

# DEGRADACIÓN ELECTROQUÍMICA DE FENOL: SIMULACIÓN NUMÉRICA Y CONTROL CON ESTRUCTURAS BÁSICAS DE CONTROL

## ELECTROCHEMICAL DEGRADATION OF PHENOL: NUMERICAL SIMULATION AND CONTROL WITH BASIC CONTROL STRUCTURES

**Alejandro Regalado-Méndez<sup>1\*</sup>, Ever Peralta-Reyes, Julián Vidal-Silva y Ana L. Morales-García**  
Universidad del Mar, Área de Ingeniería Ambiental, Campus Puerto Ángel, Ciudad Universitaria S/N,  
Km. 1.5 Carretera Puerto Ángel-Zipolite, Puerto Ángel, San Pedro Pochutla, 70902 Oaxaca - México  
\*autor de contacto (e-mail: alejandro.regalado33@gmail.com)

*Recibido: 27/01/2011 - Evaluado: 10/03/2011 - Aceptado: 25/04/2011*

### RESUMEN

En este trabajo se propone un control PI feedback para mejorar el desempeño de la dinámica de un reactor electroquímico de tanque agitado (RECTA) que degrada fenol. Esto con la finalidad de mejorar la calidad de aguas residuales de acuerdo a la normatividad mexicana ( $C_{DQO} = 200 \text{ mg L}^{-1}$  por día). La ley de control tiene como variable de control a la concentración de DQO, mientras que la variable manipulada es la tasa de disolución. El principal resultado es que la ley de control implementada es robusta al llegar a la referencia pedida ( $C_{DQO, \text{set-point}} = 83.92 \text{ mg L}^{-1}$ ). Es decir, regula perfectamente la concentración de DQO, sin embargo el tiempo de asentamiento del reactor es mayor que a lazo abierto.

### ABSTRACT

In this paper is used a PI control feedback to improve the dynamic performance of an electrochemical reactor of stirring tank (RECTA) that degrades phenol. This was done to improve the quality of wastewater in accordance with Mexican regulations ( $C_{DQO}=200\text{mgL}^{-1}$  per day). In the designer of control law, the variable of control is the DQO concentration and the manipulated variable is the rate of dissolution. The main result is that control law is robust to reach the requested reference ( $C_{DQO, \text{set-point}}=83.92\text{mgL}^{-1}$ ). This perfectly regulates DQO concentration; however the settling time of the reactor is greater than open loop.

Palabras clave: control PI; degradación de fenol; reactor electroquímico de tanque agitado; simulación numérica  
Keywords: PI control; phenol degradation; electrochemical reactor of stirring tank; numerical simulation

<sup>1</sup>Dirección actual: Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Natural Sciences and Technology, Department of Chemical Engineering, No-7491, Trondheim, Norway, 7050.

## INTRODUCCIÓN

El fenol es una sustancia utilizada en la elaboración de plásticos, como desinfectante en productos de limpieza y es un desecho común en las aguas residuales de la industria petrolera, química y farmacéutica (Tahar y Salvall, 1999; Zu-Cheng et al., 2004; Xiao-yan et al., 2005; Groenen-Serrano et al., 2007). La contaminación del agua con fenol es un problema que ha crecido en los últimos años (Idris y Saed, 2002). Dicho compuesto afecta la salud humana; principalmente daña la piel al contacto, y si se ingiere o inhala puede causar daños cardiovasculares e intestinales graves, incluso la muerte (Arotiba et al., 2010). También, el fenol es un compuesto carcinogénico por lo que es un tema en el sector salud a pesar que se encuentra en pequeñas cantidades (Idris y Saed, 2002; ATSDR, 2008). Entonces, el tratamiento de agua residual que se encuentra contaminada con fenol es necesario.

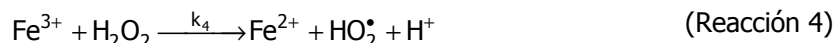
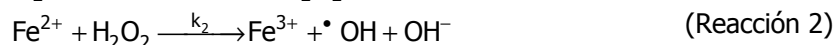
Los métodos más comunes que se utilizan para su degradación son el biológico, lodos activados, coagulación-floculación y tratamientos fisicoquímicos (Tahar y Salvall, 1999; Idris y Saed, 2002; Xiao-yan et al., 2005; Liu et al., 2007). Sin embargo, la eficiencia de estos procesos así como su viabilidad económica es muy desalentadora. Además, en los últimos años la normatividad (NOM-088ECOL-1994, 200 mgL<sup>-1</sup> por día, SMARN, 2010) ha puesto énfasis en la concentración de contaminantes en el agua, por lo que se han creado nuevas tecnologías más efectivas que toman en cuenta la eficiencia de los procesos, el costo monetario que implican y la factibilidad de su uso después de haber sido tratadas (Zu-Cheng et al., 2004; Forero et al., 2005).

