



Efectos del pH y la conductividad en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea*

Álvaro Arango Ruiz**

Effects of the pH and the conductivity on the electrocoagulation of waste water from dairy industries

Efeitos do pH e a condutividade na eletrocoagulação de águas residuais da indústria láctea

RESUMEN

Introducción. En los últimos años, y dada a la necesidad de investigar, adaptar e implementar tecnologías eficientes en la remoción de contaminantes de diversas aguas residuales, se ha considerado la electrocoagulación como alternativa viable en el tratamiento de los efluentes líquidos, razón por la cual ha cobrado un importante interés científico e industrial. **Objetivo.** Estudiar los efectos del pH y la conductividad sobre el proceso de electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. **Materiales y métodos.** Se trataron por electrocoagulación aguas residuales de la industria láctea; para ello se probó un diseño experimental factorial $3 \times 2 \times 3$ cuyas factores fueron: pH, densidad de corriente y tiempo de tratamiento. La variable de respuesta fue el porcentaje de remoción de DQO. Adicionalmente, se realizó un seguimiento al pH y a la conductividad del proceso. **Resultados.** Los mayores porcentajes de

*Artículo derivado del proyecto de investigación "Evaluación técnico-económica del uso de electrocoagulación en aguas residuales de la industria láctea", realizado en el año 2006 y financiado por la Corporación Universitaria Lasallista. **Ingeniero Químico, magíster en Ingeniería Ambiental. Candidato a Doctor en Ingeniería Ambiental. Docente investigador Grupo de investigación GAMA, Corporación Universitaria Lasallista

Correspondencia: alarango@lasallista.edu.co

Artículo recibido: 03/03/2012; Artículo aprobado: 15/05/2012

remoción de DQO se dieron para pH de 5, densidad de corriente de 43,23 A/m³ y 15 minutos de tratamiento; durante el proceso se observó un aumento del pH de hasta dos unidades y una disminución de la conductividad para pH ácido. **Conclusiones.** El tratamiento por electrocoagulación de las aguas residuales de la industria láctea es más efectivo para pH inicial del agua de 5, una densidad de corriente eléctrica de 43,23 A/m³ y un tiempo de 15 minutos, en estas condiciones se remueve el 93,99 % de la DQO. Durante este proceso de electrocoagulación se presenta un aumento del pH de la solución acuosa, que va de 1.5 y 2 unidades. Adicionalmente, la conductividad del medio acuoso presenta una disminución durante todo el tratamiento a estas condiciones.

Palabras clave: electrocoagulación, electrodo de hierro y aluminio, electroquímica.

ABSTRACT

Introduction. In recent years, and given the necessity to investigate, adapt and implement efficient technologies to remove pollutants from diverse kinds of waste waters, electrocoagulation has been considered as a feasible alternative to treat liquid effluents, so it has acquired an important scientific and industrial interest. **Objective.** To study the effects of pH and the conductivity on the electrocoagulation process performed to waste waters from dairy industries. **Materials and methods.** Waste waters from dairy industries were treated with electrocoagulation. To do so, a 3x2x3 factorial experimental design was tested. It had the following factors: pH, current density and time of treatment. The variable response was the COD removal percentage. Additionally, a monitoring to the pH and to the conductivity of the process was performed. **Results.** The highest COD removal percentages were those for the pH 5, current density of 43,23 A/m³ and 15 minutes of treatment. During the process, a pH increase up to two units was observed, and so was a conductivity reduction for the acid pH. **Conclusión.** The treatment with electrocoagulation for waste water from dairy industries is more effective for an initial pH value of 5 in the water, a density of electric flow of 43,23 A/m³ and a 15 minutes time. Under these conditions, 93,99 % COD is removed. During this electrocoagulation process there is a pH increase in the aqueous solution, from 1.5 to 2 units. Additionally, the conductivity of the aqueous medium has a reduction during the whole treatment to these conditions

Key words: electrocoagulation, iron and aluminum electrode, electrochemistry.

