

Methane and hydrogen flow production enhancements in a two-stage anaerobic co-digestion system using simple robust controllers

Mariana Rodríguez-Jara*, José Vian**, Alejandra Velasco-Pérez***, Hector Puebla*

*Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Ciudad de México, 02200, México (hpuebla@azc.uam.mx, maroja@azc.uam.mx)

**Unidad Chocamán, Universidad Politécnica de Huatusco, Chocamán 94160, México (ibvianperez@gmail.com)

***Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Región Orizaba-Córdoba, Orizaba 94340, México (alvelasco@uv.mx)

Abstract: Anaerobic digestion is a well-known technology for simultaneously degrading organic contaminants or residues and their valorization by generating valuable energy resources such as hydrogen and methane. Co-digestion has been introduced to increase biogas production by combining difficult-to-digest organic waste with easily degradable substrates. Two-stage anaerobic digestion has been introduced to enhance energy recovery efficiency and operational stability. Anaerobic digestion is a complex process that requires suitable controllers. This work presents the design and application of two simple robust controllers to improve biogas production compared to nominal operation. Results show that both controller designs can improve biogas production by manipulating the dilution rate of the methanogenic reactor.

Keywords: Process control; Robust control; Nonlinear Model Predictive Control; Anaerobic digestion; Energy production.

1. INTRODUCCION

La digestión anaeróbica es una tecnología bien conocida para la degradación simultánea de contaminantes o residuos orgánicos y su valorización mediante la generación de valiosos recursos energéticos como el hidrógeno y el metano (Laiq Ur Rehman et al., 2019). La digestión anaeróbica con un solo tipo de carga orgánica (mono digestión) presenta desafíos asociados con las características de la materia prima. La co-digestión que consiste en usar múltiples materias primas proporciona el potencial para superar estas limitaciones. En efecto, se han reportado mejoras de la digestibilidad debido a los efectos sinérgicos de los cosustratos, una mejor estabilidad del proceso y un mayor valor nutritivo del codigestato resultante (Siddique y Wahid, 2018).

Por otro lado, los digestores convencionales se pueden ver limitados en la degradación de cargas orgánicas fáciles y rápidas de biodegradar, tales como la co-digestión, al generar y acumular ácidos grasos que inhiben a las bacterias metanogénicas. Para estas clases de carga orgánica se ha propuesto el uso de digestores anaerobios de dos etapas, los cuales separan a las bacterias acidogénicas en un primer biorreactor y a las bacterias metanogénicas en un segundo biorreactor, lo cual permite una producción integrada de biohidrógeno y biometano (Arreola-Vargas et al., 2016; Fu et al., 2016; Roeva et al., 2025).

Sin embargo, aun considerando la separación en dos etapas, se ha demostrado que la sensibilidad de la digestión anaerobia presenta desafíos operacionales para mantener procesos de alta eficiencia debido al alta no linealidad, la disponibilidad

limitada de modelos para fines de control, incertidumbres, sin mencionar que son altamente susceptibles a la inhibición, y su inicio es muy lento. Así, es necesario el diseño e implementación de esquemas de control que permitan una operación eficiente del proceso (Alvarez-Ramirez et al., 2002; Nguyen et al., 2015). Más aun, es deseable que los esquemas de control sean simples y robustos para su potencial aplicación práctica.

En este trabajo se presenta el diseño y aplicación de dos esquemas de control simples con buenas propiedades de robustez a un proceso de co-digestión anaerobia de dos etapas. Los esquemas de control son el control por compensación de error (MEC) de modelado basado en un modelo simple entrada-salida (Rodríguez-Jara et al., 2021; Rodríguez-Jara et al., 2022) y el control no-lineal de modo predictivo no-lineal (Piceno-Díaz et al., 2020).

El control MEC basado en modelo es un enfoque de control que combina una retroalimentación para asignar una dinámica deseada y la estimación y compensación de incertidumbres y perturbaciones agrupadas. El diseño es simple y ha mostrado buenas propiedades de robustez a incertidumbres paramétricas y estructurales. El control NMPC ofrece buenas propiedades de robustez al comparar en cada paso de muestreo la predicción del modelo con su medición o estimación. El NMPC se considera la evolución del control MPC para mejorar el desempeño a lazo cerrado sin costos computacionales excesivos comparados con su versión robusta.

