

# Optimización dinámica y control en tiempo finito de un reactor anaerobio lote secuencial (AnSBR) para el tratamiento de vinazas tequileras

Hilario Flores-Mejía\*, Héctor Puebla\*, Hugo O. Méndez-Acosta\*\*, Norma E. Jaramillo-Gante\*\*, Mauricio Orozco\*\*\*

\*Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, \*\*Departamento de Ing. Química, CUCEI-Universidad de Guadalajara, \*\*\*Instituto Mexicano del Petróleo.  
Teléfono: (55)-53-189000

**Resumen** - En este trabajo se presenta un estudio preliminar de la optimización dinámica y control en tiempo finito de un digestor anaerobio de lote secuencial (AnSBR) para el tratamiento de vinazas tequileras. El estudio consiste en el montaje experimental de un AnSBR con configuración UASB, la identificación de un modelo simple y su estimación de parámetros, la optimización dinámica y el diseño de un esquema de control a fin de maximizar la degradación de materia orgánica en un tiempo finito. La optimización dinámica del modelo se llevó a cabo mediante el uso de técnicas de programación no lineal, mientras que por medio de la técnica de control de modo deslizante de alto orden (HOSM), se presenta el diseño de un esquema de control que garantiza el seguimiento de la trayectoria óptima.

**Palabras clave:** reactor AnSBR, vinazas tequileras, optimización dinámica, control en tiempo finito.

## I. INTRODUCCION

La industria tequilera es de gran importancia económica para México y principalmente para el estado de Jalisco, donde se localizan la mayoría de empresas certificadas por la fabricación del tequila. En 2008 el consejo regulador del tequila (CTR, 2008) tenía reportadas 146 destilerías de tequila entre grandes, medianas, pequeñas y microempresas. Este sector ha presentado un aumento considerable en su producción en los últimos años. Por ejemplo, de 2003 a 2008 se tuvo un incremento en la producción anual de tequila alcanzando los 120 millones de litros. Lamentablemente, la creciente producción de tequila trae consigo el aumento de desechos como las vinazas y el bagazo. De acuerdo a Cedeño (1995) se generan de 7 a 10 litros de vinazas y cerca de 1200 g de bagazo por litro de tequila producido.

Las vinazas son las aguas residuales producto de la destilación del tequila, las cuales tienen un alto contenido de materia orgánica, con una demanda química de oxígeno (DQO) superior a 38215 mg/L, sólidos totales (ST) superiores a 21883 mg/L, y poseen pH bajo de 3.5-3.9 (Iñiguez y Peraza, 2007). Se descargan a una temperatura cercana a los 90°C, lo que

las convierte en un contaminante térmico. Su color probablemente se deba al pigmento café oscuro de las melanoidinas.

El alto contenido de materia orgánica y el color reducen la penetración de luz en ríos, lagos y lagunas, haciendo que disminuya la actividad fotosintética de los organismos acuáticos; esto disminuye la concentración de oxígeno disuelto, lo que causa un deterioro de los ecosistemas presentes en los cuerpos receptores. Por otro lado, utilizar los suelos para la disposición final de las vinazas tequileras sin tratamiento alguno puede favorecer la presencia de organismos patógenos para algunos cultivos, así como el deterioro irreversible del suelo (Amador, 2002).

Actualmente las autoridades ambientales intentan frenar el impacto ambiental de la industria tequilera y obligan a los responsables a que tomen medidas para disminuir la contaminación de los cuerpos de agua y el medio ambiente. La ley establece (SEMARNAT 1996) que para descargar aguas residuales en un cuerpo de agua, estas no deben de contener más de 150 mg/L de DBO, 150 mg/L de sólidos suspendidos totales (SST) y 1 mL/L de sólidos sedimentables (SS), valores que las vinazas tequileras rebasan por mucho.

