

las representaciones en el espacio de estados de los sistemas son controlables por el método de realimentación de variables de estado por lo que hay que realizar un análisis matemático previo al cálculo de la ganancia de realimentación [12].

El aporte de este trabajo consiste en presentar una iniciativa novedosa y eficaz de identificación paramétrica y control de temperatura por realimentación de las variables de estado en un proceso tipo batch para la generación de biogás utilizando como biomasa CRB.

Este artículo se encuentra organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se presenta el esquema metodológico que incluye la experimentación en la generación de biogás con biomasa CRB a escala de laboratorio, y el diseño del control de temperatura utilizando la técnica de realimentación de las variables de estado del sistema calefactor; en el capítulo 3 se presentan los resultados y los análisis correspondientes a los experimentos y al control respectivamente; se finaliza con las conclusiones generales del documento.

## 2. Desarrollo metodológico

Para la identificación paramétrica y control de temperatura por realimentación de estados en la generación de biogás a partir de CRB se hizo necesario plantear dos etapas: la experimentación y el diseño del control.

### 2.1. Experimentación

En la etapa experimental se siguieron protocolos previamente reportados por nosotros, que incluyeron los procedimientos de acondicionamiento de la materia prima, la limpieza y desinfección de tres reactores tipo batch, así como, las consideraciones de operación para el proceso de producción de biogás a escala de laboratorio, el cargue del CRB, condiciones de pH y temperatura óptima, el tiempo de retención y la medición de variables [1]. La limpieza y desinfección incluyó lavados intermitentes con hipoclorito de sodio ( $NaClO$ ) a una concentración de 0.3 %v/v, seguido de un lavado con alcohol etílico ( $C_2H_6O$ ) al 40 %v/v y finalizando con lavados intermitentes con agua destilada para garantizar la remoción de trazas químicas.

### 2.1.1. Generación de biogás bajo condiciones no controladas de temperatura

Frente a las condiciones de operación, se tuvieron en consideración las propuestas previamente por Ramírez 2010 [13]. En breve, el tiempo entre la extracción del CRB y los experimentos fue de 3-12 horas, el CRB fue almacenado en bolsas estériles de polipropileno y refrigeradas hasta el momento del cargue a  $4^{\circ}\text{C}$ ; el pH fue ajustado con ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ) o hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) 1M a un rango entre 6.2–7.2; el cargue de masas ( $\text{CRB} : \text{H}_2\text{O}$  destilada) dentro del reactor mantuvo una razón de 1 : 1, 2 : 1 y 1 : 2 a temperatura ambiente y posteriormente a  $35^{\circ}\text{C}$  para la razón de cargue que registró mayor presión de gas. Finalmente, para garantizar una operación en condición de anoxia, se utilizó una bomba de vacío para extraer el aire contenido al interior del reactor y se acopló una válvula anti-retorno que permitiera la salida del gas e impidiera la entrada de aire. El tiempo de retención de la biomasa dentro del reactor fue de 37 días y todos los experimentos se realizaron por triplicado.

### 2.1.2. Generación de biogás bajo condiciones controladas de temperatura

En la Figura 1, se presenta un esquema que describe el sistema de calentamiento, adquisición y control del bioreactor tipo batch. El recuadro delineado en rojo, representa el calefactor, este suministró energía térmica a la biomasa CRB garantizando las condiciones térmicas de la microbiota reportadas por Ramírez 2010 y Febres & López 2007 [13] [14]. Mediante un transmisor PT100 se registró y transmitió la información correspondiente a la temperatura de la biomasa por medio de una señal analógica de corriente en el lazo 4–20mA, la cual fue adecuada a un rango de 1–5V, digitalizada y procesada por la tarjeta Arduino UNO para posteriormente ser llevada a un ordenador mediante una comunicación serial. Alojada la información en el ordenador, se realizó un último procesamiento de la información con la herramienta System Identification toolbox del software Matlab, donde fue generado un modelo de identificación paramétrica expresado en la ecuación de estados del ingenio. Vale aclarar que el modelo de identificación paramétrica del sistema de calentamiento fue obtenido a partir de pruebas en lazo abierto.