Dentro de las nuevas tecnologías se encuentran los métodos electroquímicos, ya que son útiles para tratar contaminantes que no pueden ser degradados por los tratamientos tradicionales (Juttner et al., 2000). La desventaja de estas nuevas alternativas es que, el fenol es un compuesto que demanda altas concentraciones de O<sub>2</sub> por lo cual es lentamente degradable (Zu-Cheng et al., 2004; Regalado-Méndez et al., 2010).

Existe una gran variedad de tecnologías electroquímicas para la degradación de fenol así como compuestos organofenólicos. Entre los más relevantes se encuentran el trabajo de Zu-Cheng et al. (2004) en el cual se induce O<sub>2</sub> en la celda electroquímica produciéndose H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Jia et al. (2008), realizaron la degradación catalítica de fenol en un reactor tipo tanque agitado a baja escala; enfocándose en los efectos del pH a cambios del voltaje en la celda electroquímica. Punjabi et al. (2008), proponen un mecanismo para la degradación de rojo de fenol empleando una reacción Foto-Fenton pero sustituyendo al Fe<sup>2+</sup> por complejos metálicos de Cr, Fe, Co, Pt, Mo, y Zuchen y Minhua (2001), realizaron un estudio electrocatalítico de la degradación parcial de fenol a ácidos orgánicos en un ánodo de β-PbO<sub>2</sub> que contiene fluororesina. También derivaron la cinética de degradación del fenol, siendo esta de primer orden. Así mismo Hui et al. (2011), realizaron la degradación de fenol por el método Electro-Fenton empleando los electrodos Ti/IrO<sub>2</sub>/RuO<sub>2</sub> y C/PTFE además de la inducción de la difusión de fenol para facilitar la generación de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Para determinar la eficiencia de reposición de fenol emplearon la concentración de oxígeno disuelto. Se encontraron altas tasas de remoción de fenol así como una reducción de la energía siendo el proceso sustentable. Sin embargo no desarrollaron la cinética de degradación para poder ser probado a escala piloto y/o industrial. Santos et al. (2009), desarrollaron un pseudo-modelo cinético de primer orden para la toxicidad en la evolución de la degradación de fenol. Finalmente, Yu-Jie et al. (2011), desarrollaron modelos cinéticos de pseudo-primer orden usando como ánodos a Ti/Sb-SnO<sub>2</sub> y Ti/RuO<sub>2</sub>. Así mismo encontraron que el método de remoción es eficiente pero emplea una cantidad de energía apreciable para la remoción de fenol proveniente de aguas residuales.

Los trabajos previos de interés para los autores sobre la degradación de fenol empleando métodos electroquímicos son los reportados por; Körbahti y Tanyolac (2003), quienes degradaron este compuesto empleando un reactor tubular continuo experimental, y Liu et al. (2007), plantean un modelo cinético que describe las reacciones Electro-Fenton en disolución acuosa. Dicho método consiste en la generación de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en la solución acuosa introduciendo en forma continua una mezcla de oxígeno y aire para mantener la concentración de oxígeno disuelto en solución acuosa siendo más eficiente la generación de peróxido de hidrogeno que los métodos de dosificación convencionales. La reacción cinética Electro-Fenton consta de tres

reacciones claves: (1) la generación de  $\text{H}_2\text{O}_2$  en la superficie del cátodo por medio del oxígeno disuelto (Reacción 1), (2) la generación de radicales hidroxilo ( $\cdot\text{OH}$ ) entre  $\text{H}_2\text{O}_2$  y  $\text{Fe}^{2+}$  (Reacción 2), y (3) la degradación del compuesto orgánico por  $\cdot\text{OH}$  (Reacción 5). Las reacciones (Reacciones 3, 4, 6 y 7) coexisten con las reacciones clave, a continuación se muestra un resumen de las reacciones (Liu et al., 2007).