Estudios recientes han reportado que la digestión anaerobia (DA) es un proceso promisorio para el tratamiento de esta clase de efluentes (Méndez-Acosta *et al.*, 2010; Jáuregui-Jáuregui *et al.*, 2010; López-López *et al.*, 2010; Fregoso-Sánchez *et al.*, 2006). Sin embargo, la falta de conocimiento del proceso, aspectos económicos y financieros han dificultado la aplicación de unidades de tratamiento apropiadas en las fabricas de tequila para la biodegradación de sus vinazas (López-López *et al.*, 2010). Por lo anterior, resulta importante evaluar y mejorar el desempeño de sistemas de tratamiento de bajo costo, que impliquen un menor mantenimiento y una atención mínima por parte del operador, siendo estas las principales características de un reactor anaerobio de lote secuencial (AnSBR, por sus siglas en inglés). En efecto, el AnSBR presenta potenciales ventajas sobre

otros tipos de reactores anaerobios, destacándose la flexibilidad de operación, así como que las etapas de reacción y sedimentación ocurren en una misma unidad (Donoso-Bravo *et al.*, 2009).

Los procesos de tratamiento de aguas residuales industriales deben de satisfacer requerimientos ambientales cada vez más exigentes, por lo que se vuelve imperativa la necesidad de contar con esquemas de control adecuados que garanticen su funcionamiento (Bastin y Dochain, 1990). La operación tradicional de los AnSBR se puede mejorar por medio de la aplicación de técnicas de optimización y control de procesos. Por medio de las técnicas de optimización, se determinan las condiciones de operación óptimas, las cuales se proporcionan como referencia a un esquema de control con la finalidad de asegurar el desempeño del proceso a pesar de la presencia de diferentes perturbaciones que pueden afectar la operación del mismo.

En este trabajo se presenta la optimización dinámica y el control en tiempo finito de un modelo simple no estructurado de un AnSBR semi-lote en la etapa de reacción. A través de un modelo reducido, se realiza el ajuste de parámetros de la expresión cinética por medio de regresión no lineal. El problema de optimización se aborda a través de técnicas de programación no lineal. Para resolver el problema de control en tiempo finito, se utiliza la técnica de control de modo deslizante de alto orden (Levant, 2001). La característica clave de esta clase de control, es que se obtiene un diseño de control práctico, simple, con buenas capacidades de robustez y desempeño, mientras que se asegura una convergencia en tiempo finito.

## II. METODOLOGIA

La metodología consiste en el montaje experimental del AnSBR para la obtención de datos experimentales, la identificación de un modelo simple no estructurado y la estimación de parámetros, la formulación y solución de un problema de optimización dinámica, y el diseño del esquema de control de modo deslizante de alto orden para el control de la trayectoria óptima.

### Descripción del AnSBR.

La digestión anaerobia de la materia orgánica contenida en las vinazas tequileras se realiza en un reactor AnSBR con configuración UASB y cuyo volumen de operación es de 5.1 litros. El reactor consiste en dos tubos concéntricos de PVC de tal forma que el volumen externo permite contar con un enchaquetado, mientras que el interno conforma el volumen del reactor. El reactor cuenta además con piezas cónicas en la parte superior e inferior para facilitar la separación y la sedimentación de la

biomasa. Un contenedor en la parte superior del reactor sirve para almacenar el biogás generado por el proceso para su posterior análisis (ver Figura 1). El proceso esta instrumentado y automatizado mediante una interfaz grafica empleando el software LabView.

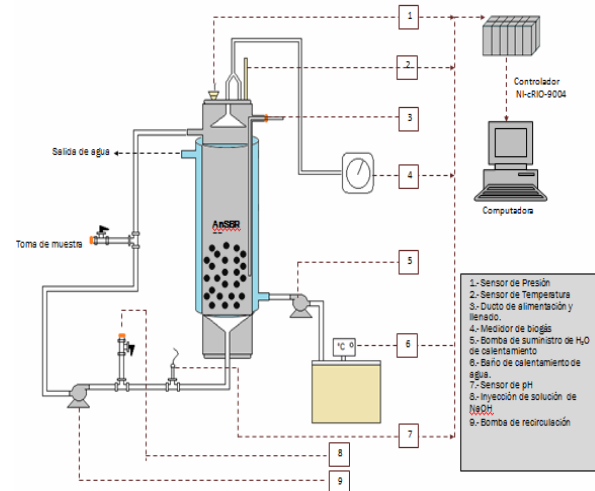


Figura 1 Diseño del reactor biológico lote secuencial anaerobio.