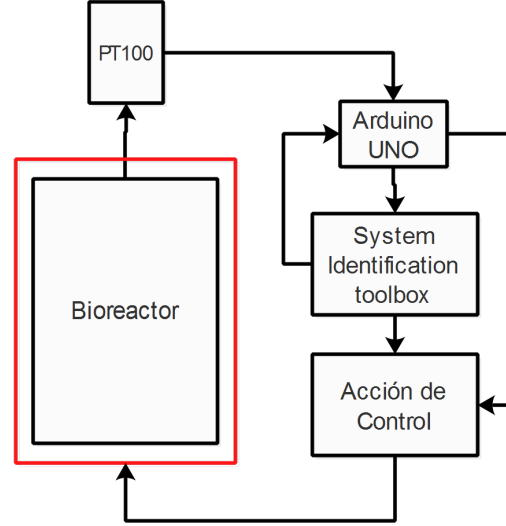


Figura 1: Esquema del sistema de calentamiento del bioreactor.

## 2.2. Diseño del control de temperatura

Desde la identificación de un modelo de espacio de estados del sistema de calentamiento constituido por un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden organizadas de forma matricial, se identificaron las variaciones de la planta como una combinación lineal de sus estados. Este modelo está conformado por una ecuación de estados y una ecuación de salida en términos de la incidencia directa de la entrada del sistema (1).

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + bu \\ y &= cx + du\end{aligned}\quad (1)$$

Donde  $A$ ,  $b$  y  $c$  son matrices de dimensión  $n \times n$ ,  $n \times 1$  y  $1 \times n$  respectivamente; y  $d$  es un parámetro escalar.

La técnica de control utilizada fue la de realimentación de la variables de estado de forma lineal (Figura 2), mediante la aplicación de la ley de control de la forma:

$$u(t) = gr(t) - kx(t) \quad (2)$$

Donde  $u(t)$  corresponde a la señal de entrada del sistema,  $k$  el vector de regulación de los estados,  $x$  el vector de estados,  $r(t)$  la referencia y  $g$  la ganancia de seguimiento a la referencia, calculada con la expresión:

$$g = \frac{1}{c(bk - A)^{-1}b}.$$

Aplicando la ley de control sobre la ecuación de estados se tiene:

$$\dot{x} = (A - bk)x + bgr(t) \quad (3)$$

Donde el factor  $(A - bk)$  corresponde a la matriz  $A$  en lazo cerrado. Por lo tanto el modelo de estados en lazo cerrado quedó de la forma:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= (A - bk)x + bgr(t) \\ y &= cx\end{aligned}\quad (4)$$

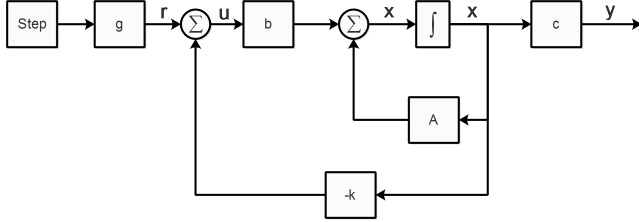


Figura 2: Configuración del diseño de control de temperatura por realimentación de los estados.

### 2.2.1. Controlabilidad y observabilidad

La controlabilidad y observabilidad del sistema son condiciones necesarias que se deben verificar previo al diseño de control por realimentación de los estados del sistema. Las matrices de controlabilidad  $U$  y observabilidad  $V$ , se determinaron como se menciona a continuación (3-4):

$$U = [b \quad Ab \quad A^2b \quad \dots \quad A^{n-1}b \quad \dots] \quad (5)$$

$$V = \begin{bmatrix} c \\ cA \\ \vdots \\ cA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

**Teorema 1.** (Invarianza de la controlabilidad en la realimentación de las variables de estado) El sistema en lazo abierto (1), es controlable para cualquier ganancia de realimentación  $k^{1-n}$ , si y solo si el sistema presentado en (4) es controlable.

