

# CONTROL ÓPTIMO DE BIORRECTORES AEROBIOS PARA EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES INHIBITORIAS

*Germán Buitrón<sup>1\*</sup>, Jaime A. Moreno<sup>2</sup>, Iván Moreno-Andrade<sup>1</sup>, Manuel J. Betancur<sup>2</sup> y Alejandro Vargas<sup>1</sup>*

Coordinaciones de Bioprocesos Ambientales<sup>1</sup> y Automatización<sup>2</sup>, Instituto de Ingeniería, UNAM. Ciudad Universitaria, 04510 México D.F., México.

\* Email: [gbm@pumas.iingen.unam.mx](mailto:gbm@pumas.iingen.unam.mx)

## RESUMEN

El presente trabajo presenta los resultados del uso de una nueva estrategia del control para optimizar la tasa de degradación de compuestos tóxicos presentes en las aguas residuales industriales. La estrategia de control de tiempo óptimo por eventos dirigidos (ED-TOC) fue aplicada para biodegradar un agua residual sintética conteniendo 4-clorofenol (4CF) como compuesto inhibitorio modelo. Se utilizó un reactor discontinuo secuencial (SBR). La estrategia ED-TOC fue desarrollada para alimentar el reactor de manera que la tasa de degradación sea la máxima y así evitar la inhibición de los microorganismos. Lo anterior se logra al estimar la velocidad de consumo másico de oxígeno, relacionada con la tasa de la degradación del sustrato. Se encontró que es posible la implementación práctica de la estrategia ED-TOC a nivel piloto de laboratorio y actualmente se encuentra en prueba a nivel prototipo industrial. El reactor presentó un buen funcionamiento ya que la mineralización del 4CF fue terminada eficientemente. Las eficiencias medias de remoción fueron del 99% como demanda química de oxígeno, y 100% como 4CF. Los sólidos suspendidos totales en el efluente se mantuvieron debajo de 14 mg/L, el índice volumétrico de lodos alrededor de 38 mL/g, y de la velocidad de sedimentación de 6 m/h, esto último indica que el lodo tuvo una excelente sedimentabilidad. La estrategia de ED-TOC puede manejar incrementos en la concentración de compuestos tóxicos en el influente de hasta 11200 mg4CF/L sin ningún problema. Fue demostrado que no sólo concentraciones más altas de tóxico se podrían tratar con la estrategia de ED-TOC, sino que también se obtuvo una reducción en tiempo de degradación (alrededor de 52%).

## ABSTRACT

This work presents the results of the application of an optimally controlled influent flow rate strategy to biodegrade, in a discontinuous reactor, high concentrations inhibitory compounds present in industrial wastewaters. The Event-Driven Time Optimal Control strategy (ED-TOC) was applied to biodegrade 4-chlorophenol (4CP) as toxic compound model. The influent is fed into the reactor in such a way as to obtain the maximal degradation rate, thus avoiding the inhibition of the microorganisms. This was obtained estimating the oxygen mass uptake rate which is directly related to the substrate uptake rate. It was possible to implement the ED-TOC strategy in a lab-scale pilot reactor and now the ED-TOC strategy is in operation at an industrial prototype-scale reactor. Removal efficiencies were 100% as 4CP and 99% as COD. The total suspended solids in effluent were lower than 14 mg/L, the volumetric sludge index was 38 mL/g and the settling velocity of the sludge was 6m/h, indicating the excellent proprieties of the sludge obtained with this control strategy. The optimal strategy was able to manage increments of toxic concentrations in the influent up to 11200 mg 4CP/L without any problem. It was shown that not only higher concentrations of toxic could be treated, but also that a reduction in degradation time (around 52%) and in the supplied air volume was obtained