Los resultados muestran que al manipular la dilución del biorreactor metanogénico es posible incrementar en forma simultánea la producción de biometano y biohidrógeno.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1 Caso de estudio

Se considera un digestor de dos etapas con dos biorreactores de 3 dm³ (BR1) y 15 dm³ (BR2), respectivamente. En el BR1 se lleva a cabo la hidrólisis y la acidogénesis, favoreciendo la generación de hidrógeno. En el BR2 se lleva a cabo la metanogénesis, favoreciendo la generación de metano (Roeva et al., 2025).

El sustrato para la degradación consiste en una mezcla constituida por residuos de trigo y biomasa de algas en una proporción de 80:20 p/p. El BR1 opera a 55 °C y un pH de 5-5.5, y el BR2 a 35 °C y pH de 6.3-7.2. Los detalles adicionales del sistema experimental se presentan en Roeva et al. (2025).

El modelo matemático está dado por los balances de materia sobre el sustrato (S_1), la concentración de biomasa acidogénica (X_1) y el acetato (A_{c1}) en el BR1, y el acetato (A_{c2}) y la biomasa metanogénica (X_2) en el BR2, como sigue,

$$\frac{dS_1}{dt} = D_1(S_{1in} - S_1) - K_1 \frac{\mu_{1max} S_1}{K_{S1} + S_1} X_1 \quad (1)$$

$$\frac{dX_1}{dt} = -D_1 X_1 + \frac{\mu_{1max} S_1}{K_{S1} + S_1} X_1 \quad (2)$$

$$\frac{dA_{c1}}{dt} = -D_1 A_{c1} + K_2 \frac{\mu_{1max} S_1}{K_{S1} + S_1} X_1 \quad (3)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = -D_2 X_2 + \frac{\mu_{2max} A_{c2}}{K_{S2} + A_{c2}} X_2 \quad (4)$$

$$\frac{dA_{c2}}{dt} = D_2(A_{c1} - A_{c2}) - K_3 \frac{\mu_{2max} A_{c2}}{K_{S2} + A_{c2}} X_2 \quad (5)$$

Los flujos de hidrógeno y metano se calculan como sigue,

$$Q_{H_2} = K_{H_2} \frac{\mu_{1max} S_1}{K_{S1} + S_1} X_1 \quad (6)$$

$$Q_{CH_4} = K_{CH_4} \frac{\mu_{2max} A_{c2}}{K_{S2} + A_{c2}} X_2 \quad (7)$$

La concentración de todas las especies está dada en g/L, y los flujos de hidrógeno y metano estos dados en unidades de mL/d/gVS.

Se debe notar que, por la operación continua y la diferencia de volúmenes entre los dos biorreactores, la dilución de los dos biorreactores está relacionada como,

$$\frac{D_1}{V_1} = \frac{D_2}{V_2}$$

Por otro lado, desde el punto de vista operativo convencional, la producción de metano se considera como el gas de mayor interés, y la dilución es la variable natural que se selecciona como entrada de control. De esta forma, en este trabajo se selecciona como entrada de control la dilución de BR2, i.e., $u = D_2$.

La Figura 1 muestra la simulación numérica con valores nominales reportados en Roeva et al. (2025): $\mu_{1max} = 2.89 \text{ d}^{-1}$, $K_{S1} = 1.61 \text{ g/L}$, $K_1 = 40.06 \text{ g/g}$, $K_2 = 9.70 \text{ g/g}$, $\mu_{2max} = 15.57 \text{ d}^{-1}$, $K_{S2} = 0.5 \text{ g/L}$, $K_3 = 1.88 \text{ g/g}$, $K_{H_2} = 17.88 \text{ g/g}$, $K_{CH_4} = 108.92 \text{ g/g}$, $S_{1in} = 50 \text{ g/L}$, $D_1 = 0.5 \text{ d}^{-1}$, $D_2 = 0.1 \text{ d}^{-1}$.

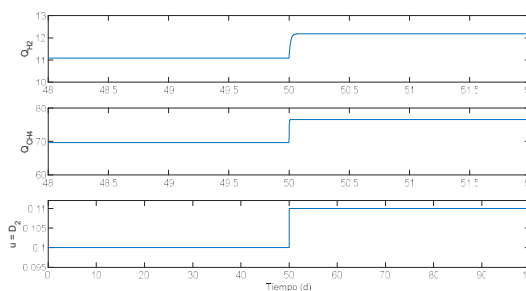


Figura 1. Simulación base del DA de dos etapas y efecto de un cambio escalón en D_2 .

Se debe notar que si se establece como objetivo de control la degradación de la carga orgánica de entrada, la selección de la entrada de control natural sería la dilución al reactor acidógeno.