### Identificación del modelo y estimación de parámetros.

Para fines de optimización y control es importante considerar modelos simples que retengan las características dominantes del proceso. Los modelos de reactores biológicos más simples son los modelos no estructurados de dos estados, la biomasa y el substrato. La ventaja de esta clase de modelos es que no se requiere mucha información experimental para su validación. Por otro lado, la desventaja principal es que se desprecian el efecto de compuestos inhibitorios en el caudal de alimentación y en el consorcio de microorganismos (Bastin y Dochain, 1990).

En este trabajo se ha considerado un modelo simple de dos estados de un reactor biológico operado en lote para la estimación de los parámetros del modelo. Así, el siguiente conjunto de ecuaciones diferenciales describen la dinámica de los dos estados del AnSBR,

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \mu(s)x \\ \frac{ds}{dt} &= -\frac{\mu(s)}{Y}x \end{aligned} \quad (1)$$

donde  $x$  (gx/l) es la biomasa,  $s$  (gs/l) es el substrato,  $\mu(s)$  ( $h^{-1}$ ) es la cinética de crecimiento microbiano,  $Y$  (gx/gs) es el coeficiente de rendimiento.

En procesos biológicos es fundamental la caracterización del crecimiento microbiano, debido a que de eso dependerá la cinética de los demás estados o especies involucradas, así como de los parámetros de las ecuaciones correspondientes (Bastin y Dochain,

1990). En este trabajo se considera la expresión de crecimiento más utilizada para describir a degradación de materia orgánica en digestores anaerobios, la ecuación de Monod, la cual está dada por,

$$\mu(s) = \frac{\mu_{\max} s}{K_s + s} \quad (2)$$

Para llevar a cabo el ajuste de parámetros cinéticos de la ecuación de Monod, se tomó como referencia los datos reportados por Bernard *et al.* (2001) para vinazas vinícolas, los cuales son  $\mu_{\max}=0.74$  (s.d. = 0.9),  $K_s=9.28$  (s.d. = 13.7),  $Y=1/42$  (s.d. = 1/20). La estimación de parámetros se formula como un problema de mínimos cuadrados no lineal por medio del programa *simfit* (Bardsley, 1993).

#### Optimización dinámica.

La formulación del modelo de optimización comúnmente consiste en la minimización de algún contaminante sujeto a las ecuaciones dinámicas del modelo y restricciones posibles que deben cumplir las variables del AnSBR. Así, desde el punto de vista de optimización de un AnSBR, surge un problema de optimización dinámica con una estructura de modelo de optimización de programación no lineal (Biegler y Grossman, 2004).

Para SBR aerobios, en la literatura se han considerado como variables de optimización y control los tiempos de activación y desactivación de las diferentes etapas del proceso, así como el flujo y la concentración de alimentación de sustrato en los casos semi-lote (Betancur *et al.*, 2006; Moreno y Buitrón, 1998).

Para la optimización y control del proceso de tratamiento de vinazas tequileras, en este trabajo se considera la versión semi-lote del modelo del AnSBR que se presentó y ajustó en la sección anterior. La finalidad de considerar la operación semi-lote es contar con políticas de operación del AnSBR prácticas, simples y fácilmente implementables en la práctica a través de la manipulación de una sola variable, el flujo de alimentación al AnSBR.

Las ecuaciones que describen el AnSBR semi-lote son,

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \mu(s)x \\ \frac{ds}{dt} &= -\frac{1}{Y}\mu(s)x + \frac{Q_f}{V}s_f \\ \frac{dv}{dt} &= Q_f \end{aligned} \quad (3)$$

donde  $Q_f$  (l/h) es la velocidad de flujo de alimentación de la bomba y  $s_f$  (gs/l) es la concentración de flujo de alimentación.