# INTRODUCCIÓN

Los procesos de tratamiento de aguas residuales industriales deben satisfacer, por un lado, los requerimientos cada vez mayores de las leyes ecológicas y, por otra parte, es necesario minimizar los costos de construcción y operación, que cada vez juegan un papel más importante en la economía de la industria. Para poder satisfacer estos requerimientos son necesarios, además de procesos de tratamiento eficaces, estrategias de control adecuadas. En México, se generan alrededor de 40 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales de tipo industrial que contienen compuestos tóxicos. El tratamiento de las aguas industriales residuales que contienen compuestos orgánicos tóxicos, tales como las producidas en las industrias química y petroquímica; textil; resinas sintéticas; fibras artificiales y sintéticas; hules; adhesivos; agroquímicos; pigmentos y colorantes; farmacéutica; plásticos y polímeros; papel y celulosa; siderúrgica; eléctrica y electrónica, es difícil de realizar por métodos biológicos. Muy pocas instalaciones de tratamiento de este tipo de aguas operan satisfactoriamente. Los mayores problemas se presentan debido a la variabilidad del agua residual, tanto en su composición como en su flujo (muchas operaciones en las plantas manufactureras ocurren en forma transitoria: lavado de los tanques, cambio del producto manufacturado, etc.), y debido al hecho de que tales sustancias son inhibitorias de la actividad de los microorganismos (Englande *et al.*, 2005). Es innegable que para un país como México es necesario proponer opciones tecnológicas para el tratamiento adecuado de aguas residuales inhibitorias, tanto para la protección del medio ambiente como para un posible reúso. En este sentido cabe remarcar que la mayoría de la producción industrial donde se generan aguas inhibitorias se localiza en zonas con severos problemas de escasez de agua o de una alta contaminación del entorno que afecta a la salud de la población debido a que este tipo de efluentes no solo contribuye con materia orgánica, sino con compuestos que presentan toxicidad y cuyos efectos no son percibidos a corto plazo.

Recientemente, las estrategias innovadoras como los procesos discontinuos se han explorado para aumentar las eficiencias del degradable de las aguas residuales (Buitrón *et al.*, 2001). El término SBR (reactor discontinuo secuencial por sus siglas en inglés) se ha utilizado como sinónimo de la tecnología del tratamiento de aguas residuales donde el volumen del tanque del reactor es variable en el tiempo (Wilderer *et al.*, 2001), estos reactores puede trabajar con la biomasa suspendida, fija o combinada en un lecho móvil. Los sistemas de tipo SBR funcionan generalmente bajo cinco fases bien definidas: el llenado, reacción, sedimentación, vaciado, y tiempo muerto. En la estrategia de operación usual, la duración de estas fases es determinada típicamente por un operador basado en su experiencia y en exhaustivas pruebas en el laboratorio con una planta experimental. En este modo de operación, la fase de reacción es suficientemente larga para permitir que las sustancias tóxicas sean degradadas. La duración de las fases de sedimentación y vaciado se fijan de acuerdo a las características del lodo activado y el reactor.

A pesar de las ventajas inherentes de los procesos discontinuos en lo referente a la biodegradación de sustancias tóxicas, un SBR que funciona bajo la *estrategia usual*, tiene varios problemas cuando se emplea en la degradación de aguas residuales tóxicas: inhibición de los microorganismos, problemas con choques debido a un aumento repentino en la concentración del compuesto tóxico (picos de concentración), desaclimatación y problemas por ayuno de los microorganismos y bajas eficiencias en la remoción de compuestos tóxicos (Buitrón y Moreno 2004; Buitrón *et al.*, 2003). Para superar los problemas discutidos sobre este modo de operación se han reportado el uso de estrategias para el control óptimo de las fases de llenado y de reacción del reactor (Moreno y Buitrón, 1998, Vargas *et al.*, 2000, Betancur *et al.*, 2004; Moreno-Andrade *et al.*, 2005). Con la *estrategia de control óptimo* además de poder biodegradar efectivamente las aguas inhibitorias, se logra maximizar la velocidad de degradación de los compuestos tóxicos, disminuyendo el volumen del reactor. En este trabajo se presentan y discuten los resultados de la aplicación de una *estrategia de control óptimo* del proceso de llenado y reacción de un reactor discontinuo utilizado para la degradación de compuestos fenólicos. La estrategia ha sido probada exitosamente a nivel laboratorio y se encuentra en fase de escalamiento a un prototipo industrial.