**Demostración 1.** La matriz de controlabilidad del sistema en lazo abierto (1) es  $U_{LA} = [b \quad Ab \quad A^2b \quad \dots \quad A^{n-1}b]$ , y la matriz de controlabilidad en lazo cerrado (4) es  $U_{LC} = [b \quad (A - bK)b \quad (A - bK)^2b \quad \dots \quad (A - bK)^{n-1}b]$ . Por lo tanto, la relación entre  $U_{LA}$  y  $U_{LC}$  está dada por:

$$\begin{bmatrix} 1 & -kb & -k(A - bk)b & \dots & -k(A - bk)^{n-2}b \\ 0 & 1 & -kb & \dots & -k(A - bk)^{n-3}b \\ 0 & 0 & 1 & \dots & -k(A - bk)^{n-4}b \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}.$$

Dado que la dimensión de  $k$  es  $1 \times n$  y la de  $b$  es  $n \times 1$ , todas las entradas de la matriz que multiplican a  $U_{LA}$  son escalares; como esta matriz presenta no singularidad, el rango de  $U_{LA}$  es el mismo de  $U_{LC}$ , de lo cual se

puede concluir que (1) es controlable si y solo si (4) es controlable.

**Teorema 2.** (Sistema controlable) Si las matrices  $U$  y  $V$  son no singulares, es decir, si su determinante es diferente de cero, el sistema es controlable y observable. Si el sistema es controlable se valida la asignación de los autovalores de forma arbitraria.

**Teorema 3.** (Asignación de los autovalores) En caso que (1) sea controlable, entonces mediante la aplicación de la ley de control (2), donde  $k$  corresponde a un vector real de dimensión  $1 \times n$ , los autovalores de  $A - bk$  pueden ser elegidos de forma arbitraria, con la restricción que todos los autovalores complejos conjugados deben ser asignados en parejas.

En consideración, el polinomio característico del sistema fue determinado desde la función de transferencia (7).

$$G(s) = c(SI - A)^{-1}b \quad (7)$$

### 2.2.2. Ganancia de realimentación

Se procedió a calcular la ganancia de realimentación para la ecuación de forma controlable  $k$  partiendo del polinomio característico del sistema dado y un polinomio característico deseado mediante su transformación equivalente  $P$ , (8-10).

$$k = \bar{k}P \quad (8)$$

$$\bar{k} = [\bar{a}_1 - a_1 \quad \bar{a}_2 - a_2 \quad \dots \quad \bar{a}_n - a_n] \quad (9)$$

$$P^{-1} = [b \quad Ab \quad A^2b \quad \dots \quad A^{n-1}b] \begin{bmatrix} 1 & a_1 & a_2 \\ 0 & 1 & a_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Posteriormente se verificó el polinomio característico deseado mediante la ganancia de realimentación, ecuación (11).

$$\det(SI - A + bk) \quad (11)$$

Finalmente, el parámetro  $N$  mostrado en la Figura 2, corresponde a la ganancia en DC de la función de transferencia deseada  $G_o(s)$ .

## 3. Resultados y análisis

### 3.1. Generación de biogás

Con relación a los experimentos para la obtención de biogás que se realizaron bajo condiciones no controladas de temperatura y variación en las proporciones del cargue de la biomasa, las tendencias en el registro de la presión generada son ascendentes, tal y como se observa en la Figura 3. No obstante, se presentaron variaciones en la presión generada en función del tiempo de proceso (Figura 3 B-D).

