

Control por búsqueda de extremos en biodigestores: mejora de estabilidad mediante lazo auxiliar

Martín Jamilis

Grupo de Control Aplicado
Instituto LEICI (UNLP-CONICET)
La Plata, Argentina
Email:martin.jamilis@ing.unlp.edu.ar

María Teresita Castañeda

Grupo de Control Aplicado
Instituto LEICI (UNLP-CONICET)
La Plata, Argentina

Hernán De Battista

Grupo de Control Aplicado
Instituto LEICI (UNLP-CONICET)
La Plata, Argentina

Resumen—La digestión anaeróbica es un proceso de gran relevancia para la bioeconomía y el desarrollo sustentable, teniendo el biogás producido un alto potencial energético. A pesar de esto, gran parte de las plantas existentes en Argentina no aprovechan el biogás, o bien, tiene una producción muy baja. Esto se debe en gran parte a la falta de mecanismos de instrumentación y control. El objetivo general de este trabajo es el desarrollo de métodos de control robustos para optimizar la producción de biogás en digestores anaeróbicos de bajo costo e instrumentación escasa como los que suelen encontrarse en instalaciones rurales o PyMES de la Argentina. Se plantea una instrumentación mínima y tiempos de muestreo del orden de un día, compatibles con mediciones manuales y operación de bombas a velocidad constante. A partir de desarrollos anteriores de controladores por búsqueda de extremos para la maximización de la producción de biogás, en este trabajo se proponen lazos de acondicionamiento auxiliares para mejorar su estabilidad a partir de la realimentación del parámetro FOS/TAC. Los lazos propuestos se validaron mediante simulación, incluyendo el tratamiento de efluentes con carga orgánica variante. Los resultados obtenidos muestran que se puede aumentar la velocidad de respuesta sin comprometer la estabilidad.

Palabras Clave—digestión anaeróbica, búsqueda de extremos, FOS/TAC, biogás, optimización, control

I. INTRODUCCIÓN

El proceso de digestión anaeróbica (DA) es un tema de interés a nivel mundial en pos de fortalecer las energías renovables y reducir la huella de carbono y emisiones de gases de efecto invernadero. La relevancia de este proceso recae en el aprovechamiento y tratamiento de residuos orgánicos provenientes de la actividad agroindustrial para producción de biogás el cual puede emplearse tanto a nivel doméstico como industrial. Si bien aún tiene un bajo impacto en la cadena de valor bio en Argentina, tiene gran potencial energético como reemplazo de gas natural de origen no renovable, y a su vez, permite valorizar los recursos biomásicos [1].

Brevemente, la DA es un bioproceso en el que un consorcio microbiano degrada materia orgánica compleja dando lugar, entre otros productos, a gases como dióxido de carbono y metano (biogás), e incluso hidrógeno. La combustión del biogás se puede aprovechar para generación de energía y

calefacción, cerrando de este modo el ciclo de economía circular con una reducción significativa de la huella de carbono. El recurso orgánico puede provenir de residuos de la actividad agrícola/ganadera, efluentes y desperdicios provenientes de la industria alimenticia, entre otros [2]. La DA se lleva a cabo en un biodigestor de una o más etapas, donde se debe proveer un ambiente propicio para el desarrollo de los grupos de microorganismos deseados, con el objetivo de obtener biogás en cantidad y calidad deseada. Entre los factores más relevantes en el proceso está el pH, la temperatura y la carga orgánica (usualmente DQO), siendo también importantes la relación carbono/nitrógeno (C/N) y el tiempo de retención de sólidos y líquidos [2]. Una operación incorrecta del biodigestor puede llevar a su colapso por inhibición de los microorganismos metanogénicos encargados de la producción de metano. En estos casos, para lograr que la planta vuelva a estar operativa se requiere una enorme cantidad de trabajo (trasiegos por bombeo, vaciado del digestor, etc.), que significarán varias semanas sin producción de gas. Este tipo de fallo puede ser muy costoso y puede poner en peligro la rentabilidad de todo un año [3].

Desde la ingeniería de control se han realizado múltiples aportes en cuanto al control y la operación del proceso [4]–[8], obteniéndose desempeños robustos y, en algunos casos, óptimos en cuanto a producción de biogás. En la mayoría de los casos citados, la variable manipulada es el tiempo de retención de líquidos expresado como su inversa, la tasa de dilución (D). Si bien existen variantes en cuanto a qué variables medir y realimentar, cuando se trata de la optimización del proceso, la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV) y la composición y caudal del biogás se asumen medidas en línea de forma continua. Independientemente de la técnica de control utilizada, la instrumentación necesaria para implementar estos controles sería un obstáculo en biodigestores de media y baja escala, como los que pueden tener las PyMES de la industria agrícola o alimentaria. En Argentina, el nivel de instrumentación y automatización de este tipo de plantas es en su mayoría escaso y la carga del biodigestor se realiza manualmente o con bombas a velocidad fija [9]. Adicionalmente, la falta de instrumentación dificulta la determinación de parámetros importantes para modelar el proceso, lo que obstaculiza la optimización a partir de variables internas como en [7].