## METODOLOGÍA

### *Estrategia de control*

La estrategia de control desarrollada puede ser implantada en plantas de tratamiento de aguas industriales nuevas o en aquellas que no operan adecuadamente. La idea básica consiste en implantar una ley de control que minimice el tiempo de reacción, con lo que se consigue minimizar el volumen del reactor, y por lo tanto los costos de infraestructura, operación y mantenimiento. El proceso está orientado para operar el reactor biológico de una manera eficiente y segura. Para ello, se mantiene la velocidad de degradación de los contaminantes lo más cercana a la

máxima y el reactor opera en condiciones de alta eficiencia. El proceso de tratamiento transcurre con seguridad y en un tiempo de reacción cercano al mínimo posible.

La estrategia de control de tiempo óptimo por eventos dirigidos (ED-TOC) estima la velocidad del consumo máximo de oxígeno por los microorganismos ( $\gamma$ ) relacionado directamente con la actividad de los microorganismos y por lo tanto con la tasa de reacción. Esta variable se puede estimar en tiempo real usando la concentración de oxígeno disuelto y el volumen del reactor, como fue descrito detalladamente por Betancur *et al.* (2004). A continuación se describe brevemente el método de estimación. Se sabe que para compuestos tóxicos el comportamiento de la tasa de crecimiento de la biomasa ( $\mu$ ), o la tasa de degradación de sustrato, en función de la concentración del sustrato ( $S$ ) se puede describir por la ley de Haldane. En este modelo,  $\mu$  alcanza un valor máximo,  $\mu^*$ , cuando la concentración del sustrato es  $S^*$ . La concentración tóxica sobre o debajo de  $\mu^*$  generará una disminución en la tasa de crecimiento y, por lo tanto, también en la tasa de reacción. Así, si se garantiza que  $S$  está cerca a  $S^*$ , la tasa de degradación estará cerca de un valor máximo.

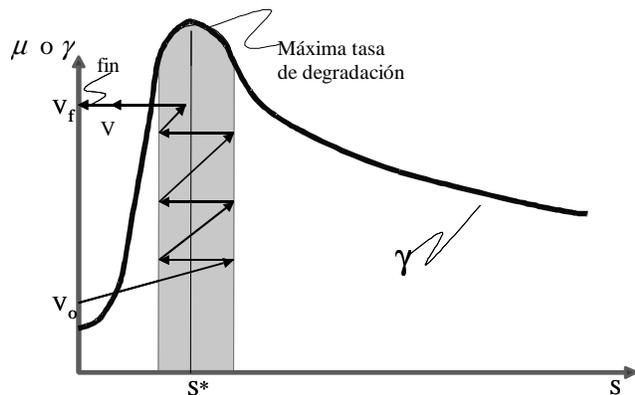
El problema consiste, por lo tanto, encontrar y mantener  $\mu$  en su valor máximo durante todo el período de reacción del reactor. Un problema adicional es que  $\mu$  es muy difícil en la práctica medir en línea la concentración del sustrato. Es interesante precisar que en la estrategia de ED-TOC se desarrolló un método para estimar  $\gamma$  y relacionarla con  $\mu$  de manera tal que ambos se encuentren en su valor máximo. En este caso  $\gamma$  es proporcional a  $\mu$  por una constante y para los propósitos del control no es necesario conocer el valor de dicha constante de proporcionalidad. La ecuación 1 que describe a  $\gamma$  fue obtenida del modelo de un reactor discontinuo (Betancur *et al.*, 2004):

$$\gamma = K_L a (O_s - O) V - O Q_{en} + V \frac{dO}{dt} \quad (1)$$

Donde:  $V$ : Volumen de agua dentro del reactor,  $O$ : Concentración de Oxígeno disuelto,  $K_L a$ : Coeficiente de transferencia de masa,  $O_{en}$ : Concentración de oxígeno disuelto en el influente,  $Q_{en}$ : tasa de flujo de entrada,  $O_s$ : Concentración de oxígeno disuelto a saturación,  $\gamma$  velocidad de consumo máximo de oxígeno.