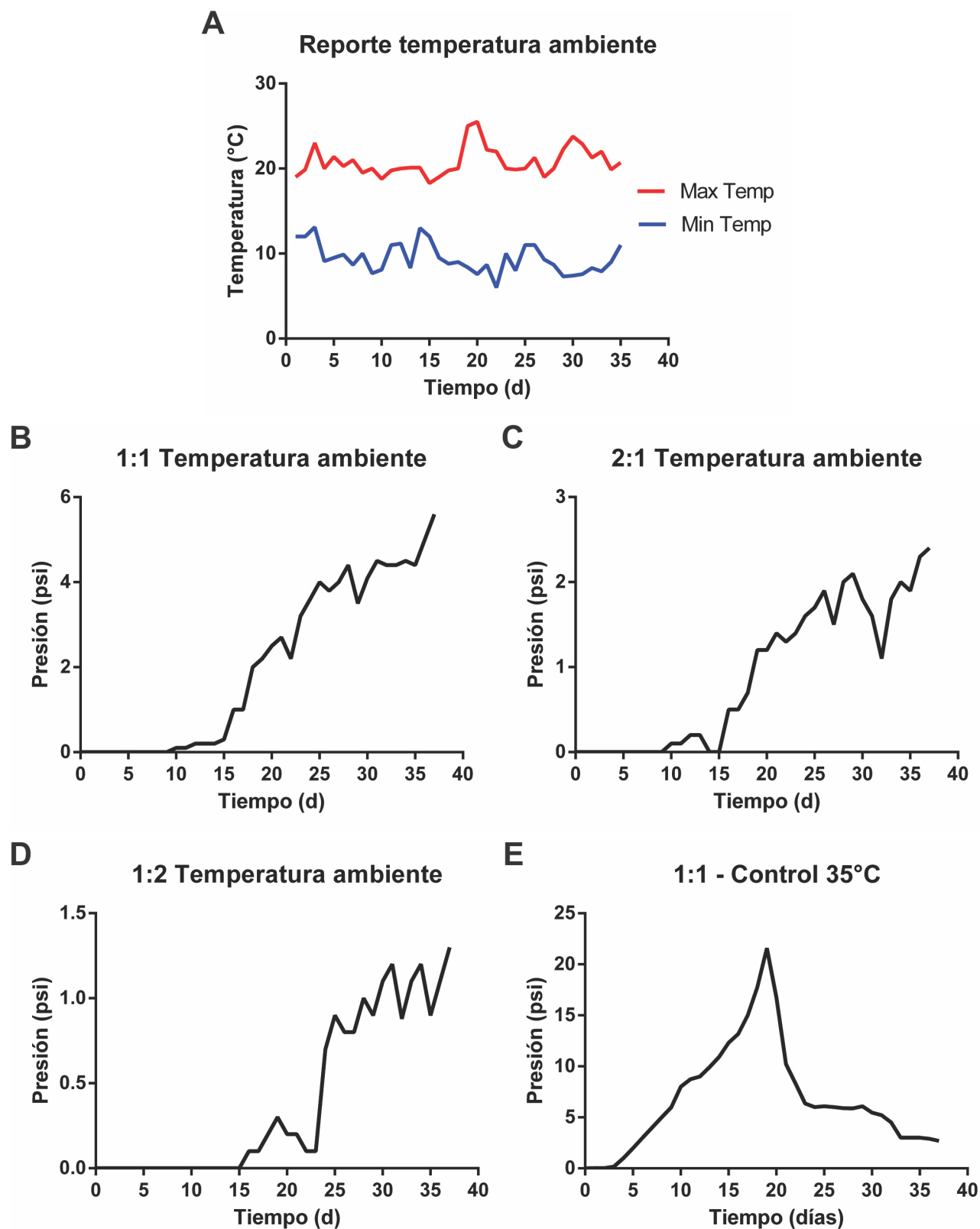


Figura 3: Presión y temperatura registradas en el bioreactor, en la parte superior se describe la relación de carga  $CRB - H_2O$  y la temperatura de cada proceso. En A, el reporte de la temperatura ambiente. Se evidencia que en términos de la relación de proporciones del cargue, la gráfica B ofreció un resultado óptimo frente a las gráficas C y D respectivamente; por último en E, se conservó la relación 1:1 a temperatura de  $35^{\circ}C$  para la cual se evidencia una eficiencia considerable en términos de la presión del producto generado

Comparado con la razón de cargue 2 : 1 y 1 : 2 de CRB :  $H_2O$ , en donde se registró al día 37, un máximo de presión al interior del reactor de 2.7 psi y 1.3 psi respectivamente, la presión del reactor en función de una razón de cargue 1 : 1 alcanzó una presión máxima de 5.8 psi, siendo este el proceso más eficiente en términos de la razón de las proporciones del cargue. Asimismo, la producción de gas fue evidente a partir del día 10 para las razones 1 : 1 y 2 : 1 y desde el día 15 para la relación 1 : 2. Lo anterior sugiere que la concentración de biomasa tiene efectos directos sobre la producción de biogás y que las condiciones de insaturación y sobresaturación de sustrato afectan la estequiometría de las reacciones y el crecimiento de las poblaciones microbianas presentes en el bioproceso.