Trabajo de investigación financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PICT-2019-03476 y PICT 2019-03635). Universidad Nacional de La Plata (PPID-I015 y UNLP-11/I253) y CONICET (PIP 2595 y PIP 0331).

Si bien queda claro que gran parte de la solución puede ser aportada desde el desarrollo e integración tecnológica, las técnicas de control también pueden adaptarse a las plantas y condiciones de operación locales. En particular, integrando indicadores ya establecidos en métodos de operación manual. Entre ellos, la relación FOS/TAC es muy utilizada en las plantas de biogás como valor guía para la evaluación del proceso fermentativo y la toma de decisiones [10]. El FOS representa la concentración de AGVs producidos durante la etapa de acidogénesis (expresados en gramos de ácido acético por litro gHAc/L), mientras que el TAC es la capacidad de compensación alcalina (expresada en gCaCO₃/L) [11]. Esta relación permite estimar el riesgo de acidificación en un biodigestor, el cual puede derivar en la inhibición de grupos de microorganismos, como los metanogénicos, y con ellos, la disminución de la producción de biogás [10]. La ventaja del método FOS/TAC, comparado con medir únicamente concentración de ácidos, es que provee información de la capacidad amortiguadora del medio [12]. Por otra parte, ambos parámetros (FOS y TAC) se pueden medir fácilmente por titulación, la determinación es rápida (pocos minutos), robusta y económica [13], lo cual resulta atractivo en establecimientos pequeños con recursos limitados. En particular, para utilizar al FOS/TAC como variable realimentada en lazos de control automático.

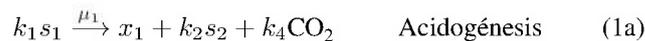
El objetivo de este trabajo es el desarrollo de controladores robustos para optimizar la producción de biogás, en el contexto de instrumentación escasa y operación manual como la de muchas plantas de Argentina. Esto implica, por un lado, periodos de muestreo del orden de 1 día, pero también la posibilidad de utilizar instrumentación más económica (un analizador de gases manual puede costar menos de US\$1000). Anteriormente, hemos propuesto lazos de control por búsqueda de extremos para llevar al proceso a trabajar en un punto de operación donde el flujo de metano es máximo sin conocer su dilución exacta a priori [14]. El punto óptimo está muy próximo a una región inestable, lo que genera serios desafíos a la robustez de los sistemas de control. Particularmente, en [14], se impusieron sintonizaciones conservativas de los controles, para evitar sobrepicos que lleven a incursionar en dicha región. En este trabajo proponemos la incorporación de un lazo auxiliar, basado en la medición del FOS/TAC, para mejorar la estabilidad del sistema de control por búsqueda de extremos y poder utilizar sintonizaciones más agresivas que den tiempos de convergencia y rechazo a perturbaciones más cortos. Para esto, en la Sección II se describe al sistema y se proponen dos lazos auxiliares que implementan la realimentación del FOS/TAC, el cual se supone medido con una frecuencia diaria. En la Sección III se muestran y comparan resultados de simulación para cada lazo, incluyendo perturbaciones en la carga orgánica de entrada.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

II-A. Modelo del sistema

En este acercamiento al problema de control usamos un modelo de baja escala publicado por Bernard y col. [15], frecuentemente usado para el análisis dinámico y diseño de controladores. Este modelo considera dos reacciones en cascada,

acidogénesis y metanogénesis, y su análisis dinámico resulta de menor dificultad que el de uno más complejo, como el ADM1 [15].



donde s_1 es el carbono orgánico, cuantificado por la demanda química de oxígeno (DQO), s_2 son ácidos grasos volátiles (AGV), x_1 es el grupo de organismos acidogénicos y x_2 el grupo de organismos metanogénicos.

Para cada grupo funcional, el modelo considera cinéticas dependientes de un único sustrato. Para las acidogénicas una cinética monótona del tipo Monod, y para las metanogénicas una cinética con inhibición del tipo Haldane:

$$\mu_1 = \mu_{1max} \frac{s_1}{K_{s_1} + s_1} \quad (2a)$$

$$\mu_2 = \mu_{2max} \frac{s_2}{K_{s_2} + s_2 + \frac{s_2^2}{K_{I_2}}} \quad (2b)$$

donde μ_i es la velocidad específica de crecimiento, siendo μ_{imax} su máximo valor, K_{s_i} y K_{I_i} son las constantes de saturación media y de inhibición asociadas a cada sustrato s_i , respectivamente. La cinética de los microorganismos metanogénicos (μ_2) contempla inhibición por exceso de AGV. Este efecto es bien conocido y es una de las fuentes de inestabilidad del proceso, aunque dependiente de la capacidad *buffer* del medio. Si bien la alcalinidad se contempla como una variable de estado, no se incluye su efecto sobre las cinéticas de crecimiento. El modelo de [15] tampoco contempla el pH o la temperatura y los asume ya controlados.