Regalado-Méndez et al. (2010), realizaron la simulación numérica de la degradación de fenol en un reactor electroquímico continuo de tanque agitado (RECTA) el modelo es del tipo entradas y salidas, el esquema es mostrado en la Figura 1. Un parámetro importante de destacar en este tipo de sistemas es la tasa de disolución que no es más que el inverso del tiempo de residencia del reactor. Con la tasa de disolución también podemos calcular el tiempo teórico de asentamiento del reactor como:  $\tau = 4\theta^{-1}$  (Regalado-Méndez y Álvarez-Ramírez, 2007). La tasa de disolución es la clásica variable de manipulación reactores continuos de tanque agitado (Luyben, 1996; Aguilar et al., 2005).

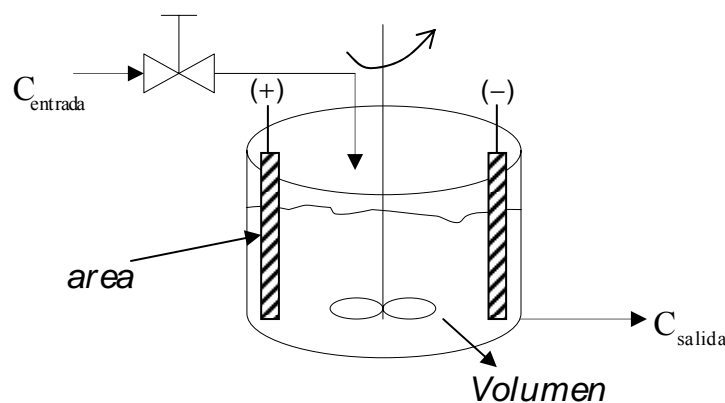
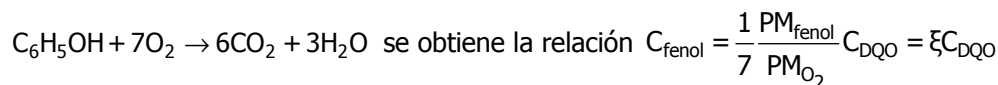


Fig. 1: Reactor Electroquímico Continuo de Tanque Agitado (Scott, 1991).

En este trabajo se realiza una ligera modificación del modelo de degradación de fenol en un reactor electroquímico continuo de tanque agitado de Regalado-Méndez et al. (2010). Para mejorar la dinámica del modelo es propuesto un control feedback con estructuras básicas de control. Para este caso se empleara como ley de control un control proporcional integral (PI). Así mismo se considera a la tasa de disolución ( $\theta$ ) como variable de control mientras que la variable de control será la concentración de DQO. Se escoge a la concentración de DQO porque es una propiedad comúnmente usada en términos medioambientales y además es fácil de manejar. El control es sintonizado por la teoría de modelo de control interno (IMC). Finalmente, los autores de este trabajo desean destacar el hecho de conjugar la teoría de control y procesos verdes tales como los procesos electroquímicos cae en algunos de los doce principios de la ingeniería verde. Especialmente en el de prevención dentro del proceso y no soluciones al final del tubo.

### METODOLOGÍA

El balance de masa para la degradación de fenol en un reactor electroquímico continuo de tanque agitado (RECTA) se basó en el modelo propuesto por Regalado-Méndez et al. (2010); así mismo se aplicó la transformación usada por Aslam et al. (2004), para calcular la demanda química de oxígeno (DQO) teórico requerido para degradar fenol en disolución mediante la siguiente reacción:



Finalmente el modelo matemático desarrollado en este artículo está representado por las ecuaciones (1).

$$R = \frac{k_5}{k_3} \left\{ \frac{1}{0.2[Fe^{2+}]_0 + \frac{k_5}{k_3} \xi C_{DQO}} \right\} \frac{I}{A} \frac{k_1 K_{ad} [O_2]}{(1 + K_{ad} [O_2])} (1 - e^{-(k_2(0.2)[Fe^{2+}]_0)t}) C_{DQO} \tag{1}$$

$$\frac{dC_{DQO}}{dt} = \theta(C_{DQO,Ent} - C_{DQO}) - R$$

Nótese que el factor  $\xi$  permite obtener la concentración de fenol en términos de DQO. Este término ambiental muy usado para obtener una noción de la calidad del agua.