Usando la estrategia ED-TOC, el flujo de entrada es controlado de tal manera que la tasa de reacción permanezca dentro de la zona gris de la figura 1. Esta zona está en el punto donde la tasa de consumo de sustrato es la máxima. La tasa de reacción es controlada manteniendo la concentración del sustrato oscilando en este punto durante el llenado del SBR. Cada vez que la concentración del sustrato intenta dejar este punto, un evento es reportado y la estrategia ED-TOC enciende o apaga la bomba del flujo de entrada. La estrategia funciona a pesar de cambios de actividad de los microorganismos presentes en el SBR, tampoco importa el valor de la concentración de sustrato en el influente. Todas las variables en el lado derecho de la ecuación 1 pueden ser medidas en forma directa. Para estimar  $\gamma$  solamente se necesita el coeficiente de transferencia de masa,  $K_L a$  y la concentración de oxígeno disuelto a la saturación,  $O_s$ . Incluso, estas variables no necesitan ser conocidas con precisión. Esta solución es por lo tanto un buen candidato a aplicaciones en ambientes industriales verdaderos.

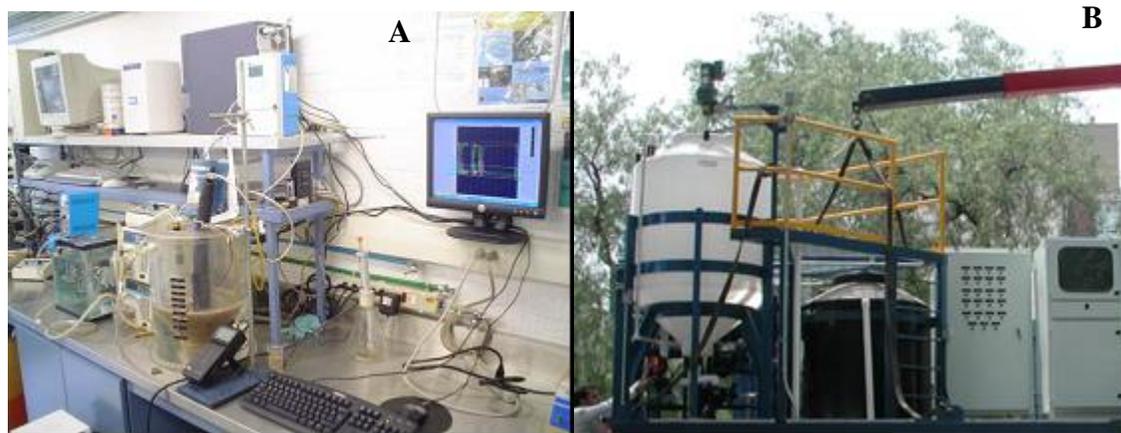
**Figura 1.** Estrategia ED-TOC.  $V_0$  indica el volumen inicial en el tanque. El flujo es alimentado de manera tal que se mantiene la tasa de reacción cerca del valor óptimo (zona gris) Una vez que se alcance el volumen final,  $V_f$ , el reactor actúa como un proceso en lotes (batch) y la tasa de reacción disminuye.



Otra opción que el grupo ha desarrollado para estimar la actividad de los microorganismos en línea es a través de la medición por espectrofotometría de la concentración del efluente (Vargas y Buitrón, 2005). Con este método el espectro completo de absorción del agua es utilizado para predecir las concentraciones de todas las sustancias presentes.