Adicionalmente, se define como variable de estado al carbono inorgánico total (c), que tiene en cuenta la concentración de CO₂ disuelto y bicarbonato (B):

$$c = \text{CO}_2 + B \quad (3)$$

Si bien hay otros compuestos que pueden aportar a la capacidad alcalina del medio, en el rango de pH del digestor (pH=6-8) las especies de mayor relevancia son HCO₃⁻ y CO₂ [11].

El modelo dinámico del proceso, en cuanto a concentraciones, es:

$$\dot{x}_1 = (\mu_1 - \alpha D)x_1 \quad (4a)$$

$$\dot{x}_2 = (\mu_2 - \alpha D)x_2 \quad (4b)$$

$$\dot{s}_1 = D(s_{1in} - s_1) - k_1 \mu_1 x_1 \quad (4c)$$

$$\dot{s}_2 = D(s_{2in} - s_2) + k_2 \mu_1 x_1 - k_3 \mu_2 x_2 \quad (4d)$$

$$\dot{c} = D(c_{in} - c) - Q_c + k_4 \mu_1 x_1 + k_5 \mu_2 x_2 \quad (4e)$$

donde las k_i son rendimientos, s_{1in} y s_{2in} con concentraciones de entrada de DQO y AGV, D es la tasa de dilución, α es un coeficiente que cuantifica la porción de biomasa no inmovilizada que puede perderse con el efluente, y Q_c es el caudal de CO₂ que se pierde por transferencia desde la fase líquida a la gaseosa.

Por su parte, la tasa volumétrica de producción de metano (Q_m) es:

$$Q_m = k_6 \mu_2 x_2 \quad (5)$$

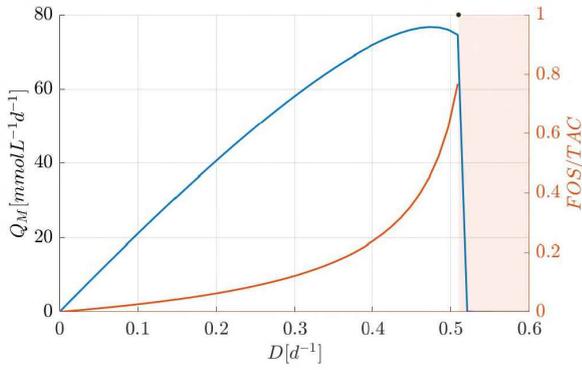


Figura 1. Transferencia estática de dilución a flujo de metano (azul) y FOS/TAC (rojo) obtenida mediante simulaciones.

donde k_6 es el rendimiento producto a biomasa, μ_2 y x_2 son la velocidad específica de crecimiento y concentración de microorganismos metanogénicos, respectivamente.

Finalmente, la relación FOS/TAC puede calcularse de acuerdo con las variables del modelo, de la siguiente manera:

$$\frac{FOS}{TAC} = \frac{s_2}{c} \quad (6)$$

Detalles adicionales sobre los valores de los parámetros (rendimientos y constantes) pueden encontrarse en la publicación original [15].

II-B. Lazos auxiliares para estabilidad

Se desea lograr una operación tal que el flujo de metano Q_m sea máximo, para optimizar la productividad. Desafortunadamente, el punto de operación óptimo implica trabajar con valores de FOS/TAC elevados, mayores a los recomendados para una operación segura [9]. Esto lleva a que se trabaje muy cerca de la inestabilidad del proceso. En la Figura 1 se muestra un mapeo de la transferencia D a Q_m y D a FOS/TAC obtenido mediante múltiples simulaciones del modelo (4) a lazo abierto con distintos valores de D , $s_{1in} = 10 \text{ mmol L}^{-1}$ y $s_{2in} = 100 \text{ g L}^{-1}$. Se grafican los valores de estado estacionario para cada D . La operación usual recomendada se realiza a valores de FOS/TAC menores a 0,4. Se puede notar que el flujo óptimo al cual se desea operar se encuentra por fuera de ese rango. En este caso a una dilución de aproximadamente $0,47 \text{ d}^{-1}$. Para diluciones permanentes mayores a $D = 0,51 \text{ d}^{-1}$ (región coloreada) el proceso se inestabiliza, perdiéndose los microorganismos metanogénicos y el carbono inorgánico, y elevándose rápidamente la concentración de VFAs. En esa zona el FOS/TAC es mayor a 0,8.