Para el periodo durante el cual se realizaron las pruebas, se registraron también las variaciones de la temperatura ambiente local (Figura 3A). Al contrastar los cambios de temperatura ambiente con el registro de la presión generada en el reactor con cargue 1 : 1 (Figura 3B) para la misma fecha, llama la atención que la disminución de la temperatura ambiente en los diferentes días (ejemplo día 22 y 23; día 28 y 30) coincide con una disminución en la presión generada al interior del reactor. Lo anterior, lleva a plantear la posibilidad de asociación funcional entre la temperatura ambiente y la producción de biogás en un modelo de biodigestión anaerobia con CRB. Esta hipótesis ya ha sido previamente planteada por otros autores [15]. A diferencia de los patrones de presión generados bajo condiciones no controladas de temperatura, el control de temperatura resultó en un cambio del patrón de presión generada, esta vez, semejante en su tendencia, a una campana de Gauss con un valor máximo de 22 psi al día 17 (Figura 3E). Nuevamente, los resultados experimentales sugieren que el control de la temperatura bajo condiciones óptimas de cargue de biomasa CRB, favorece un incremento en la eficiencia en la producción de biogás que se ve reflejada en el incremento de la presión de hasta 5 veces y en menos tiempo. (Figura 3E vs 3B).

### 3.2. Identificación y control de la planta

Con los resultados experimentales presentados en el apartado anterior se procedió a determinar los parámetros de identificación de la planta y el diseño del lazo de control. En lo que respecta a los parámetros de identificación de la planta, se presentan las matrices A, b, c y el escalar d, las cuales fueron obtenidas utilizando Matlab y un sistema de adquisición de la señal de temperatura en función del tiempo implementando la tarjeta Arduino UNO.

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -0.5058 & -0.2600 \\ 0.5811 & 0.0183 \end{bmatrix} b = \begin{bmatrix} -0.0165 \\ 0.0217 \end{bmatrix} \\ c &= [-30.0385 \quad -19.2039] d = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Los valores propios del sistema son  $s = -0.2438 \pm j0.2871$  dado su polinomio característico  $G(s) = s^2 + 0.4875 + 0.1418$  (Figura 4).

#### 3.2.1. Controlabilidad y observabilidad de la planta

Utilizando las ecuaciones (3) y (4) se determinaron las matrices de controlabilidad y observabilidad de la planta U y V respectivamente, cuyos determinantes son no singulares.

$$\begin{aligned} U &= \begin{bmatrix} -0.0165 & 0.0027 \\ 0.0217 & -0.0092 \end{bmatrix}; \det[U] = 0.000092964 \\ V &= \begin{bmatrix} -30.0385 & -19.2039 \\ 4.0342 & 7.4594 \end{bmatrix}; \det[V] = -146.5978 \end{aligned} \quad (13)$$

Dada la no singularidad de las matrices U y V, la planta es controlable y observable.

#### 3.2.2. Ganancia de realimentación

Tomando como referencia el polinomio característico de la planta y el polinomio deseado propuesto por nosotros y su transformación equivalente P, se determinó la ganancia de realimentación k.

$$\begin{aligned} \bar{k} &= [5.5125 \quad 9.2182], P^{-1} = \begin{bmatrix} -0.0165 & -0.0054 \\ 0.0217 & 0.0014 \end{bmatrix} \\ k &= [-2044.2 \quad -1300.3] \end{aligned} \quad (14)$$