### *Reactor piloto*

Se empleó un reactor aerobio discontinuo secuencial con una capacidad de 7L y un volumen de intercambio de 57% (figura 2). El flujo de aire empleado fue de 1.5 litros por minuto y se mantuvo una temperatura de 20 °C dentro del reactor. El biorreactor fue inoculado con microorganismos provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales (2000 mg SSV/L). Se empleó un agua sintética modelo que contenía 4-clorofenol (4CF) como única fuente de carbono y energía. Se agregaron nutrientes como nitrógeno, fósforo y oligoelementos siguiendo la recomendación. Para las condiciones consideradas como estándar, el reactor fue alimentado con una concentración en el influente de 350 mg4CF/L. Se evaluaron diversas concentraciones iniciales de 4CF entre 175 y 11200 mg/L para probar la estrategia de control, y también diversos flujos de aire (0.75, 1.5 y 2.25 litros por minuto). La duración de las fases del SBR fue la siguiente: tiempo de preaeración (15 minutos), llenado y reacción (variable, dependiendo de la concentración del influente), sedimentación (30 minutos) y vaciado (6 minutos). La concentración del 4CF fue medida por medio de la técnica de la 4-aminoantipirina (Standard Methods, 1992). Los análisis de sólidos suspendidos totales y volátiles (SST y SSV), carbono orgánico disuelto (COD) y demanda química de oxígeno (DQO) fueron determinados de acuerdo a Standard Methods (1992).



**Figura 2.** Reactores piloto usados en la degradación de compuestos tóxicos A) piloto de laboratorio; B) prototipo a escala industrial

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### *Cinéticas bajo la condición estándar*

La biomasa fue aclimatada por medio de la estrategia de tiempos variables, en la cual la duración de la fase de reacción fue detenida cuando la remoción del 4CF fuera igual o mayor a 95%. La eficiencia promedio de remoción fue del 99% como DQO y del 100% (como 4CF). Los sólidos suspendidos totales en el efluente fueron menores a 14 mg/L, de índice volumétrico de lodos se mantuvo alrededor de 38 mL/g y la velocidad de sedimentación del lodo de 6 m/h. Estos datos indicaron un buen funcionamiento del reactor operado con la estrategia de control ED-TOC.

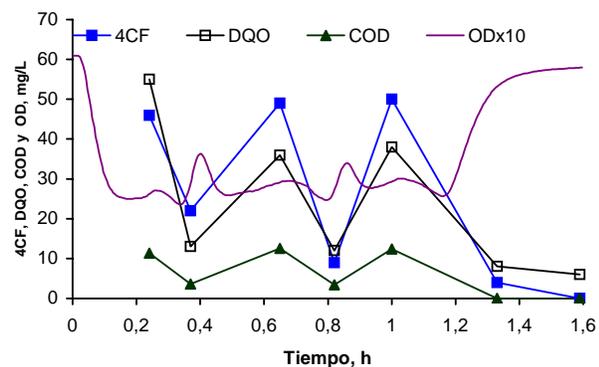
La figura 3 presenta el comportamiento de la concentración de sustrato, medido como 4CF, DQO y COD durante un ciclo operado bajo estrategia de control ED-TOC. Es posible distinguir como funciona la estrategia de control siguiendo los cambios en la curva de degradación del sustrato y el OD. En esta estrategia el reactor comienza operando como Fed-batch. Una vez que el sustrato comienza a ser alimentado al reactor, la reacción comienza. El OD disminuye (primeras 0.2 h, figura 3) como resultado del aumento en el consumo de oxígeno debido al aumento en la actividad metabólica de la biomasa para degradar el 4CF. Simultáneamente, el estimador calcula  $\gamma$  y monitorea este valor. Cuando se detecta el punto máximo de  $\gamma$  (antes de que exista una concentración mínima de OD), la bomba de alimentación se apaga. Después de que la concentración de sustrato disminuye (de 48 a 22 mg4CF/L, en 0.4 h en la figura 3) el sistema detecta que la concentración del sustrato se vuelve menor a la esperada para obtener una  $\gamma$  máxima (es decir, ya no es la óptima), por lo cual también se observa que la actividad de los microorganismos comienza a dejar de ser la máxima. Así, el sistema enciende la bomba de alimentación, y una nueva carga de sustrato se alimenta al reactor. Se repite este procedimiento hasta que se alcanza el volumen máximo del reactor y con lo cual la degradación continua como un proceso batch clásico. Es posible observar en la figura 3 cómo la concentración

dentro del reactor se mantiene alrededor de 30 mg/L durante la alimentación dosificada hecha por el sistema de control, esta concentración de sustrato corresponde a una concentración cercana a  $S^*$  y por lo tanto alrededor de  $\mu^*$ .