El esquema básico de los controles propuestos se muestra en la Figura 2 (trazos negros). El objetivo es estabilizar al sistema en un punto donde el gradiente del mapa Q_m/D sea nulo ($\omega_{ref}=0$). Para esto se necesita un algoritmo para estimar el gradiente de dicho mapa, como se muestra en el lazo de realimentación. Por otra parte, el controlador generalmente tendrá un término integral, para asegurar la dilución óptima (D^*) al alcanzar el gradiente nulo. En este trabajo, se utiliza

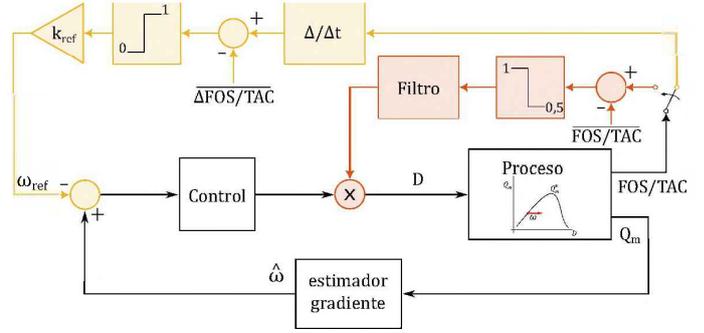


Figura 2. Esquema de lazo de control por búsqueda de extremos con los lazos auxiliares propuestos. En negro el control por búsqueda de extremos. En rojo el lazo auxiliar de acondicionamiento de la acción de control. En amarillo el lazo auxiliar de acondicionamiento de referencia.

un control integral puro en tiempo discreto y un estimador por modos deslizantes en tiempo discreto [16], que además de dar una estimación poco ruidosa del gradiente, incorpora un mecanismo para evitar que esta se estacione en un valor constante. Esto aporta la persistencia de excitación necesaria para poder estimar el gradiente durante todo el proceso, aún cuando converge al óptimo. Los detalles de este algoritmo se pueden consultar en la publicación [16].

II-B1. Acondicionamiento de dilución: Para evitar que el sistema opere en zonas con FOS/TAC muy elevado, se propone un primer lazo auxiliar que atenúa la acción de control (D) calculada por el control integral discreto en base al valor de FOS/TAC. En el esquema de la Figura 2 el lazo de acondicionamiento de dilución es resaltado en rojo. Se compara el valor actual del FOS/TAC con un valor umbral máximo ($\overline{FOS/TAC}$) para definir el factor de atenuación de la tasa dilución:

$$f\left(\frac{FOS}{TAC}\right) = \begin{cases} 1, & \text{si } \frac{FOS}{TAC} < \overline{FOS/TAC}. \\ 0,5, & \text{si } \frac{FOS}{TAC} > \overline{FOS/TAC}. \end{cases} \quad (7)$$

Como el tiempo de muestreo se toma del orden del día, las variaciones en el flujo de Q_m y FOS/TAC pueden llegar a ser muy grandes al aplicar la acción discontinua. Para amortiguar las correcciones sobre D y evitar oscilaciones, se intercala un filtro. Su ancho de banda debe ser lo suficientemente grande como para que las correcciones de D no sean muy lentas y evitar transitorios donde la producción baje demasiado.

II-B2. Acondicionamiento de referencia: En esta segunda propuesta de lazo auxiliar, se modifica la referencia del controlador en base a la rapidez de cambio del FOS/TAC, ya que se ha observado que en las región de inestabilidad este crece muy rápidamente. En la Figura 2 el lazo de acondicionamiento de referencia es el resaltado en amarillo. La derivada del FOS/TAC (en tiempo discreto) se compara con un valor umbral ($\overline{\Delta FOS/TAC}$). En base a esta diferencia se modifica la referencia de gradiente:

$$\omega_{ref} = \begin{cases} 0, & \text{si } \frac{\Delta FOS/TAC}{\Delta T} < \overline{\Delta FOS/TAC}. \\ k_{ref}, & \text{si } \frac{\Delta FOS/TAC}{\Delta T} > \overline{\Delta FOS/TAC}. \end{cases} \quad (8)$$

La corrección en función de la velocidad de cambio del FOS/TAC se hace buscando que la corrección no sea muy lenta ni duradera, ya que se debe tener en cuenta que su efecto es filtrado por el controlador principal (en este caso un integrador). La elección de la ganancia k_{ref} se realiza en base el mapa mostrado en la Figura 1, donde deben tomarse valores de ganancia compatibles con la pendiente de la curva de Q_m en la región de operación estable.

Notar que, a pesar de que se presentan en el mismo esquema, lo presentado en las secciones II-B1 y II-B2 son dos propuestas distintas y no se utilizan simultáneamente.