En éste trabajo se propone la implementación de un control feedback proporcional integral (PI), debido a que este tipo de controladores son muy comunes en los procesos industriales. Otra de sus ventajas es que basan su funcionamiento en el control de una variable de salida a través del uso de alguna otra variable manipulada (Luyben, 1996; Ogata, 1997). La representación matemática del control PI se da por la ecuación (2).

$$\theta(t) = \theta + K_p e(t) + \frac{K_p}{\tau_c} \int e(t); \tag{2}$$

$$e(t) = (C_{DQO,in} - C_{DQO,set-point})$$

Tabla 1: Descripción de las Variables del Proceso (Liu et al., 2007).

| Variable                   | Descripción                                                                                                                  |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $C_{DQO}$                  | Concentración de DQO en la disolución (mg L <sup>-1</sup> )                                                                  |
| $C_{DQO,set-point}$        | Concentración de DQO del set-point ( $C_{DQO,Set-point} = 83.92 \text{ mg L}^{-1}$ ) (ATSDR, 2008)                           |
| $I/A$                      | Densidad de corriente (0.32 mAcm <sup>-2</sup> )                                                                             |
| $[Fe^{2+}]_0$              | Concentración inicial del ión hierro (0.2 mM)                                                                                |
| $K_{ad}$                   | Constante de adsorción (1.1 mM <sup>-1</sup> )                                                                               |
| $k_1 K_{ad}, k_2, k_5/k_3$ | Constantes cinéticas (3.96 mM <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> , 4.86 mM <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> , 0.31 adimensional) |
| $[O_2]$                    | Concentración de oxígeno (0.4 mM)                                                                                            |
| $\mathcal{R}$              | Velocidad de reacción (mM min <sup>-1</sup> )                                                                                |
| $t$                        | Tiempo (min)                                                                                                                 |
| $\theta$                   | Tasa de disolución (min <sup>-1</sup> )                                                                                      |

Nota: El factor  $\xi$  transforma la concentración de fenol (mM) a concentración de DQO (mg L<sup>-1</sup>) por lo que no es necesario convertir las constantes de las variables del proceso. Las condiciones de operación fueron: T = 25 °C,

1atm de presión,  $\text{pH} = 2.5$  (Liu et al., 2007),  $C_{\text{DQO},\text{in}} = 2025.53 \text{ mM}$ ,  $C_{\text{Fe}^{2+}} = 0.2 \text{ mM}$ , y  $C_{\text{O}_2} = 0.4 \text{ mM}$  (Regalado-Méndez et al., 2010).

Los parámetros del control, tanto la ganancia del proceso ( $K_p$ ) como el tiempo característico ( $\tau_c$ ) son obtenidos mediante la teoría de modelo de control interno (IMC). La simulación numérica a lazo abierto del modelo dinámico para llevar a cabo la degradación de fenol se realizó utilizando el lenguaje de programación MATLAB versión 7.8 (R2009a). La ley de control diseñada también es implementada vía simulación numérica en el modelo ya mencionado.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 se muestra la simulación numérica del RECTA a lazo abierto. Las simulaciones se realizaron a distintas concentraciones de alimentación de fenol. En las curvas se observa que la concentración de DQO decrece suave y asintóticamente. Además, conforme la concentración de alimentación de DQO es mayor la degradación es menor. También, se observa que los tiempos de asentamiento del reactor disminuyen cuando la concentración de alimentación de fenol es menor. La forma de los perfiles de degradación son iguales a los presentados por Regalado-Méndez et al. (2010) con la diferencia que estos son mostrados en términos de DQO. Por lo que la simulación es congruente con la ya reportada.

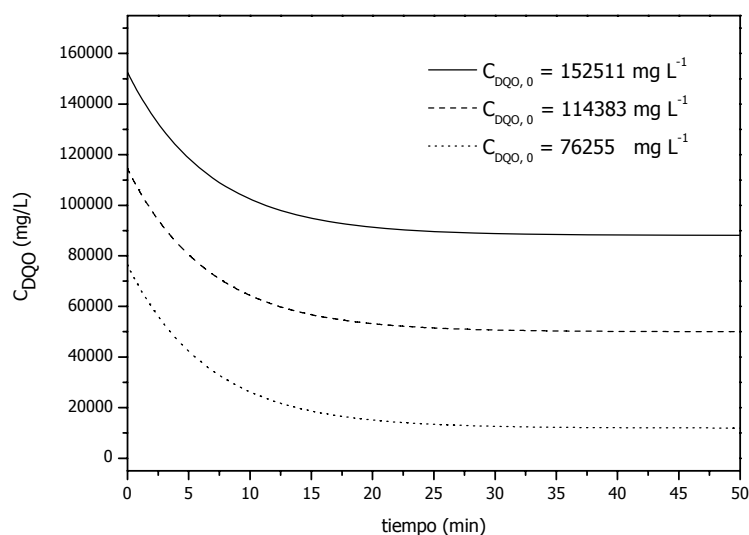


Fig. 2: Funcionamiento del modelo matemático del RECTA para la degradación de fenol a diferentes concentraciones iniciales.