Considerando las normas ambientales para descargas de aguas tratadas a cuerpos de agua (e.g. NOM-003-SEMARNAT-1996), el problema de optimización dinámica consiste la minimización de concentración de sustrato (el contaminante) en un tiempo finito (10 días) por ajuste del flujo de alimentación,  $u=Q_f$ ,

$$\min_{t_f, u(t)} J = s(t_f) \quad (4)$$

Sujeto a las ecuaciones dinámicas del modelo,

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \mu(s)x \\ \frac{ds}{dt} &= -\frac{1}{Y}\mu(s)x + \frac{u}{V}s_f \\ \frac{dv}{dt} &= u \end{aligned} \quad (5)$$

Con restricciones en la variable  $u$

$$u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max} \quad (6)$$

Así como en el volumen final del AnSBR,

$$v(t_f) \leq 5.1 \quad (7)$$

Los valores de  $u_{\min}$  y  $u_{\max}$  se establecen como [0, 1] con un valor inicial de 0.5 l/d. Los cuales corresponden a valores física y operacionalmente viables; es decir, un flujo mínimo de 0 y un máximo de 1, asociados a que el valor mínimo de flujo que se puede implementar no es menor a cero y que un flujo mayor a 1 generaría una saturación del volumen máximo del reactor en un periodo de tiempo muy corto. La restricción (7) considera que el reactor experimental tiene un volumen máximo de 5.1 L.

El modelo de optimización que resulta tienen una estructura lineal en la función objetivo y no-lineal en general debido a las ecuaciones no-lineales del modelo del AnSBR y a las restricciones lineales de desigualdad en la variable de ajuste. Esta clase de modelos se pueden resolver a través de técnicas de programación no-lineal o métodos heurísticos. En este caso se ha utilizado el programa de acceso libre DOTcvpSB que funciona en el ambiente de Matlab® y que se describe con detalle en Hirmajer *et al.* (2009).

#### Control robusto en tiempo finito.

Por las características de operación del AnSBR semi-lote y la solución del problema de optimización dinámica, los estados del sistema deben de seguir una trayectoria de concentración que asegure que, al final del tratamiento, el agua residual tratada cumple con las normas ambientales. Sin embargo, los cambios en las condiciones de operación del reactor y posiblemente las variaciones en la composición del influente, pueden tener como consecuencia una concentración de contaminantes fuera de norma. Así, la operación

eficiente del AnSBR se logrará al forzar que los estados del sistema sigan la trayectoria deseada a través de esquemas de control en tiempo finito.

El problema de control se puede establecer como el seguimiento del perfil óptimo de concentración de sustrato por medio de la manipulación de la variable de ajuste  $u$  (dad por el flujo de alimentación).

El problema de control se complementa con las siguientes consideraciones:

**A1:** La entrada de control está sujeta restricciones, *i.e.*

$$u_{min} \leq u \leq u_{max}.$$

**A2:** El modelo (5) está afectado por dinámica no modelada  $\psi(y,z)$  y perturbaciones externas  $\phi(t)$ .

**A3:** La variable a controlar dada por la concentración de sustrato está disponible para fines de control,  $y = s$ .

Los diseños de control de modo deslizante consisten en dos fases, una continua y una discontinua, que se diseñan en forma independiente. En la primera fase, o fase continua, se diseña una superficie donde los estados controlados convergen a la referencia deseada. En la segunda fase, o fase discontinua, los estados son forzados a alcanzar la superficie deslizante. La superficie deslizante se diseña con base al comportamiento deseado a lazo cerrado, y la superficie de acercamiento se puede diseñar con elementos de interrupciones adecuadas, tales como la función signo (Hangos *et al.*, 2004).

Si se define,

$$\sigma(e) = e = y - y_{ref} \quad (8)$$

como la superficie deslizante, la parte continua del controlador de modo deslizante está dada por,

$$u_{eq} = -\frac{v}{s_f} \left( \frac{1}{Y} \mu(s)x + \psi(y,z) + \phi(t) + \frac{dy_{ref}}{dt} \right) \quad (9)$$

Una vez en la superficie deslizante, la respuesta dinámica del sistema está gobernado por  $de/dt=0$ .