La Figura 1 muestra además el efecto de un cambio escalón en D_2 , y su efecto en la producción de hidrógeno y metano. Se puede notar en la respuesta al cambio escalón que esta se puede ajustar a una respuesta entrada-salida simple de primer orden.

2.2 Control robusto basado en modelo entrada-salida

El diseño de control parte de las ideas presentadas en Rodríguez-Jara et al. (2021), que consiste en los siguientes pasos generales:

1. Obtener una modelo de respuesta entrada-salida de primer orden con la identificación empírica del proceso,

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k_p}{\tau_0 s + 1} \quad (8)$$

2. Escribir el modelo entrada-salida de primer orden en el tiempo considerando incertidumbres ($\eta(t)$) por la reducción del modelo, perturbaciones y parámetros inciertos del modelo,

$$\frac{dy}{dt} = -\tau_0^{-1} y(t) + k_p \tau_0^{-1} u(t) + \eta(t) \quad (9)$$

3. Introducir un estimador de orden reducido para estimar las incertidumbres $\eta(t)$, el cual después de unas manipulaciones algebraicas toma la forma,

$$\begin{aligned} \frac{dw_{MEC}(t)}{dt} &= -\tau_e^{-1} (w_{MEC}(t) + y(t)) \\ &\quad + \tau_0^{-1} y(t) - k_p \tau_0^{-1} u(t) \\ w_{MEC}(t) &= \tau_e \bar{\eta}(t) - y(t) \end{aligned} \quad (10)$$

Donde τ_e es una constante de tiempo de estimación, $\eta(t)$ es la incertidumbre real del modelo y $\bar{\eta}(t)$ es la incertidumbre estimada.

4. Introducir un controlador para asignar la dinámica a lazo cerrado deseada. En el caso más simple se

selecciona una dinámica a lazo cerrado de primer orden del error de regulación,

$$u(t) = -\frac{\tau_0}{k_p} \left(-\tau_0^{-1}y(t) + \dot{\eta}(t) + \tau_e^{-1}e(t) - \frac{dy_{ref}(t)}{dt} \right) \quad (11)$$

Donde τ_c es una constante de tiempo a lazo cerrado. Los dos parámetros del controlador se pueden seleccionar con la regla simple $\tau_e < \tau_c < \tau_0$.

2.3 Control de Modo Predictivo No-Lineal

Se considera la formulación estándar del NMPC (Allgöwer et al., 1999):

$$\min_{u_i} J = \sum_{j=1}^N \|y_{j|k} - y^{ref}\|_Q^2 + \sum_{i=1}^M \|\Delta u_{j|k}\|_S^2 + \sum_{i=1}^M \|u_{j|k} - u^{ref}\|_R^2 \quad (12)$$

Figura 2. Desempeño del control MEC para el control del flujo de metano.

sujeto a:

$$y(k+1) = f(y(k), u(k)) \quad y(0) = y_0 \quad (13)$$

$$y_{min} \leq y_k \leq y_{max} \quad (14)$$

$$u_{min} \leq u_{j|k} \leq u_{max} \quad (15)$$

$$\Delta u_{min} \leq \Delta u_{j|k} \leq \Delta u_{max} \quad (16)$$

Donde y_k es la predicción del estado a controlar, y_{ref} es la referencia del estado, u_{ref} es la referencia de la entrada de control, N es el horizonte de predicción, M es el horizonte de control. Q , R , y S son matrices de ponderación.

La idea del NMPC es resolver un problema de optimización en cada instante de muestreo hasta los horizontes de predicción y control con lo cual se obtiene una secuencia optima de entradas de control. De esta secuencia se implementa solo la primera entrada de control y se repite el procedimiento para el siguiente instante de tiempo.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

En esta sección se aplican los diseños de control robustos propuestos anteriormente para incrementar la producción nominal o base de metano e hidrogeno. La implementación de los dos controladores se realizó en Matlab con una PC con CPU Intel(R) Core (TM) i5-8400T de 1,70 GHz y 16 RAM. El controlador MEC se implementa en la simulación numérica base la cual se programó en Matlab usando Runge-Kutta cuarto orden con un paso de integración de 0.001. Para implementar el NMPC se realizó utilizando el enfoque simultáneo, el cual consiste en discretizar los perfiles de estado y control mediante la colocación ortogonal en elementos finitos (Piceno-Diaz et al., 2020). El problema de optimización de NLP resultante se programó y resolvió en Matlab utilizando

la función *fmincon* con el método de optimización de punto interior.