En la Figura 3 se muestra la degradación de fenol en forma adimensional. De esta manera podemos obtener el porcentaje de remoción de fenol por medio de la relación siguiente:  $\% \text{Remoción} = [1 - (C_{\text{DQO}}/C_{\text{DQO},0})] \times 100$ . Se tiene que para las concentraciones iniciales de DQO de  $152511 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $114383 \text{ mg L}^{-1}$  y  $76255 \text{ mg L}^{-1}$  el porcentaje de remoción es del 42.3%, 56.31% y 84.4%, respectivamente. Los resultados son congruentes a los encontrados por Körbahti y Tanyolac (2003), Liu et al. (2007) y mejores que los encontrados por Santos et al. (2009) y Yu-Jie et al. (2011).

En la Figura 4 muestra el mapa de bifurcación de la dinámica del RECTA a dos concentraciones de DQO en la alimentación ( $C_{\text{DQO}}$  de  $38128 \text{ mg L}^{-1}$  y  $76255 \text{ mg L}^{-1}$ ). Puede notarse que para llegar al set-point ( $C_{\text{DQO}} = 83.92$

mg L<sup>-1</sup>),  $\theta$  debe ser pequeña, lo cual es un indicio de que la operación en continuo se ve desfavorecida. Por esta razón, es necesario implementar una ley de control para aumentar la eficiencia del reactor electroquímico y mejorar la dinámica del sistema.

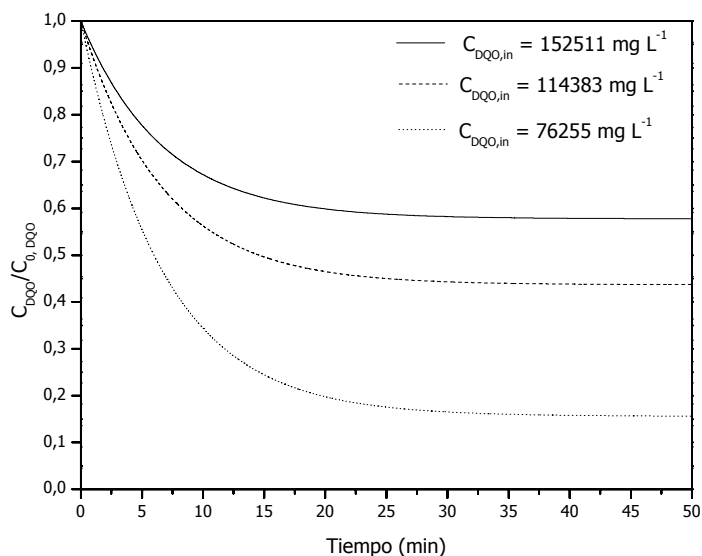


Fig. 3: Gráfica de la fracción de remoción a diferentes concentraciones iniciales de DQO.

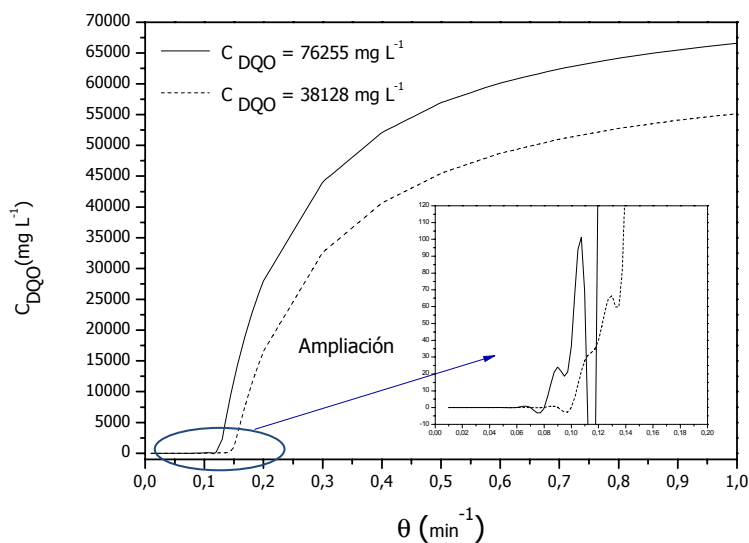


Fig. 4: Mapa de bifurcación.