RESUMO

Introdução. Nos últimos anos, e dada à necessidade de pesquisar, adaptar e implementar tecnologias eficientes na remoção de contaminantes de diversas águas residuais, considerou-se a eletrocoagulação como alternativa viável no tratamento dos efluentes líquidos, razão pela qual cobrou um importante interesse científico e industrial. **Objetivo.** Estudar os efeitos do PH e a condutividade sobre o processo de eletrocoagulação de águas residuais da indústria láctea. **Materiais e métodos.** Trataram-se por eletrocoagulação águas residuais da indústria láctea; para isso se provou um desenho experimental fatorial 3x2x3 cujas fatores foram: PH, densidade de corrente e tempo de tratamento. A variável de resposta foi a porcentagem de remoção de DQO. Adicionalmente, realizou-se um seguimento ao PH e à condutividade do processo. **Resultados.** As maiores porcentagens de remoção de DQO se deram para PH de 5, densidade de corrente de 43,23 A m³/e 15 minutos de tratamento; durante o processo se observou um aumento do PH de até duas unidades e uma diminuição da condutividade para PH ácido. **Conclusões.** O tratamento por eletrocoagulação das águas residuais da indústria láctea é mais efetivo para PH inicial do água de 5, uma densidade de corrente elétrica de 43,23 A m³/ e um tempo de 15 minutos, nestas condições se remove o93,99 %DQO. Durante este processo de eletrocoagulação se apresenta um aumento do PH da solução aquosa, que vai de 1.5 e 2 unidades. Adicionalmente, a condutividade do meio aquoso apresenta uma diminuição durante todo o tratamento a estas condições

Palavras importantes: eletrocoagulação, eletrodo de ferro e alumínio, eletroquímica.

INTRODUCCIÓN

La coagulación y la floculación son operaciones fisicoquímicas convencionales muy comunes y ampliamente usadas en el tratamiento de las aguas residuales; estas operaciones buscan la aglomeración de las partículas de contaminantes presentes en forma disuelta o suspendida, para formar macroagregados que pueden ser removidos posteriormente, bien sea por sedimentación o por filtración.

La coagulación puede ser propiciada por agentes químicos o mediante la aplicación de corriente eléctrica al medio acuoso. La coagulación química es el método más ampliamente difundido y utilizado para la remoción de los contaminantes de las aguas residuales, pero esta tecnología está asociada a desventajas como los altos costos de los agentes químicos usados, los grandes volúmenes de lodos generados, la producción de hidróxidos metálicos categorizados como residuos peligrosos y los costos de los agentes químicos para efectuar la coagulación¹.

Como alternativa a la coagulación química, se ha usado la coagulación generada por la aplicación de corriente eléctrica al agua residual. El paso de corriente eléctrica a través del medio acuoso causa la desestabilización de las partículas que se encuentran, bien sea emulsionadas, suspendidas o disueltas, permitiendo su remoción por algún método de separación secundario. A este proceso se le denomina electrocoagulación; así pues, los contaminantes de muy diversos efluentes pueden ser removidos aplicando el principio de coagulación, pero en este caso no se hace uso de un coagulante químico, sino que esta función es llevada a cabo por corriente eléctrica que es inducida al medio acuoso a través de electrodos de diferentes metales, de los cuales el hierro y el aluminio son los más utilizados²⁻⁴.

Esta tecnología electroquímica se ha utilizado desde hace varias décadas en el tratamiento de aguas residuales, y ha mostrado una alta eficiencia en la remoción de contaminantes; los sistemas desarrollados han usado una gran variedad de geometrías en sus electrodos, las cuales han incluido placas, tubos, esferas, mallas de alambre y camas de esferas fluidizadas, entre otras¹. Igualmente, se han probado cátodos y ánodos de muchos materiales que se han seleccionado de acuerdo con la naturaleza de los contaminantes y del agua a tratar, pero los más ampliamente utilizados han sido el hierro y el aluminio, dados a su alta disponibilidad y bajos costos.

Los resultados obtenidos, en cuanto a porcentajes de remoción de contaminantes

y efectividad del tratamiento, han sido muy alentadores; la electrocoagulación logra remover los contaminantes en el agua hasta en un 99%⁵. Algunos ejemplos son:

- La remoción de aceites en aguas residuales de operaciones de limpieza, refinerías y procesamiento de alimentos es generalmente entre 95 y 99%.
- Sílica disuelta, arcilla, carbón y otros materiales suspendidos en agua son removidos hasta en un 98%.
- Metales pesados como arsénico, cadmio, plomo, cromo, níquel y zinc son generalmente reducidos entre 95 y 99%.
- La remoción de bacterias y virus en la potabilización de aguas municipales es de 99.999%.