### Funcionamiento de la estrategia ED-TOC bajo diferentes concentraciones iniciales

Para probar el funcionamiento de la estrategia de ED-TOC bajo picos de concentración (exposición repentina a altas concentraciones de tóxico), se evaluaron varias concentraciones iniciales de 4CF. Se comparó la respuesta obtenida con la estrategia ED-TOC y la obtenida cuando el reactor operó con una estrategia usual. El reactor que funcionó bajo la estrategia usual pudo degradar picos de concentración de hasta 760 mg4CF/L en el influente con un incremento en el tiempo de degradación del 50%. En este caso, fue necesaria una semana para recuperar el buen funcionamiento del reactor y la actividad inicial de los microorganismos. Concentraciones más altas de 4CF generaron un problema severo de inhibición a la biomasa del cual el reactor no se recuperó. En caso contrario, la estrategia ED-TOC pudo manejar incrementos de la concentración en el influente de hasta 11200 mg4CF/L. Es fácil demostrar que no sólo una concentración más alta de compuesto tóxico se podría tratar con la estrategia de operación ED-TOC, sino que también es obtenida una reducción en tiempo de degradación.

**Figura 3.** Variación de la concentración del sustrato, medido como 4CF, DQO y COD durante el ciclo operado con la estrategia ED-TOC



**Tabla 1.** Efecto de diferentes estrategias de operación sobre el desempeño de un reactor bajo la exposición a picos de concentración

Estrategia de control	Pico de 4CF, mg/L ( $S_m$ )	Eficiencia de remoción durante el pico (% of 4CF)	Tasa de degradación durante el pico (mg 4CF/gSSV-h)	Desempeño del reactor después del pico
Usual	550	100	21.0	Sin problemas
Usual	760	85	18.5	Incremento del tiempo de degradación en un 50%. Fue necesaria una semana para recuperar la eficiencia original
Usual	900	63	21.4	Afectación severa sobre el desempeño del reactor. Fue necesario un mes para recobrar la eficiencia original
ED-TOC	440	100	48.4	Sin problemas
ED-TOC	530	100	45.8	Sin problemas
ED-TOC	634	100	60.4	Sin problemas
ED-TOC	700	100	63.5	Sin problemas
ED-TOC	1400	100	91.2	Sin problemas
ED-TOC	2800	100	114.3	Sin problemas
ED-TOC	5600	100	114.3	Sin problemas
ED-TOC	11200	100	114.3	Sin problemas

### Variación del oxígeno disuelto

Ya que la estrategia de tiempo óptimo depende del OD para controlar el flujo de alimentación de sustrato, es importante estudiar cuánto podría afectar la variación de este parámetro en el funcionamiento del reactor. Se realizaron dos experimentos variando el flujo del aire con respecto al valor estándar de 1.5 litros por minuto. Cuando una condición de -50% fue aplicada, el OD en el reactor siempre fue superior a 2 mg/L. Con lo cual se puede considerar que no hubo limitaciones para este elemento en el reactor y que la estrategia puede operar bien aún en condiciones no óptimas.

## CONCLUSIONES

Se demostró la factibilidad de la aplicación de una nueva estrategia del control para optimizar la tasa de degradación de compuestos tóxicos representativos de los efluentes industriales. Se demostró la robustez de la metodología frente a condiciones variables de aguas conteniendo compuestos inhibitorios, por lo que es una respuesta adecuada al problema del tratamiento de aguas residuales industriales.

El reactor presentó un buen funcionamiento ya que la mineralización del 4CF fue terminada de manera eficiente. Las eficiencias medias de remoción fueron del 99% como demanda química de oxígeno, y 100% como 4CF. Los sólidos suspendidos totales en el efluente se mantuvieron debajo de 14 mg/L, el índice volumétrico de lodos alrededor de 38 mL/g, y de la velocidad de sedimentación de 6 m/h, esto último indica que el lodo tuvo una excelente sedimentabilidad.