En la Figura 5 se muestra la respuesta del sistema a una perturbación en escalón de  $\pm 5\%$  en la dinámica del RECTA a lazo abierto. Esto, con el fin de calcular el tiempo del proceso así como la ganancia del proceso mediante el método IMC. Los valores del tiempo característico  $\tau_c$  para el escalón positivo es de 12.8 min y para el escalón negativo de 2.24 min. Para implementar el control, se tomó una concentración inicial de DQO de

38128 mg L<sup>-1</sup> y utilizando el mapa de bifurcación de la Figura 2, se calculó la tasa de disolución nominal obteniéndose un valor de 0.024 min<sup>-1</sup>.

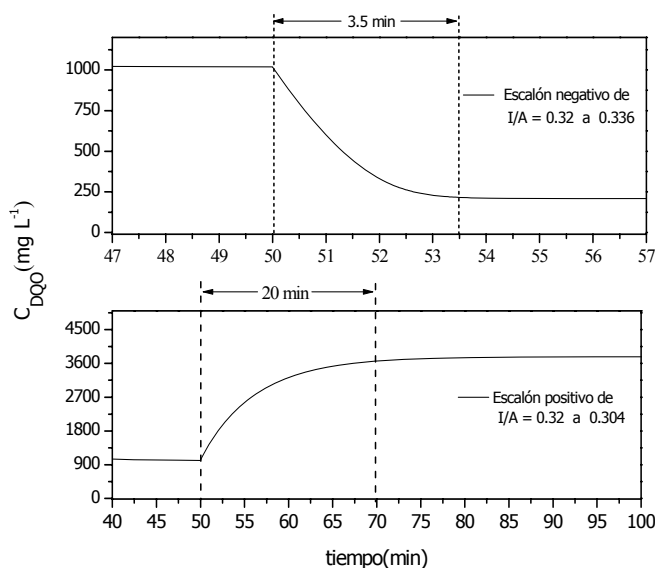


Fig. 5: Respuesta de la C<sub>DQO</sub> en función del tiempo, con una C<sub>DQO</sub> = 38128 mg L<sup>-1</sup>. Tanto el escalón positivo como el escalón negativo se manifiestan con una perturbación en el sistema de 0.016 mA cm<sup>-2</sup> en la I/A.

En la Figura 6 se presenta una comparación de las simulaciones del RECTA a lazo abierto y cerrado para una C<sub>o,DQO</sub> = 38128 mg L<sup>-1</sup>. El tiempo de asentamiento del reactor con control es mucho menor que el tiempo de asentamiento teórico es aproximado al de lazo abierto, de acuerdo con la siguiente relación:  $\tau_{A, \text{control PI}} = 11.2 \text{ min} \ll \tau_{A, \text{teórico}} = 35.24 \text{ min} < \tau_{A, \text{lazo abierto}} = 37.5 \text{ min}$ .

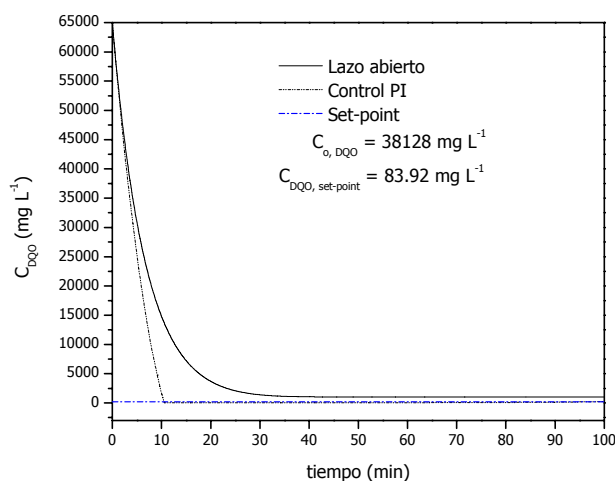


Fig. 6: Comparación de las simulaciones del reactor electroquímico a lazo abierto y cerrado para una C<sub>DQO</sub> = 38128 mg L<sup>-1</sup>.