A pesar de que la electrocoagulación es una tecnología que se conoce y se ha aplicado hace cerca de cien años, su investigación no se ha desarrollado sistemáticamente, de forma tal que genere un conocimiento estructurado que pueda predecir el comportamiento químico del proceso, reacciones y mecanismos, ni provea las herramientas suficientes para el diseño y operación de los reactores. En parte esto también se debe a la diversidad química de los contaminantes y de las aguas residuales, lo que genera una variabilidad de los sistemas electroquímicos que conforman el sistema de tratamiento, haciendo que este se comporte de manera particular⁶.

En los últimos años y dada a la imperante necesidad de investigar, adaptar e implementar tecnologías eficientes en la remoción de contaminantes de diversas aguas residuales, se ha reconsiderado la electrocoagulación como alternativa viable en el tratamiento de los efluentes líquidos; por ello, ha

cochado un importante interés científico e industrial, lo que permitirá avanzar sobre las dificultades que han dejado rezagada esta tecnología durante varias décadas.

Es así que nos enfrentamos al reto de investigar los parámetros que controlan el proceso de electrocoagulación de manera organizada y sistemática, con el fin de diseñar el proceso en su totalidad, desde su requerimiento de energía, naturaleza del agua a tratar, pH y conductividad, hasta la geometría de los reactores, para que de esta forma se pueda optimizar, adaptar y aplicar, ubicándola como una tecnología de punta que brinde sus ventajas en la protección y conservación del recurso hídrico.

Factores que afectan la electrocoagulación. Son muchos los factores que intervienen en el proceso de electrocoagulación; algunos de estos factores tienen mayor influencia sobre el proceso. A continuación se discuten aquellos que se relacionan más directamente con la efectividad del proceso.

pH. El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido⁷. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación; esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar⁸⁻¹⁰.

El pH, durante el proceso, puede incrementarse para aguas residuales ácidas¹¹, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo^{8, 12}; en contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer; a su vez, y dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso. Algunas aguas residuales presentan mejor eficiencia en la remoción de sus contaminantes al aplicar la electrocoagulación a pH básicos, y otras, a pH ácidos.

Se ha determinado, en algunos casos, que la mayor eficiencia en la remoción de un contaminante se da dentro de un rango específico de pH; incluso este rango puede ser amplio. En términos generales, las mejores remociones se han obtenido para valores de pH cercanos a 7¹³; ejemplos de esta situación se pueden ver en la remoción de arsénico en aguas de consumo: el mayor porcentaje de remoción de arsénico se da a pH entre 6 y 8¹⁴, y las mejores remociones de turbiedad y DQO en las aguas de la industria textil se dan a pH entre 7 y 9¹⁵.

Las reacciones que se promueven durante el proceso de electrocoagulación le dan al medio acuoso capacidad buffer especialmente en aguas residuales alcalinas. Esta propiedad previene grandes cambios de pH, con lo cual son menores las dosificaciones de sustancias químicas para regular el pH⁹.

Densidad de corriente. Como las variables eléctricas en el proceso de electrocoagulación son los parámetros que más influyen en la remoción del contaminante de un agua residual y están ligados a factores económicos, se debe prestar mayor atención a su estudio.

El porcentaje de remoción de un contaminante es dependiente de la corriente eléctrica aplicada al medio acuoso; es así como la eficiencia en la remoción y el consumo de energía incrementa con aumentos en la densidad de corriente¹⁶. Para algunas conductividades del medio acuoso, el consumo de energía incrementa proporcionalmente con los incrementos de densidad de corriente¹⁷, lo que conlleva a un consumo mayor de energía; para estos se presentan pérdidas por transformación de energía eléctrica en calórica, produciéndose un aumento en la temperatura del medio acuoso.

El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones (de aluminio Al^{+3} o hierro Fe^{+2}) liberados por los respectivos electrodos¹³. Una densidad de corriente demasiado grande puede producir una disminución significativa en la eficacia de la corriente. La selección de la densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación como pH y temperatura¹³.

La energía eléctrica que se suministra a la celda electroquímica puede ser mediante corriente alterna (CA) o bien como corriente directa (CD). Las características propias del paso de cada una de las corrientes a través del medio acuoso generan diferentes respuestas electroquímicas entre las placas

y el agua residual tratada. Cuando se suministra corriente directa se produce en el cátodo una impermeabilización, lo que causa una menor eficiencia en la remoción⁶.

Conductividad. Un incremento en la conductividad eléctrica genera un incremento en la densidad de corriente, manteniendo constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación; adicionalmente, el incremento de la conductividad que mantiene constante la densidad de corriente produce una disminución del voltaje aplicado^{10, 16}.