El problema se establece como la regulación del flujo de metano, $y = Q_{CH_4}$, a $y_{ref} = 80 \text{ mL/d/gVS}$, manipulando D_2 . Las acciones que se aplican a la implementación del controlador son: (i) En $t = 100 \text{ d}$ se activa el controlador. (ii) En $t = 150 \text{ d}$ se evalúa el desempeño del controlador con una disminución del 20% de la carga orgánica de entrada S_{in} . (iii) En $t = 200 \text{ d}$ se considera además un cambio de referencia a 100 mL/d/gVS de metano. La entrada de control se restringe a un valor mínimo de 0.01 y un valor máximo de 0.3 considerando que no exista mucha desviación respecto al valor base de 0.1.

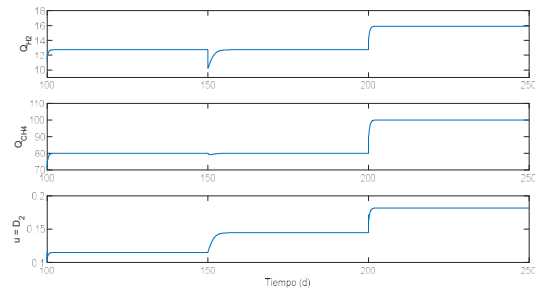


Figura 2. Desempeño del control MEC para el control del flujo de metano.

Las Figuras 2 y 3 muestran el desempeño de los controladores propuestos, MEC y NMPC. Los parámetros del controlador MEC se basan en la respuesta entrada-salida $k_p = 610$, $\tau_0 = 0.8$. Los parámetros del NMPC se seleccionaron como $T_s = 0.5$, $N = 4$ periodos de tiempo, $M = 2$ periodos de tiempo, y pesos unitarios.

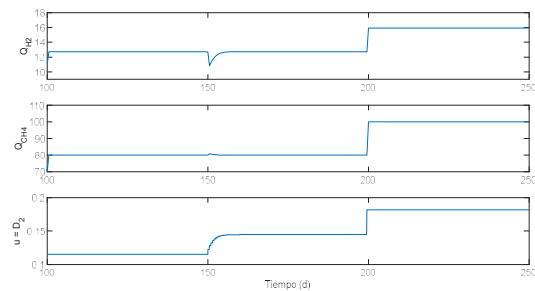


Figura 3. Desempeño del control NMPC para el control del flujo de metano.

El tiempo de cómputo es de alrededor de 1 y 4 minutos para el MEC y NMPC, respectivamente. El MEC y el NMPC muestran tendencias similares para la variable controlada y la entrada de control. Los resultados muestran que la entrada de control no es agresiva y permite llevar o mantener la variable controlada en los valores deseados a pesar de las perturbaciones. Cuando se activa el controlador, la entrada de control se incrementa respecto al valor base. Este incremento en la entrada de control genera también un incremento en D_1 , lo cual está asociado a una disminución de los tiempos de residencia en los dos biorreactores. Al disminuir el tiempo de residencia el acetato que se genera en el segundo biorreactor se incrementa generando un incremento en la producción de metano. Por otro lado, al disminuir el tiempo de residencia del

primer biorreactor se genera un menor consumo del hidrogeno que se produce. Este comportamiento es similar en la presencia de la disminución de la carga orgánica de entrada y el incremento en la referencia.

Para evaluar la robustez del controlador y simular escenarios más realistas, en las Figuras 4 y 5 se muestra el desempeño de los dos esquemas de control aplicados al considerar a ruido de medición gaussiano alrededor de un 5 % del valor generado por el modelo.

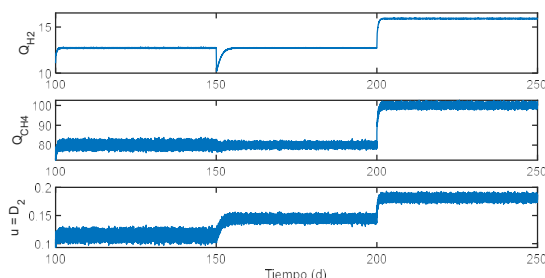


Figura 4. Desempeño del control MEC para el control del flujo de metano considerando ruido de medición.

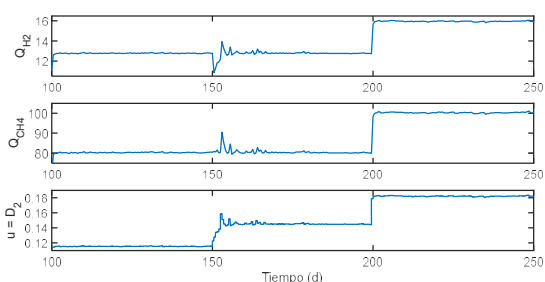


Figura 5. Desempeño del control NMOC para el control del flujo de metano considerando ruido de medición.