Los resultados obtenidos muestran (ver Figura 6) que la ley de control propuesta es robusta al llegar al valor de set-point deseado, el cual es consistente al cumplir con la legislación ambiental mexicana.

También los resultados sugieren que para mejorar el desempeño de la ley de control propuesta se pueden manipular la densidad de corriente como variable de control, así mismo cambiar las condiciones de operación tales como: la concentración inicial del ión  $\text{Fe}^{2+}$  y la concentración inicial de oxígeno disuelto.

La concentración de DQO es una propiedad usada en términos ambientales común. En este estudio fue fácil manejar. Sin embargo, podría ser interesante en trabajos futuros emplear como variable de control la toxicidad y/o la contracción de productos secundarios como variable de control. Para implementar a la toxicidad y/o compuestos secundarios se tendría que realizar modificaciones al modelo cinético de degradación de fenol, al modelo dinámico y/o encontrar relaciones matemáticas que puedan interactuar entre dichas propiedades.

## CONCLUSIONES

El comportamiento de simulación numérica de la degradación de fenol a lazo abierto muestra que para las concentraciones iniciales de DQO de  $152511 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $114383 \text{ mg L}^{-1}$ , y  $76255 \text{ mg L}^{-1}$  el porcentaje de remoción es del 42.3%, 56.31% y 84.4%, respectivamente. Por lo que la degradación es efectiva a bajas concentraciones iniciales de la concentración de DQO.

El comportamiento del diagrama de bifurcación tiene la forma propuesta en la literatura. No existen singularidades ni multiplicidad de estados estacionarios. Sin embargo la tasa de disolución gobierna el porcentaje de degradación la factibilidad del proceso continuo.

La ley de control implementada es robusta al llegar a la referencia pedida ( $C_{\text{DQO, set-point}} = 89.92 \text{ mg L}^{-1}$ ) y al cumplir con la normatividad ambiental mexicana vigente. Adicionalmente, el valor del set-point corresponde al 90.78% de remoción respecto a una concentración inicial de DQO de  $38128 \text{ mg L}^{-1}$ .

Los tiempos de respuesta del sistema dinámico ante un cambio en escalón es la esperada de la literatura, sin embargo existe una diferencia muy grande en volver a asentarse el reactor. La relación del tiempo de asentamiento en la respuesta a escalón es:  $T_{\text{Escalón}}^+ / T_{\text{Escalón}}^- = 5.7$ .

Para mejorar el desempeño de la ley control se recomienda agregar un control diferencial para darle dirección, un retraso de tiempo o usar el método de compensación de errores de modelado. Esto podría reducir aun más el tiempo de asentamiento del reactor electroquímico de tanque agitado.

## REFERENCIAS

1. Aguilar, R.; Martínez, S.A.; Rodríguez, M.G.; Soto, G. (2005); *Process Analysis for Treatment of Industrial Plating Wastewater: Simulation and Control Approach*. Chemical Engineering Journal: 105(3), 139-145.
2. Arotiba, O.A.; Ndlovu, T.; Krause, R.W.; Mamba, B.B. (2010); *Electrochemical Detection of o-Nitrophenol on a Poly(propyleneimine)-gold Nanocomposite Modified Glassy*. International Journal of Electrochemical Science: 5(11), 1179-1186.
3. Aslam, M.M.; Baig, M.A.; Hassan, I.; Qazi, I.A.; Malik, M.; Saeed, H. (2004); *Textile Wastewater Characterization and Reduction of its COD & BOD by Oxidation*. Electronic Journal of Environmental: 3(6), 804-811.
4. ATSDR-Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades(2008); *Resumen de Salud Pública de Fenol*. <http://www.atsdr.cdc.gov/PHS/PHS.asp?id=146&tid=27>. Fecha de acceso: 15 de Junio de 2010.
5. Jia, B.; Zhang, D.; Zhang, A. L.; Zhou, J.T. (2008); *Electrochemical Heterogeneous Catalytic Degradation of Wastewater Containing Phenol*. Ann. N.Y. Acad. Sci.: 1140, 376-382.