La adición de algunos electrolitos tales como NaCl o CaCl₂ genera un aumento en la conductividad del agua residual⁵; adicionalmente se ha encontrado que los iones de cloruro pueden reducir los efectos adversos de iones como HCO₃⁻ y SO₄^F pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos puede conducir a la precipitación de Ca⁺² y Mg⁺² produciendo una capa insoluble que se deposita sobre los electrodos, lo que aumenta el potencial entre los electrodos y decrece así la eficiencia de la corriente.

Temperatura. Los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente incrementa inicialmente hasta llegar a 60° C, para electrodos de aluminio, punto donde se hace máxima, para luego decrecer¹³.

Cuando se usan electrodos de aluminio, el incremento de la eficiencia con la temperatura es atribuida al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo. Similar a lo que sucede con la eficiencia de corriente, el consumo de energía también lleva a un máximo de 35° C.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo utilizando aguas residuales de la industria láctea a las cuales se les midió pH, DQO y conductividad eléctrica. Para establecer el diseño experimental se realizó una prueba de tamizado, consistente en la observación del comportamiento de diferentes variables fisicoquímicas en el medio acuoso; se recolectó información a priori que permitió determinar los valores de corriente eléctrica, distancia entre electrodos, tiempo de tratamiento y pH, que llevaron a tratamientos de electrocoagulación más eficientes para ser tenidos en cuenta en el diseño experimental; de este modo se diseñó un experimento completamente al azar con estructura factorial, con factores pH con niveles de 5, 7 y 8, densidad de corriente (j) con niveles 32.43 y 43.23 A/m² y tiempo (t) con observaciones a 5, 10 y 15 minutos. El pH de las soluciones se ajustó utilizando ácido sulfúrico e hidróxido de sodio, ambos grado reactivo.

El porcentaje de remoción para la DQO se determinó midiendo este parámetro antes y después de cada tratamiento por el método de micro-DQO calorimétrico. Durante el proceso se realizaron mediciones de pH y conductividad del medio acuoso. Todos los análisis se realizaron de acuerdo con los procedimientos establecidos por Standard Methods¹⁸.

La electrocoagulación se llevó a cabo por lotes en una celda con capacidad para dos litros, provista de seis electrodos, tres de hierro usados como electrodos de sacrificio y tres de aluminio con separaciones de un centímetro dispuestos alternadamente y en forma paralela, que se conectaron a una fuente de voltaje con control para la corriente en el rango de 0 a 25 A.

Para cada uno de los experimentos se realizaron tres repeticiones. Las variables de respuesta fueron el porcentaje de remoción de DQO y color.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la gráfica 1 se presentan los resultados obtenidos para la remoción de DQO a pH de 5, 7 y 8, y a las conductividades de 32,43 y 43.23 A/m² para tiempos de tratamiento de 5, 10 y 15 min, que correspon-

de al diseño experimental. En esta gráfica se puede observar que el porcentaje de remoción aumenta con el incremento de la conductividad y el tiempo de tratamiento, pero con la disminución del pH.

Para los tres pH utilizados en la experimentación, siempre se obtiene la mayor proporción de remoción de DQO cuando el tiempo es 15 minutos, la menor proporción cuando se tiene el tiempo de 5 minutos y una proporción promedio cuando se realiza durante 10 minutos. Vale la pena aclarar que los pH más adecuados para trabajar son de 5 y 7, en ese orden de importancia.

En cuanto al análisis de varianza para el análisis de dos factores pH-tiempo, se tiene lo siguiente:

Considerando solo los datos recolectados bajo una densidad de corriente igual a 32.43 A/m^2 , se obtiene un coeficiente de correlación R-cuadrado de 0.979198; esto significa que el diseño de dos factores explica el 97.92% de la variabilidad de la proporción de remoción de DQO, lo cual indica nuevamente un gran ajuste.

Igualmente, para los datos recolectados bajo una densidad de corriente igual a 43.23 A/m^2 , se observan resultados similares a los obtenidos en el caso anterior, es decir, el diseño de dos factores presenta un gran ajuste, explicando el 98.94% de la variabilidad de la proporción de remoción de DQO, y las pruebas de significancia de los efectos principales y de interacción de dos factores son significativas.