Se puede notar que, a pesar de una degradación del desempeño de control al presentarse fluctuaciones alrededor de la variable controlada y fluctuaciones en la variable manipulada, los resultados son satisfactorios. Las fluctuaciones son menos intensas en el control NMCP debido a que solo se reflejan en los instantes de muestreo y no continuamente. Los resultados del MEC se podrían mejorar al considerar el filtrado del ruido de medición o de la entrada de control resultante para reducir el desgaste en el actuador.

6. CONCLUSIONES

La co-digestión anaerobia y los digestores en dos etapas son dos alternativas para incrementar la valorización de residuos orgánicos y proporcionar mayor estabilidad operacional al proceso global de digestión anaerobia. Con la finalidad de incrementar la generación de metano e hidrogeno, en este trabajo se presenta el diseño y aplicación de dos esquemas de control robustos simples: un controlador basado en modelo simple entrada-salida mejorado con estimación de incertidumbres, y el control de modo predictivo-no lineal. Los dos esquemas de control tienen una estructura que se puede implementar en forma práctica y proporcionan buenas propiedades de robustez. La robustez de los dos controladores

incluye la tolerancia a incertidumbres paramétricas, estructurales, perturbaciones y ruido de medición. Los resultados son similares con la ventaja de que el esquema basado en modelo entrada-salida es menos demandante computacionalmente y solo requiere la medición del flujo de metano. Los resultados del ajuste de la entrada de control permiten identificar ajustes en la dilución base para incrementar a valores deseados la producción de metano e hidrogeno.

REFERENCES

- Alvarez-Ramirez, J., Meraz, M., Monroy, O., y Velasco, A. (2002). Feedback control design for an anaerobic digestion process. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 77 (6), 725-734.
- Allgöwer, F., Badgwell, T. A., Qin, J. S., Rawlings, J. B., y Wright, S. J. (1999). Nonlinear predictive control and moving horizon estimation-an introductory overview. *Advances in Control*, 391-449.
- Arreola-Vargas, J., Flores-Larios, A., González-Álvarez, V., Corona-González, R. I., y Méndez-Acosta, H. O. (2016). Single and two-stage anaerobic digestion for hydrogen and methane production from acid and enzymatic hydrolysates of Agave tequilana bagasse. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (2), 897-904.
- Fu, S. F., Xu, X. H., Dai, M., Yuan, X. Z., y Guo, R. B. (2017). Hydrogen and methane production from vinasse using two-stage anaerobic digestion. *Process Safety and Environmental Protection*, 107, 81-86.
- Laiq Ur Rehman, M., Iqbal, A., Chang, C. C., Li, W., y Ju, M. (2019). Anaerobic digestion. *Water Environment Research*, 91 (10), 1253-1271.
- Nguyen, D., Gadhamshetty, V., Nitayavardhana, S., y Khanal, S. K. (2015). Automatic process control in anaerobic digestion technology: a critical review. *Bioresource Technology*, 193, 513-522.
- Piceno-Díaz, E. R., Ricardez-Sandoval, L. A., Gutierrez-Limon, M. A., Méndez-Acosta, H. O., y Puebla, H. (2020). Robust nonlinear model predictive control for two-stage anaerobic digesters. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59 (52), 22559-22572.
- Rodríguez-Jara, M., Flores-Mejia, H., Velasco-Perez, A., y Puebla, H. (2021). Robust control framework based on input-output models enhanced with uncertainty estimation. *Studies in Informatics and Control*, 30(1), 99-108.
- Rodríguez-Jara, M., Velasco-Pérez, A., Vian, J., Viguera-Carmona, S. E., y Puebla, H. (2022). Robust control based on modeling error compensation of microalgae anaerobic digestion. *Fermentation*, 9 (1), 34.
- Roeva, O., Chorukova, E., y Kabaivanova, L. (2025). Advanced mathematical modeling of hydrogen and methane production in a two-stage anaerobic co-digestion system. *Mathematics*, 13 (10), 1601.

- Siddique, M. N. I., y Wahid, Z. A. (2018). Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion: a review. *Journal of Cleaner Production*, 194, 359-371.
- Wainaina, S., Lukitawesa, Kumar Awasthi, M., y Taherzadeh, M. J. (2019). Bioengineering of anaerobic digestion for volatile fatty acids, hydrogen or methane production: a critical review. *Bioengineered*, 10 (1), 437-458.