II-C. Cálculos, gráficas y simulaciones

Todas las determinaciones numéricas, gráficas y simulaciones se realizaron con software MATLAB y Simulink. Para resolver las ecuaciones diferenciales se utilizó el método ODE45.

Se realizaron simulaciones de tres escenarios distintos: sistema de control sin lazo auxiliar, con lazo de acondicionamiento de dilución D y con lazo de acondicionamiento de referencia ω_{ref} . El modelo utilizado en las simulaciones es el descrito en la Sección II-A, con los valores de parámetros publicados en [15]. Las concentraciones del efluente de entrada se tomaron $s_{1in} = 10 \text{ g L}^{-1}$, $s_{2in} = 100 \text{ mmol L}^{-1}$, $c_{in} = 50 \text{ mmol L}^{-1}$. No se considera retención de microorganismos, por lo que $\alpha = 1$.

A la ganancia del control integral se le asignó un valor $k_i = 1 \times 10^{-4}$. Esto es cuatro veces mayor a una que garantiza una respuesta amortiguada sin incursionar en la región inestable, buscando una mayor velocidad de respuesta. La ganancia del estimador de gradiente se sintonizó en $V_0 = 15$ buscando un compromiso entre el filtrado de picos en el gradiente y la amplitud de la perturbación generada por el estimador en régimen permanente. El tiempo de muestreo es de 1 día.

Para las simulaciones con lazo de acondicionamiento de D se tomó un umbral $\overline{FOS/TAC} = 0,9$, y un filtro IIR con transferencia:

$$F(z) = \frac{0,2}{1 - 0,8z^{-1}} \quad (9)$$

Para el lazo de acondicionamiento de referencia se tomó como umbral $\Delta FOS/TAC = 0,1$ y $k_{ref} = 150$.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las Figuras 3 y 4 muestran los resultados de las simulaciones de un período de aproximadamente 3 meses (días 45 a 130), donde el sistema de control a lazo cerrado se activa en el día 50. La Figura 3 muestra los resultados de las simulaciones para los tres escenarios descritos anteriormente en el plano Q_m/D sobre el mapa estático. La Figura 4 muestra las respuesta temporal del sistema para las mismas simulaciones.

Dada la alta ganancia del control integral (sin lazos auxiliares), la dilución tiene una respuesta excesiva que lleva al sistema a operar dentro de la región inestable. Es interesante notar que, en esta zona, el estimador de gradiente confunde esta zona con la vecindad del óptimo con $\hat{\omega} \cong 0$, ya que el flujo de metano descende monótonamente, mientras la dilución se incrementa y decrementa, lo que da signos alternados en

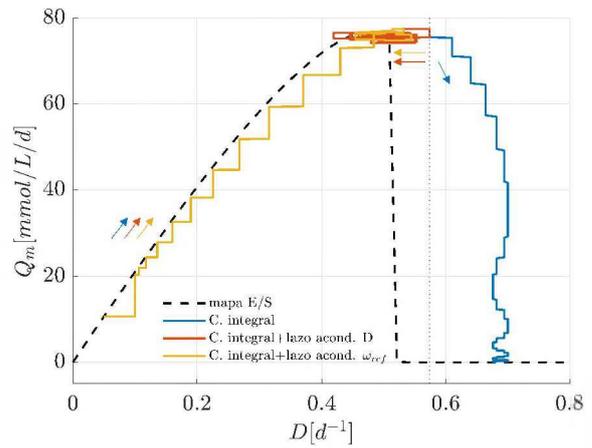


Figura 3. Resultados de simulación: trayectoria del sistema en el plano Flujo de metano vs. Dilución. Se compara la operación con y sin lazo auxiliar de FOS/TAC. La línea de guiones es el plano entrada salida estático del sistema y la línea punteada indica aproximadamente la tasa de dilución a la que se activa el lazo auxiliar (basado en curvas estáticas).

el gradiente estimado. Adicionalmente, se puede notar como el FOS/TAC se incrementa rápidamente a partir de la hora 60, siendo su derivada cada vez mayor.

Mediante la incorporación de los lazos auxiliares se logra estabilizar el sistema y evitar la permanencia en la región inestable. Esto se puede notar en la Figura 3, donde mientras el control integral puro termina operando exclusivamente en la región inestable, los controles con lazos auxiliares solamente entran en esta región en forma transitoria no siendo esto un problema para la estabilidad. Las trayectorias para las tres simulaciones son iguales inicialmente, difiriendo recién al alcanzar los umbrales de activación definidos para cada uno (prácticamente en el mismo tiempo con el ajuste realizado). Desde el punto de vista del flujo de metano las respuestas son muy similares, alcanzándose el óptimo en los dos escenarios con lazo auxiliar. La mayor diferencia está dada en cuanto a la duración de las acciones de los lazos de acondicionamiento. En el caso del acondicionamiento de referencia, el período dura 6 días (días 62 a 68), mientras que para el acondicionamiento de dilución dura 28 días (días 64 a 92), o bien, 39 días teniendo en cuenta el efecto del filtro. Aún así, durante el período que está activo el lazo de acondicionamiento de D , la diferencia en la producción total de metano es menor al 1%.