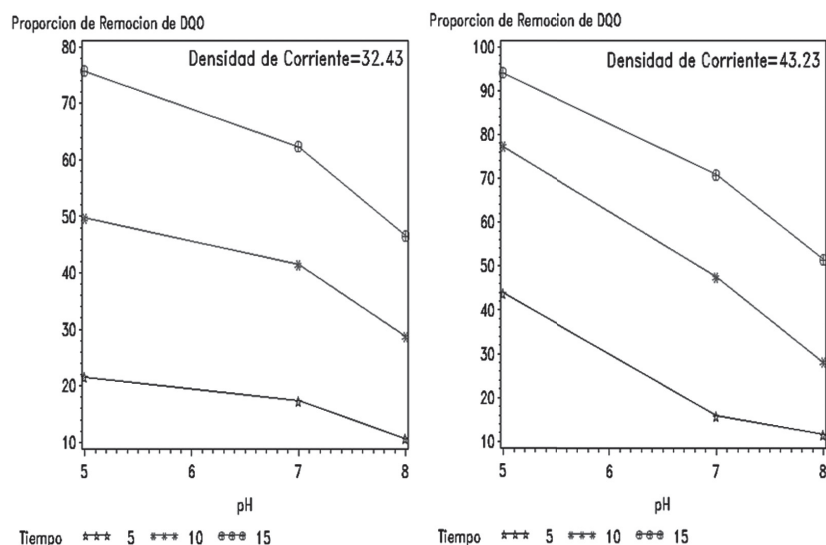


Gráfico I. Interacción pH-tiempo

En el gráfico 2 se muestra el pH final obtenido al aplicar la electrocoagulación con las diferentes combinaciones de tratamientos. Se puede observar que el pH durante el proceso de electrocoagulación aumenta con el tiempo en relación con el pH inicial del agua residual; el aumento es entre 1.5 y 2 unidades. Este aumento puede tener explicación dado que durante la electrocoagulación hay formación de hidróxido de hierro como producto de las reacciones asociadas al desgaste del electrodo de sacrificio.

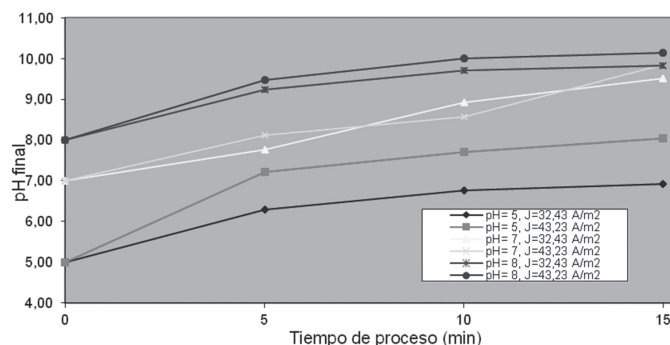


Gráfico 2. pH final para las diferentes combinaciones de tratamiento

El gráfico 3 muestra los porcentajes de disminución de la conductividad; en este se puede observar que para los dos procesos a pH de 5 la conductividad disminuye hasta en un 7% en los 15 minutos de proceso; con respecto a los tratamientos a los demás pH se observa que la conductividad aumenta entre los 5 y 15 minutos de proceso. Este comportamiento puede explicarse por la cantidad de hidróxido de hierro que se forma y al mismo tiempo por el aumento en el pH.

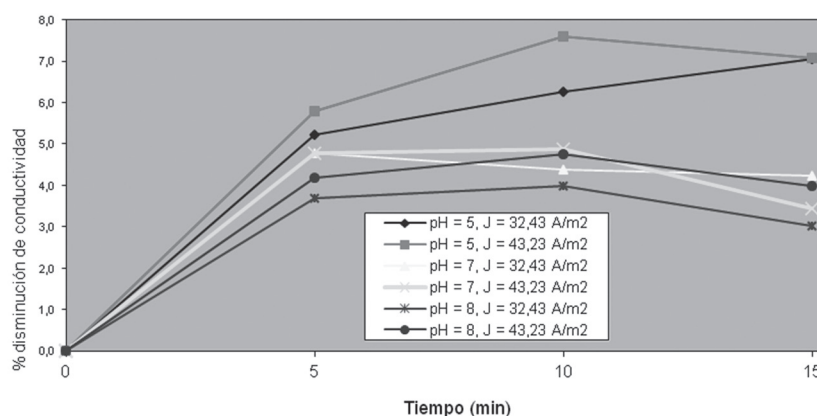


Gráfico 3. Porcentajes de disminución de la conductividad

CONCLUSIONES

Las condiciones óptimas que permiten obtener los mayores porcentajes de remoción de DQO como tratamiento de las aguas residuales de la industria láctea son pH inicial del agua de 5, una densidad de corriente eléctrica de 43,23 A/m³ y un tiempo de 15 minutos; estos valores son: para la DQO 93,99 %, el cual es muy elevados, seguido de las condiciones pH de 5, densidad de corriente de 43,32 A/m² y 10 minutos (remoción de DQO de 77,3%) o pH de 5, densidad de corriente de 32,43 A/m² y 15 minutos (remoción de DQO de 75,7%); estas últimas condiciones tienen un valor estadísticamente más bajo de la remoción de DQO.