Para forzar a los estados controlados del sistema a converger a la superficie deslizante en presencia de incertidumbre y perturbaciones, con una minimización de fluctuaciones y una convergencia en tiempo finito, la fase discontinua se propone como (Levant, 2001; Aguilar-López *et al.*, 2010),

$$u_{dis} = -\frac{v}{s_f} [\delta_1 e + \delta_2 \int_0^t \text{sign}(e) |e|^{1/p} d\tau] \quad (10)$$

donde  $\delta_1$  y  $\delta_2$  son parámetros de diseño del controlador. La forma final del controlados está dada por,

$$u = u_{eq} + u_{dis} \quad (11)$$

Para su implementación, la ley de control requiere del conocimiento preciso de la cinética de Monod,  $\varphi(y,z)$ ,  $\psi(t)$  y  $dy_{ref}/dt$ . Para aumentar el desempeño robusto de la ley de control (11), los términos inciertos se pueden agrupar en un solo término incierto que se

puede estimar con un observador de estados y compensar con la ley de control (11). Sin embargo, al explotar las propiedades de robustez del control de modo deslizante, el conocimiento de los términos anteriores se puede evitar.

En resumen, el control de modo deslizante de alto orden considera una potencia fraccional del valor absoluto del error de regulación, acoplado con una función signo, lo cual permite mejorar las propiedades de robustez del control de modo deslizante clásico, además de que se logra una mejor regulación y se evitan las fluctuaciones (Levant, 2001).

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En esta sección se presentan los resultados de la caracterización experimental, la estimación de parámetros, la optimización dinámica y el control en tiempo finito.

#### Caracterización experimental

Los ensayos experimentales de eliminación de materia orgánica se realizaron en el AnSBR descrito en la Figura 1. La caracterización experimental incluye el monitoreo en línea de variables como pH, temperatura, presión y producción de biogás. Mientras que fuera de línea se determinan otras variables clave del proceso como la alcalinidad, la demanda química de oxígeno (DQO), la composición de biogás, los ácidos grasos volátiles, el carbono orgánico total, y los sólidos suspendidos volátiles y totales.

Tabla 1. Monitoreo de DQO.

Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3		Corrida 4	
Tiempo (d)	DQO (g/L)	Tiempo (d)	DQO (g/L)	Tiempo (d)	DQO (g/L)	Tiempo (d)	DQO (g/L)
0	7.734	0	8.004	0	7.7725	0	8.211
1	6.680	1	4.135	1	4.1850	1	4.220
2	5.343	2	2.397	2	2.6545	2	2.375
3	2.230	3		3	2.1590	3	1.725
4		4	0.877	4		4	
5		5		5		5	
6	2.006	6	0.812	6	0.715	6	1.205
7		7		7		7	
8		8	0.774	8		8	
9	1.150	9		9	0.695	9	0.838
10		10		10		10	

La Tabla 1 presenta los datos experimentales de la concentración de DQO que se obtuvo en 4 corridas en el reactor AnSBR utilizando un pH y una temperatura de 7.5 y 35 °C, respectivamente. En el modelo (5), la

DQO representa el sustrato total que se consume en el AnSBR.

### Estimación de parámetros y simulación

Los resultados de la estimación de parámetros por medio del programa *simfit* son los siguientes:  $\mu_{max}=0.2$ ,  $K_s=5.0$ ,  $Y=1/60$ . A fin de ilustrar el comportamiento dinámico de la biomasa y la concentración de materia orgánica (sustrato) en el reactor, se toman los parámetros de ajuste y los datos experimentales con las condiciones iniciales  $x(0)=0.5$ ,  $s(0)=8.0$  y  $v(0)=1.5$ .

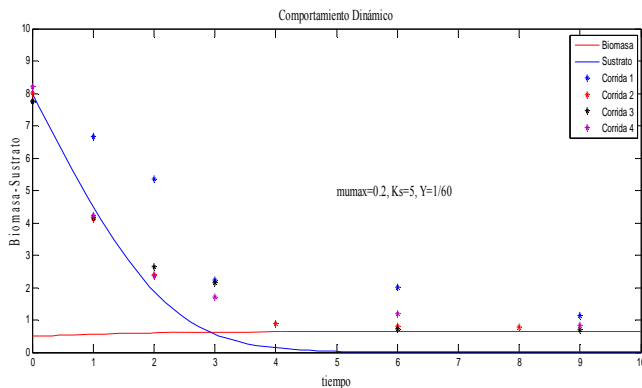


Figura 2. Comportamiento dinámico de los estados del modelo AnSBR.