Aproximadamente a partir de la hora 100, ambos esquemas de control llevan al sistema a operar en un régimen permanente, con los mismos valores de tasa de dilución y FOS/TAC (0,6).

La Figura 5 muestra los resultados de simulación de cada lazo auxiliar con una composición de efluente de entrada al digestor más realista, donde la s_{1in} varía en el tiempo. Sobre los 10 g L^{-1} de las simulaciones anteriores, se toma una variación anual (estacional) dada por una sinusoidal de amplitud 3 g L^{-1} , y variaciones semanales con distribución normal de media nula y desviación unitaria. La variación de la DQO de entrada tiene un gran efecto sobre el mapa estático Q_m/D , haciendo que el valor del flujo óptimo varíe. De la misma manera, la dilución

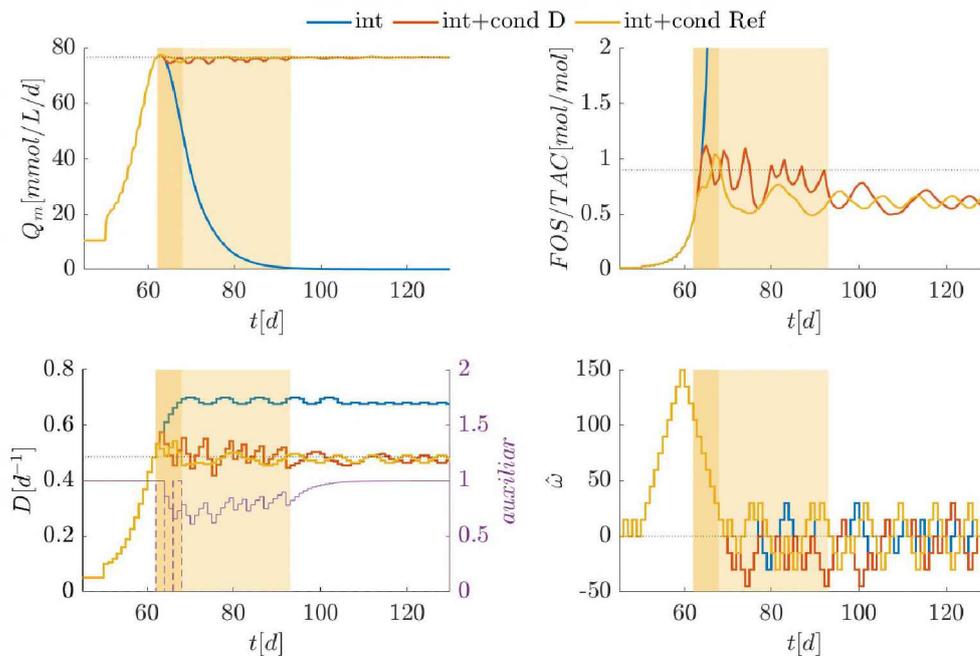


Figura 4. Resultados de simulación: respuestas del sistema comparando la operación sin lazo auxiliar (azul), con un lazo de acondicionamiento de dilución (rojo) y con un lazo de acondicionamiento de referencia (amarillo). Los gráficos superiores muestran el flujo de metano y el FOS/TAC del proceso, los gráficos inferiores las tasas de dilución y el gradiente estimado. Junto a las tasas de dilución, en violeta, se muestran las acciones de los lazos auxiliares. En línea llena el acondicionamiento de dilución, en línea a trazos el de referencia. Las áreas coloreadas indican el período durante el cual cada lazo auxiliar está actuando. Las líneas punteadas indican valores óptimos, excepto para el FOS/TAC que indica el valor umbral para el que se activa el lazo de acondicionamiento de dilución. Las áreas sombreadas indican el período de tiempo aproximado durante el cual actúan los lazos auxiliares, siendo la más oscura la correspondiente al acondicionamiento de referencia y la más clara al acondicionamiento de dilución.

óptima varía aunque en menor grado.

En primer lugar se puede ver un buen seguimiento del flujo óptimo, siendo la diferencia en las producciones menor al 1%. Sobre la máxima productividad posible, el lazo de acondicionamiento de D alcanza un 99,2% de ese valor y el de referencia un 98,5%. En cuanto a la activación de los lazos auxiliares, una vez establecida la operación en el flujo óptimo, se activan esporádicamente por períodos de entre 1 y 3 días.