Durante el proceso de electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea se observa un aumento del pH de la solución acuosa; este aumento está entre 1.5 y 2 unidades. Adicionalmente, la conductividad del medio acuoso presenta una disminución durante todo el tratamiento para el caso

de pH de 5, mientras que para los pH de 7 y 8 se da un aumento de conductividad a partir de los 5 minutos de tratamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. POWELL WATER SYSTEMS INC. Powell Electrocoagulation: Sustentable Technology For the Future. Colorado : Powell Water Systems Inc. 2001 p. 2-27 [En línea]. [Consultado el 16 de marzo de 2011]. Url disponible en: www.powellwater.com/data/technical%20manual.pdf
2. HOLT, Peter K.; *et al.* The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology. *En: Chemosphere.* 2005. Vol. 59. p. 355–367
3. RAJESHWAR, Krishnan and IBANEZ, Jorge. Environmental electrochemistry: fundamentals and applications. San Diego California, U.S.A.: Academic Press limited, 1997. 776 p.
4. STEPHENSON, Rob and TENNANT, Bruce. New electrocoagulation process treats emulsified oily wastewater at Vancouver Shipyards. [En línea]. Environmental Science & Engineering. Toronto: Enero de 2003. [consultado el 5 de noviembre de 2011]. Url disponible en: <http://www.esemag.com/0103/electro.html>
5. JIANG, Jia-Qian; *et al.* Laboratory study of electrocoagulation–flotation for water treatment. *En: Water Research.* 2002. Vol. 36. p. 4064– 4078
6. MOLLAH, M. Yousuf A.; *et al.* Electrocoagulation (EC) science and applications. *En: Science and applications. Journal of Hazardous Materials.* 2001. Vol. 84. p. 29–41
7. NOVA, José Luis; *et al.* Effective factors in an electrochemical reactor with rotating cylinder electrode for the acid-cupric/copper cathode interface process. *En: Chemical Engineering Science.* 2001. Vol. 56. p. 2697
8. GE, Jiantuan; *et al.* New bipolar electrocoagulation – electroflotation process for the treatment of laundry wastewater. *En: Separation and Purification Technology.* 2004. Vol. 36. p. 33–39.
9. KOBYA, Mehmet; Can, Orhan Taner and Bayramoglu, Mahmut. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *En: Journal of Hazardous Materials.* Vol. B100, (2003); pp. 163–178
10. BAYRAMOGLU, Mahmut, *et al.* Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. *En: Separation and Purification Technology.* 2004. Vol. 37. p. 117–125
11. MEJIA, Claudia y OSORIO, Víctor. Decoloración de aguas residuales con alto contenido de índigo por el método de electrocoagulación. *En: Revista Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia.* 2003. Vol. 29. p. 115–118
12. KUMAR, P. Ratna; *et al.* Removal of arsenic from water by electrocoagulation. *En: Chemosphere.* Vol. 55. 2004. p. 1245–1252
13. CHEN, Guohua; CHEN, Xueming, and YUE, Po Lock. Electrocoagulation and electroflotation of restaurant wastewater. *En: Journal of environmental engineering.* Sept. 2000. p. 858-863
14. KUMAR, P. Ratna; *et al.* Removal of arsenic from water by electrocoagulation. *En: Chemosphere.* 2004. Vol. 55. p. 1245–1252
15. BAYRAMOGLU, Mahmut; *et al.* Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. *En: Separation and Purification Technology.* Vol. 37. 2004. p. 117–125

16. CHEN, Xueming; CHEN, Guohua, and YUE, Po Lock. Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation. En: Chemical Engineering Science. 2002. Vol. 57. p. 2449-2455
17. LARUE, O.; *et al.* Electrocoagulation and coagulation by iron of latex particles in aqueous suspensions. En: Separation and Purification Technology. 2003. Vol. 31. p. 177-192
18. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION AND WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21 ed. Washington: EPA-AWWA-WPCF, 2005. p. 5-14 – 5-1