La Figura 2 muestra las simulaciones numéricas. Se puede observar en la dinámica de la concentración de sustrato que con el modelo propuesto a partir de 4 días se tiende a tener cierta discrepancia con los datos experimentales. Se espera que al contar con más datos experimentales de sustrato y otra variable que este directamente relacionada a la biomasa se podría mejorar la estimación de parámetros cinéticos y obtener un mejor ajuste. Por otro lado, se puede observar que la dinámica de concentración de la biomasa aumenta un poco y después se mantiene en un valor constante, lo cual se espera que pase con los microorganismos del montaje experimental. Así, se puede concluir que el modelo simple no estructurado del AnSBR es una representación adecuada para fines de un estudio preliminar de optimización y control como el que se presenta en este trabajo.

### Optimización dinámica.

La Figura 3 presenta los perfiles óptimos de las variables del AnSBR y el perfil de la variable  $u$ . Con base al perfil óptimo de sustrato se puede establecer que el sustrato alcanza un valor mínimo de 0.0003 en un tiempo de alrededor de 8.4 días. La variable de ajuste  $u$  fluctúa entre 0.5 y 0.6 en los primeros 6 días para después alcanzar el límite inferior de 0.

Con base a los resultados de la optimización dinámica, se realiza un ajuste del perfil de sustrato óptimo con un polinomio de grado 4 hasta el tiempo de

8.4 hrs. y después un ajuste lineal hasta el tiempo lote final. Así, el perfil óptimo esta dado por:

$$s = -0.0036t^4 + 0.069t^3 - 0.29t^2 - 1.3t + 8.2 \quad t \leq 8.4$$

$$s = 0.003 \quad t > 8.4$$

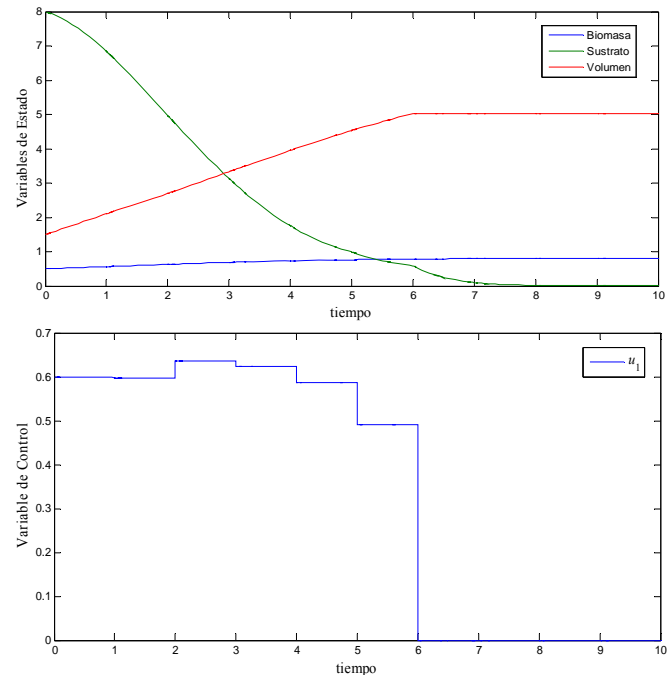


Figura 3. Comportamiento óptimo de estados del modelo y variable  $u$ .

### Control en tiempo finito.

Las Figuras 4 y 5 muestran los resultados de la implementación del esquema de control de modo deslizante de alto orden que se derivó en la sección anterior. Los parámetros del controlador de modo deslizante de alto orden utilizados en la simulación fueron  $\delta_1 = 40$ ,  $\delta_2 = 0.01$  y  $p=0.5$ .