Al operar el reactor con la estrategia ED-TOC se observó un excelente funcionamiento, superior al mostrado por la estrategia usual. La estrategia de ED-TOC puede manejar incrementos en la concentración de compuestos tóxicos en el influente de hasta 11200 mg4CF/L sin ningún problema. Fue demostrado que no sólo concentraciones más altas de tóxico se podrían tratar con la estrategia de ED-TOC, sino que también se obtuvo una reducción en tiempo de degradación. Para una concentración inicial dada de 4CF, la tasa de degradación fue más alta (casi el doble) con la estrategia de ED-TOC que con la estrategia usual. En general, no hubo una influencia significativa en la operación de la estrategia ED-TOC cuando el flujo de aire se varió en  $\pm 50\%$  con respecto a la condición estándar. La tecnología desarrollada para degradar efluentes industriales se escaló a nivel prototipo industrial con lo que evaluará su aplicación a nivel real.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo incluye resultados del proyecto ICA4-CT-2002-10012 (EOLI) patrocinado por el programa INCO de la Unión Europea.

## REFERENCIAS

- Betancur M.J., Moreno J. y Buitrón G. (2004). Event-driven control for treating toxicants in aerobic sequencing batch bioreactors. Proceedings of the 9th International Symposium on Computer Applications in Biotechnology (CAB9), March 28-31, Nancy, France.
- Buitrón G., Soto G., Vite G. y Moreno J. (2001) Strategies to enhance the biodegradation of toxic compounds using discontinuous processes. *Water Science and Technology* **43**(3), 283-290.
- Buitrón G., Schoeb M.-E. y Moreno J. (2003) Automated Sequencing Batch Bioreactor Under Extreme Peaks of 4-Chlorophenol *Water Science and Technology* **47** (10), 175-181.
- Buitrón G. y Moreno J. (2004). Modeling of the acclimation/deacclimation processes of a mixed culture degrading 4-chlorophenol. *Water Science and Technology*, **49** (1), 79-86.
- Englande, A.J., Jr., Eckenfelder, W. W. Jr., Jin G. (2005). Variability control key to regulatory compliance and sustainability goals. *Memorias en CD del IWA Chemical Industries 2005 International Conference. Sustainable Development of Chemical Industries with the Environment*, Tsukuba, Japón, 14-16 Julio, A-1-1.
- Moreno J. y Buitrón G. (1998) Respirometry based optimal control of an aerobic bioreactor for the industrial waste water treatment, *Water Science and Technology*, **38**, (3), 219-226.
- Moreno-Andrade I., Pérez J., Betancur J. M., Moreno J. A. y Buitrón G. (2005). Biodegradation of high 4-chlorophenol concentrations in a discontinuous reactor fed with an optimally controlled influent flow rate. *Memorias en CD del IWA Chemical Industries 2005 International Conference. Sustainable Development of Chemical Industries with the Environment*, Tsukuba, Japón, 14-16 Julio, B-4-3.
- Nguyen A.L., Duff J.B. y Sheppard J.D. (2000) Application of feedback control based on dissolved oxygen to a fixed-film sequencing batch reactor for treatment of brewery wastewater. *Water Environment Research*. **72** (1), 75-83.
- Scheppard J.D. y Copper D.G. (1990) Development of computerized feedback control for continuous phasing of *Bacillus subtilis*. *Biotechnology and Bioengineering*, **36**, 539-545.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1992). 18<sup>th</sup> ed., American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC, USA.
- Vargas A., Soto G., Moreno J. y Buitrón G. (2000), Observer based time-optimal control of an aerobic SBR for chemical and petrochemical wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 42 No. 5-6, 163-170.
- Vargas A. y Buitrón G. (2005) On-line concentration measurements in wastewater using nonlinear deconvolution and partial least squares of spectrophotometric data. *Memorias del 2<sup>nd</sup> IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation*, Busan, South Korea, May-June.
- Wilderer P.A., Irvine R.L. y Goronszy M.C. (2001). Sequencing batch reactor technology. *Scientific and technical report No 10*, IWA Publishing, London, 76 pp.