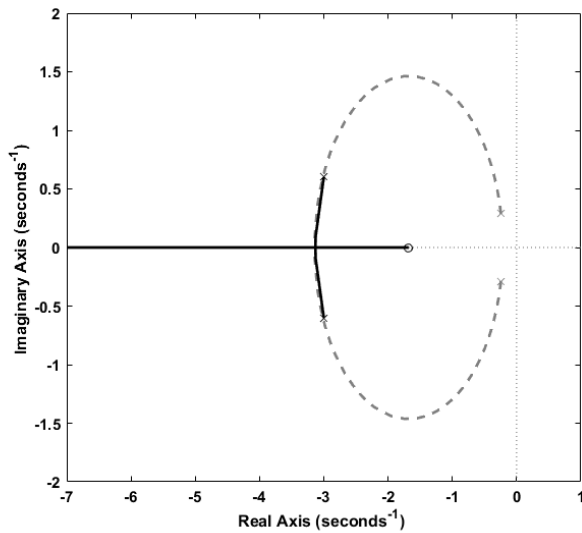


Figura 4: Lugar de las raíces. sistema de calentamiento (Traza punteada). Se observa que la planta posee dos polos conjugados en  $-0.2438 \pm j0.2871$ , puesto que estos se encuentran en el semiplano izquierdo del eje real, la planta es estable. Lazo de control de temperatura (Traza continua). Se evidencia que la ganancia de realimentación de los estados de la planta lleva los polos al lugar propuesto en este artículo.

### 3.2.3. Respuesta del lazo de control por realimentación de estados

En la figura 5A, se presenta la respuesta de seguimiento del lazo de control por realimentación de las variables de estado del sistema de calentamiento ante una

referencia aleatoria. Se observa que la señal de control llega a la referencia después de un máximo sobre impulso inferior al 10 % del valor de referencia.

Por otra parte, comparando la respuesta dinámica del modelo de identificación de la planta frente al lazo de control de temperatura por realimentación de estados (Figura 5B) ante el estímulo de una función paso unitario, se tiene que la señal correspondiente al modelo de identificación del sistema de calentamiento no llega a la referencia en estado estacionario y posee un tiempo de establecimiento mayor a 15 segundos. Referente a la respuesta de la señal de control, se observa que esta ofrece un máximo sobre impulso en un rango menor al 10 %, un tiempo de crecimiento menor a 1 segundo y un tiempo de establecimiento de 3 segundos llegando a la referencia en estado estacionario donde no se presentan oscilaciones.

## 4. Conclusiones

Fue viable la implementación de un control de temperatura por realimentación de estados para la generación de biogás a partir del proceso de biodigestión anaerobia con biomasa CRB efectuado en reactores tipo Batch a escala de laboratorio. Se evidenció que los cambios de temperatura inciden directamente sobre la presión generada al interior del reactor, lo que sugirió que un control de temperatura del proceso afectaría su eficiencia, lo cual fue confirmado experimentalmente como se observa en los resultados.

Dado que el sistema calefactor fue observable y controlable, se logró la asignación de autovalores de forma arbitraria garantizando la aplicabilidad del diseño de control sobre el ingenio.

## Referencias

- [1] Á. E. Pulido Aponte, H. M. Rivera Escobar, J. J. Espitia Pardo, Control, supervisión y representación matemática de un proceso de biodigestión anaerobia para la biomasa de contenido ruminal bovino, *Tecnura* 22 (58) (2018) 21–30.
- [2] A. G. Molina, J. O. Mancilla, M. S. Assi, E. V. Borges, Energía: celdas de combustible microbianas, *Ingeniería* 21 (1) (2017) 54–62.
- [3] M. Ríos, Aprovechamiento del contenido ruminal bovino para ceba cunicola, como estrategia para diezmar la contaminación generada por el matadero en san alberto, *Prospectiva* 10 (2) (2012) 56–63.
- [4] L. Uicab-Brito, C. S. Castro, Uso del contenido ruminal y algunos residuos de la industria cárnica en la elaboración de composta, *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 2 (2) (2003) 45–63.
- [5] D. K. Yeruva, G. Velvizhi, S. V. Mohan, Coupling of aerobic/anoxic and bioelectrogenic processes for treatment of pharmaceutical wastewater associated with bioelectricity generation, *Renewable Energy* 98 (2016) 171–177.
- [6] J. A. A. Aguilar, M. E. J. Zambrano, Mejora del servicio de recolección de residuos sólidos urbanos empleando herramientas sig: un caso de estudio, *Ingeniería* 19 (2) (2015) 118–128.