Las Figuras 4 y 5 muestran los perfiles de las variables del AnSBR con  $u = Q_f$ . Se puede observar que el control es capaz de hacer el seguimiento de la trayectoria de sustrato óptima. La entrada de control se mantiene en la zona de saturación de  $[0-1]$ , mientras que el volumen alcanzado en el reactor está por debajo del volumen máximo del AnSBR.

Se puede observar de las Figuras anteriores que el control de modo deslizante presenta un desempeño adecuado y una velocidad de respuesta inmediata para el seguimiento de la concentración de sustrato. El esfuerzo de control es mínimo y no se presentan efectos de fluctuaciones.

Al comparar los resultados de la optimización dinámica y el control de modo deslizante se puede observar que la variable manipulada sigue una trayectoria similar en ambos casos, incluyendo la saturación inferior en un tiempo de 6 días. El control

del modo deslizante presenta la dificultad del sintonizado de sus parámetros, sin embargo, una vez controlado el proceso se asegura la robustez y respuesta rápida del sistema a lazo cerrado.

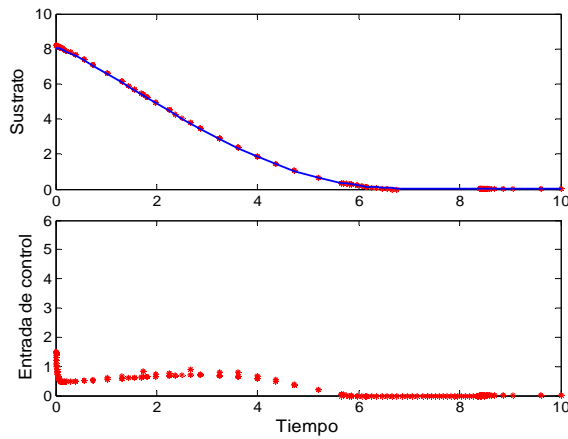


Figura 4: Seguimiento de la concentración de sustrato con  $Q_f=u$ .

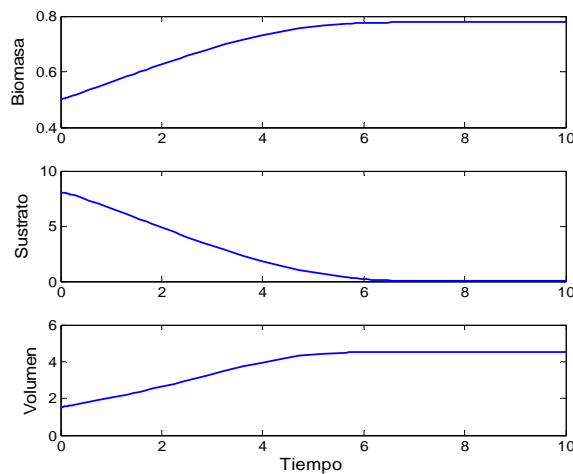


Figura 5: Estados controlados del AnSBR.

#### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado la optimización dinámica y el control en tiempo finito de un AnSBR para tratamiento de vinazas tequileras. Simulaciones numéricas muestran que el modelo identificado reproduce la tendencia experimental del proceso y que el esquema de control propuesto es capaz de hacer el seguimiento de la trayectoria óptima en forma rápida y con un esfuerzo de control moderado. Resultados experimentales de la optimización dinámica y el control serán reportados en futuras contribuciones.

#### V. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue financiado parcialmente para la adquisición de datos experimentales por los proyectos 25972/CONACyT-CB/J50282-Y y 116655/CONACyT-FORDECyT.