Las simulaciones muestran el aporte a la estabilidad del control por búsqueda de extremos, permitiendo usar sintonizaciones más agresivas que aceleren la convergencia al punto óptimo. En comparación, el mismo control sin el lazo auxiliar ([14]) resulta inestable. El lazo de acondicionamiento de D tiene como ventaja que no es necesario realizar ningún cálculo de derivada, con los errores que esto podría acarrear, en particular con períodos de muestreo más chicos. Por su parte, se puede destacar del lazo de acondicionamiento de referencia la corta intervención que tiene en el sistema en el transitorio de convergencia al óptimo. Por otra parte, aunque no se cubre en este artículo, se puede mencionar que el análisis del sistema con el lazo de acondicionamiento de referencia es más simple, debido a que se puede encuadrar en una topología de control en cascada. En tanto, con el lazo de acondicionamiento de D se termina obteniendo un controlador equivalente no lineal compuesto por el control integral y el lazo auxiliar, cuyo análisis es más complejo.

Se puede destacar, que las condiciones del proceso ensayadas en este trabajo son exigentes en cuanto a la estabilidad del proceso, por la baja concentración del efluente que entra al digestor y por no considerarse retención celular. Relajando estas condiciones se pueden modificar las propuestas, por ejemplo, utilizando un período de muestreo más largo para los lazos auxiliares, con lo que se evita tener que hacer una titulación diaria para determinar FOS/TAC. Por otra parte, también puede destacarse la baja incidencia del modelo en el controlador y estimador de gradiente, más allá de lo que respecta a la sintonización de ganancias y elección de umbrales.

IV. CONCLUSIONES

Se propusieron y validaron dos algoritmos alternativos de lazos de control auxiliares discretos basados en la realimentación de FOS/TAC para mejorar la estabilidad de controladores por búsqueda de extremos en biodigestores. Uno por acondicionamiento de dilución y otro por acondicionamiento de referencia. Los resultados de simulación muestran que mediante ambas propuestas se puede operar prácticamente todo el tiempo con un flujo de metano máximo. Aún con sintonizaciones agresivas del controlador principal y flujos de alimentación perturbados, el sistema a lazo cerrado se mantiene estable, con respuestas más rápidas comparadas con el sistema sin lazo auxiliar.

El mayor valor de estos resultados radica en que pueden ser aplicados en plantas con instrumentación escasa, incluso operadas manualmente. Se requiere medir únicamente flujo

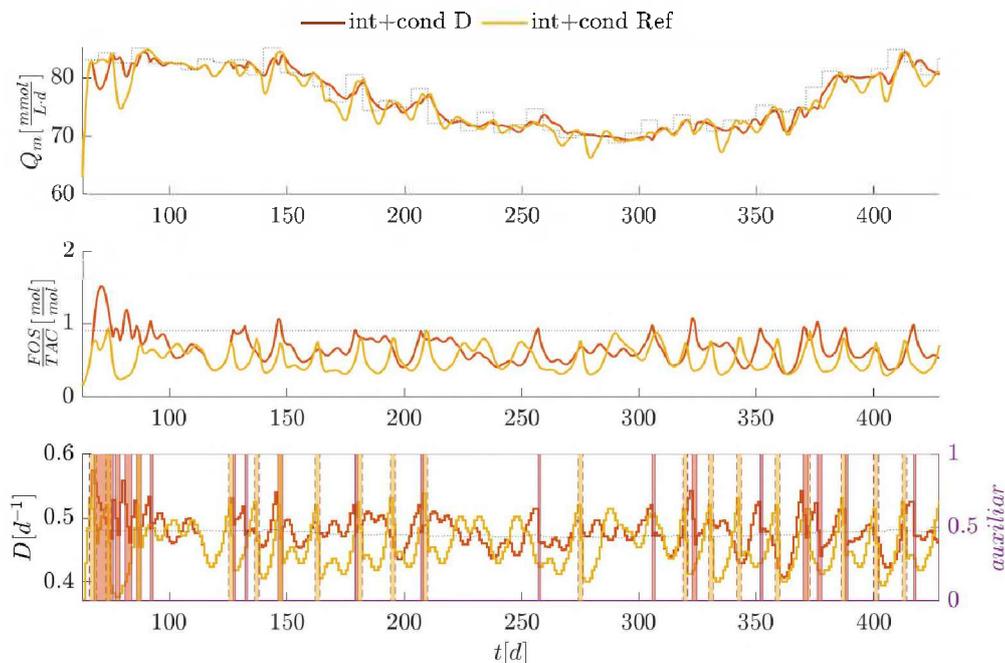


Figura 5. Resultados de simulación: respuestas del sistema con variaciones en la DQO de entrada, comparando la operación del lazo de acondicionamiento de dilución (rojo) con el lazo de acondicionamiento de referencia (amarillo). El gráfico superior muestra el flujo de metano, el del medio el FOS/TAC y el inferior la tasa de dilución. Junto a las tasas de dilución, las áreas coloreadas indican el período durante el cual cada lazo auxiliar está actuando siguiendo el mismo código de color. Las líneas punteadas indican valores óptimos, excepto para el FOS/TAC que indica el valor umbral para el que se activa el lazo de acondicionamiento de dilución.

de metano, y realizar una titulación diaria para determinar FOS/TAC. La acción de control sobre una planta de volumen constante se obtiene operando una bomba con un caudal constante cada día.