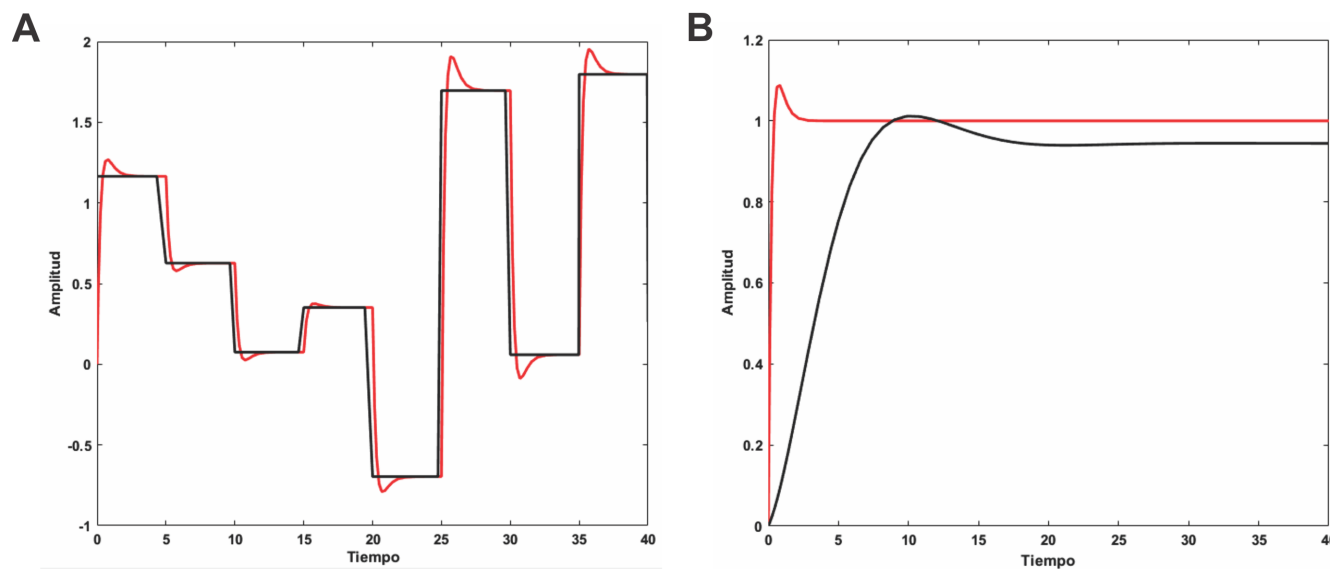


Figura 5: A. Respuesta de seguimiento del control referencia aleatoria. B. Respuesta del lazo de control vs la planta

- [7] M. d. S. Pedreira, S. G. d. Oliveira, O. Primavesi, M. A. d. Lima, R. T. S. Frighetto, T. T. Berchielli, Methane emissions and estimates of ruminal fermentation parameters in beef cattle fed different dietary concentrate levels, *Revista Brasileira de Zootecnia* 42 (8) (2013) 592-598.
- [8] A. Guerrero, A. Carolina, Aislamiento de bacterias ruminales degradadoras de celulosa, Universidad politécnica salesiana. Facultad deficiencias agropecuarias y ambientales. Ecuador (2011).
- [9] A. R. Moss, J.-P. Jouany, J. Newbold, Methane production by ruminants: its contribution to global warming, in: *Annales de zootechnie*, Vol. 49, EDP Sciences, 2000, pp. 231-253.
- [10] O. Rivas-Solano, M. Faith-Vargas, R. Guillén-Watson, Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad, *Revista Tecnología en Marcha* 23 (1) (2010) ág-39.
- [11] I. D. Ramírez-Rivas, Anaerobic digestion modeling: from one to several bacterial populations, *Tecnológicas* (31) (2013) 181-201.
- [12] C.-T. Chen, *Analog and digital control system design: transfer-function, state-space, and algebraic methods*, Oxford University Press, Inc., 1995.
- [13] I. Ramírez, P. Cobos, R. Gavi, N. Quevedo, A. González, Emisiones de metano generadas por excretas de animales de granja y contenido ruminal de bovino, *Colegio de postgraduados, Montecillo, Texcoco Edo. De México* (2010) 55.
- [14] O. A. Febres, J. Vergara-López, Z. Venezuela, Propiedades físicas y químicas del rumen, *Arch. Latinoam. Prod. Anim* 15 (1) (2007) 133-140.
- [15] J. M. Smith, *Ingeniería de la cinética química*, Compañía Editorial Continental, 1986.