#### REFERENCIAS

- Aguilar-López, R., Martínez-Guerra, R., Puebla, H., Hernández-Suarez, R. (2010). High order sliding-mode dynamic control for chaotic intracellular calcium oscillations, *Nonlinear Analysis-B: Real World Appl.* **11**, 217-231.
- Alvarez-Ramirez, J. (1999). Adaptive control of feedback linearizable systems: a modelling error compensation approach, *Int. J. Robust Nonlinear Cont.* **9**, 361.
- Amador, M. (2002). Efecto de vinazas en agave tequilero en la nutrición y su relación con problemas fitosanitarios. Tesis de licenciatura. Departamento de fitotecnia. Universidad autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México, México.
- Baltes, M., Schneider, R., Sturm, C., Reuss, M. (1994). Optimal experimental design for parameter estimation in unstructured growth models. *Biotech. Progress* **10**, 480.
- Bardsley, W.G. (1993). Simfit: a package for simulation, curve fitting, statistical analysis, and graph plotting. <http://www.simfit.manchester.ac.uk>.
- Bastin, G., Dochain, D. (1990). *On line estimation and adaptive control of bioreactors*. Elsevier, New York.
- Betancur, M., Moreno, J., Moreno-Andrade, I., Buitrón, G. (2006). Practical optimal control of fed-batch bioreactors for the wastewater treatment. *Int. J. Robust Nonlinear Cont.* **16**, 173.
- Biegler, L. T., Grossmann, I. E. (2004). Retrospective on optimization. *Comp. Chem. Eng.* **28**, pp. 1169-1192.
- Bernard, O., Hadj-Sadok, Z., Dochain, D., Genovesi, A., Steyer, J.P. (2001). Dynamical model development and parameter identification for an anaerobic wastewater treatment process. *Biotech. Bioeng.* **75**, 424.
- Cedeño, C. M. (1995). Tequila production. *Crit. Rev. Biotechnol.* **15**, 1-11.
- CRT (2008). Consejo regulador del tequila. <http://www.crt.org.mx>.
- Dochain, D., Vanrolleghem, P. (1997). *Dynamical modelling and estimation in wastewater treatment processes*. IWA Publishing, London, UK.
- Donoso-Bravo, A., Carballa, M., Ruiz-Filippi, G., Chamv, R. (2009). Treatment of slow strength sewage high suspended organic matter content in an anaerobic sequencing batch reactor and modeling application. *Elect. J. Biotech.* **10.2225/vol12-issue3-fulltext-15**.
- Fregoso-Sánchez F., Alcaraz-González V., González-Álvarez V. (2006). Adjustable asymptotic observers in batch and continuous bioreactors for anaerobic digestion. *The second international meeting on environmental biotechnology and engineering (2IMEBE)*, México DF, México.
- Hangos, K.M., Bokor, J., Szederkényi, G. (2004). *Analysis and Control of Nonlinear Process Systems*, Springer-Verlag, London.
- Hirmajer, T., Balsa-Canto, E., Banga, J.R. (2009). DOTcvpSB, a software toolbox for dynamic optimization in systems biology. *BMC Bioinformatics* **10**, 199.
- Iñiguez, G., Peraza, F. (2007). Reduction of solids and organic load concentrations in tequila vinasses using a polyacrylamide (PAM) polymer flocculant. *Rev. Int. Contam. Ambient.* **23**, 17-24.
- Jáuregui-Jáuregui, J. A., Méndez-Acosta, H. O., Snell-Castro, R., Alcaraz-González, V., González-Álvarez, V. (2010). Anaerobic treatment of Tequila vinasses in an up-flow fixed-bed reactor: start-up, operation and restart-up. *Memorias del 12th World Congress on Anaerobic Digestion-IWA*, Guadalajara-Jal., México.
- Levant, A. (2001). Universal single-input-single-output (SISO) sliding-mode controllers with finite-time convergence. *IEEE Tran. Automatic Cont.* **46**, 1447.
- López-López, A., Dávila-Vázquez, G., León-Becerril, E., Villegas-García, E., Gallardo-Valdez, J. (2010). Tequila vinasses: generation and full scale treatment processes. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* (on-line published).
- Méndez-Acosta, H. O., Snell-Castro, R., Alcaraz-González, V., Pelayo-Ortiz, C., González-Álvarez, V. (2010). Anaerobic treatment of Tequila vinasses in a CSTR-type digester, *Biodegradation* **21**, 357-363.
- Moreno, J., Buitrón G. (1998). Respirometry based optimal control of an aerobic bioreactor for the industrial wastewater treatment. *Water Quality International 1998*, Vancouver, Canada.