6. Forero, J.E.; Ortiz, O.P.; Ríos, F. (2005); *Aplicación de Procesos de Oxidación Avanzada Como Tratamiento de Fenol en Aguas Residuales Industriales de Refinería*. Revista CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro: 3(1), 97-109.
7. Groenen-Serrano, K.; Savall, A.; Weiss, E. (2007); *A Comparison of Electrochemical Degradation of Phenol on Boron Doped Diamond and Lead Dioxide Anodes*. Journal of Applied Electrochemistry: 38(3), 329-337.
8. Hui, W.; Zhaoyung, B.; Guangm L.; Xiangjia, W.; Xiujuan, Y.; Dezhi, S. (2011); *Degradation of Phenol Using the Oxygen Diffusion Cathode in an Undivided Cell*. Advanced Materials Research: (183-185), 575-579.
9. Idris, A.; Saed, K. (2002); *Degradation of Phenol in Wastewater Using Anolyte Produced from Electrochemical Generation of Brine Solution*. Global Nest: the Int. J.: 4(2-3), 139-144.
10. Juttner, K.; Galla, U.; Schmierder H. (2000); *Electrochemical Approaches to Environmental Problems in the Process Industry* Electrochim. Acta: 45(15-16), 2575-2594.
11. Körbahti, B.K.; Tanyolac, A.(2003); *Continuous Electrochemical Treatment of Phenolic Wastewater in a Tubular Reactor*, Water Research: 37, 99-106.
12. Liu, H.; Li, X.Z.; Leng, Y.; Wang, C.(2007); *Kinetic Modeling of Electro-Fenton Reaction in Aqueous Solution*, Water Research: 41, 1161-1167.
13. Luyben, W.L. (1996); *Process Modeling, Simulation, and Control for Chemical Engineers*, 2da ed., McGraw-Hill, Singapur, Capitulo 11:376-407.
14. Ogata, K. (1997); *Ingeniería Moderna de Control*, 3ra ed., Prentice-Hall, México, Capitulo 10: 669-703.
15. Punjabi, P. B.; Lodha, S.; Vaya, D.; Ameta, R. (2008); *Photocatalytic Degradation of Phenol Red Using Complex of Some Transition Metals and Hydrogen Peroxide*. Journal the Serbian Chemical Society: 73(6), 631-639.
16. Regalado-Méndez, A.; Peralta-Reyes, E.; Velazquez-Manzanares, M. (2010); *Phenol Degradation: Numerical Simulation in Stirred Tank Electrochemical Reactor*. Int. J. of Computer Science and Information Technology: 2(2), 39-49.
17. Regalado-Méndez, A.; Álvarez-Ramírez, J. (2007); *Composition Control in Stirred Tank Chemical Reactors*. New Mathematics and Natural Computation: 3(3), 385-398.
18. Santos, A.; Yustos, P.; Rodríguez, S.; Vicente, F.; Romero, A. (2009); *Kinetic Modeling of Toxicity Evolution during Phenol Oxidation*. Ind. Eng. Chem. Res.: 48(6), 2844-2850.
19. Scott, K. (1991); *The continuous stirred tank electrochemical reactor*. An overview of dynamic and steady state analysis for design and modeling. Journal of Applied Electrochemistry: 21(11), 945-960.
20. SMARN-Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2010); NOM-088ECOL-1994, México D.F, México.
21. Tahar, N.B.; Salvall, A. (1999); *Electrochemical Degradation of Phenol in Aqueous Solution on Bismuth Doped Lead Dioxide: a Comparison of the Activities of Various Electrode Formulations*. Journal of Applied Electrochemistry: 29(3), 277-283.
22. Xiao-yan, L.; Yu-hong, C.; Yu-jie, F.; Zhao-ming, X.; Ji-Dong, G. (2005); *Reaction Pathways and Mechanisms of the Electrochemical Degradation of Phenol on Different Electrodes*. Water Research: 39(10), 1972-1981.

23. Yu-Jie, F.; Yu-Hong, C.; Xiau-Yan, L. (2011); *Kinetics and Efficiency Analysis of Electrochemical Oxidation of Phenol: Influence of Anode Materials and Operational Conditions*. Chemical Engineering Technology: 34(2), 265-272.
24. Zu-Cheng, W.; Yan-qing, C.; Quian, Y.; Tian-en, T. (2004); *Degradation of Chlorophenol by inn-situ Electrochemically Generated Oxidant*. Journal of Zhejiang University Science: 5(2), 180-185.
25. Zuchen, W.; Minhua, Z. (2001); *Partial Degradation of Phenol by Advanced Electrochemical Oxidation Process*. Environ. Sci. Technol.: 35(13), 2698-2703.