A partir de lo obtenido se buscará validar los lazos sobre un modelo *benchmark* como el ADM1 [17], que involucra más reacciones y factores como el pH y la temperatura. Por otra parte, los resultados abren la puerta a explorar mejoras para considerar otros tipos de operación. En particular, la alimentación pulsada compatible con la carga manual de digestores de pequeño volumen o de digestión semisólida.

REFERENCIAS

- [1] A. Coremberg, "Medición de la cadena de valor de la bioeconomía en argentina: hacia una cuenta satélite. informe final," 2019.
- [2] P. Weiland, "Biogas production: current state and perspectives," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 85, no. 4, pp. 849–860, 2010.
- [3] U. Lossie and P. Pütz, "Control orientado de plantas de biogás con la ayuda de fos/tac," *Análisis de Laboratorio valoración FOS/TAC*, pp. 1–4, 2011.
- [4] A. Vargas, A. Sepiúveda-Gálvez, and J. D. Barrios-Pérez, "A fast extremum-seeking approach for the methanisation of organic waste in an anaerobic bioreactor," *IFAC PapersOnLine*, vol. 52, pp. 269–274, 2019.
- [5] M. Sbarciog, G. Giovannini, R. Chamy, and A. V. Wouwer, "Control and estimation of anaerobic digestion processes using hydrogen and volatile fatty acids measurements," *Water Science and Technology*, vol. 78, no. 10, pp. 2027–2035, 2018.
- [6] M. Sbarciog, M. Loccufier, and A. Vande Wouwer, "An optimizing start-up strategy for a bio-methanator," *Bioprocess and Biosystems Engineering*, vol. 35, no. 4, pp. 565–578, 2012.
- [7] G. Lara-Cisneros, R. Aguilar-López, and R. Femat, "On the dynamic optimization of methane production in anaerobic digestion via extremum-seeking control approach," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 75, pp. 49–59, 2015.
- [8] M. Barbu, E. Ceangă, R. Vilanova, S. Caraman, and G. Ifrim, "Extremum-seeking control approach based on the influent variability for anaerobic digestion optimization," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 12 623–12 628, 2017.
- [9] INTI and FAO, "Relevamiento nacional de biodigestores. relevamiento de plantas de biodigestión anaeróbica con aprovechamiento energético térmico y eléctrico." *Colección Documentos Técnicos N° 6.*, 2019.
- [10] G. Casanovas, F. Della, F. Reymundo, and R. Serafini, "Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores." *FAO. Obtenido de http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/GuíaBiodigestores-19-08-29.pdf*, 2019.
- [11] X. Liu, L. André, M. Mercier-Huat, J.-M. Grosmaître, A. Pauss, and T. Ribeiro, "Accurate estimation of bicarbonate and acetic acid concentrations with wider ranges in anaerobic media using classical fos/tac titration method," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 24, p. 11843, 2021.
- [12] M. Lili, G. Biró, E. Sulyok, M. Petis, J. Borbély, J. Tamás *et al.*, "Novel approach on the basis of fos/tac method," *Analele Universităţii din Oradea, Fascicula Protecţia Mediului*, vol. 17, pp. 713–718, 2011.
- [13] H. Sun, J. Guo, S. Wu, F. Liu, and R. Dong, "Development and validation of a simplified titration method for monitoring volatile fatty acids in anaerobic digestion," *Waste Management*, vol. 67, pp. 43–50, 2017.
- [14] M. Jamillis, T. Castañeda, and H. De Battista, "Optimización en línea de la producción de metano en biodigestores con instrumentación escasa," in *XIX Reunión de trabajo de procesamiento de la información y control*, 2021.
- [15] O. Bernard, Z. Hadj-Sadok, D. Dochain, A. Genovesi, and J.-P. Steyer, "Dynamical model development and parameter identification for an anaerobic wastewater treatment process," *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 75, no. 4, pp. 424–438, 2001.
- [16] L. Fu and U. Özgüner, "Extremum seeking with sliding mode gradient estimation and asymptotic regulation for a class of nonlinear systems," *Automatica*, vol. 47, no. 12, pp. 2595–2603, 2011.
- [17] D. J. Batstone, J. Keller, I. Angelidaki, S. Kalyuzhnyi, S. Pavlostathis,

A. Rozzi *et al.*, "The IWA anaerobic digestion model no 1 (ADM1)," *Water Science and technology*, vol. 45, no. 10, pp. 65-73, 2002.