

Estudio comparativo del uso de electrodos de hierro y aluminio en el proceso de electrocoagulación de la vinaza

Comparative study of the use of iron and aluminum electrodes in the electrocoagulation process of vinasse

Elaine Ojeda-Armaignac, Romelia Hing-Cortón y Yudith González-Díaz

Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Sede Mella, Avenida de las Américas s/n, Apartado Postal 90500, Santiago de Cuba, Cuba, Teléfono 641695. eoa@fiq.uo.edu.cu.

Recibido: 5 de diciembre de 2012.

Aceptado: 12 de marzo de 2012.

Palabras vinaza, electrocoagulación, electrodos de hierro y de aluminio, consumo de energía.

Key words: vinasse, electrocoagulation, iron and aluminum electrodes, energy consumption.

RESUMEN. En la presente investigación se desarrolló un estudio comparativo entre el hierro y el aluminio, utilizados como materiales de electrodo en el proceso de electrocoagulación de la vinaza, para lograr la separación más eficiente de los sólidos que se utilizan como inhibidores de la corrosión y de la remoción de color como parámetro de calidad del proceso. La vinaza se obtiene como residuo del complejo azucarero Argeo Martínez de la provincia de Guantánamo. Se determinó que con electrodos de aluminio se separan más sólidos que con los de hierro y se logra menor consumo de energía. El valor técnico y económicamente factible de la densidad de corriente fue de $0,195 \text{ A/cm}^2$. Con el aumento de esta se obtiene mayor cantidad de sólidos en la espuma, mientras que el sólido que precipita permanece prácticamente constante independientemente del tipo de material utilizado en el electrodo. Se realizaron experimentos para determinar el efecto de algunas variables del proceso: densidad de corriente, tiempo de electrólisis y pH de la disolución, en la remoción de color. Con los electrodos de aluminio se obtuvo la mayor remoción de color (83,53 %), para una densidad de corriente $0,159 \text{ A/cm}^2$, un tiempo 7 min y pH 4,42, por lo que resultó el mejor material de electrodo. Además, el aluminio fue el material más económico, con él se alcanzó un costo de operación de $\$ 87,76 \cdot 10^{-3} \text{ /kg}$, y un consumo de energía de $5625 \cdot 10^{-4} \text{ kW.h/g}$ de sólidos removidos, mientras que para el hierro el costo fue de $\$ 198,92 \cdot 10^{-3} \text{ /kg}$ y el consumo de energía de $8460 \cdot 10^{-4} \text{ kW.h/g}$ de sólidos obtenidos.

ABSTRACT. In the present study a comparative study between iron and aluminum as electrode materials for the electrocoagulation process of vinasse was carried out, to achieve more efficient separation of solids used as corrosion inhibitors, and color removal as a quality parameter of the process. The stillage is obtained as wastewater from the Argeo Martinez sugar complex in Guantanamo province. It was determined that aluminum electrodes are separated more solids than with iron and less energy consumption obtained. The technical and economic feasible value of the current density was 0.195 A/cm^2 . With increasing current density results in greater amount of solids in the foam, while the solid that precipitates remains practically constant regardless of the type of electrode material. Pilot tests were conducted to determine the effect of the process variables: density, electrolysis time and pH dissolution in the color removal. With aluminum electrodes had the highest color removal (83,53 %), to: current density 0.159 A/cm^2 , time 7 min and pH 4.42, resulting the best electrode material. The results showed that aluminium was the most cost-reducing material, yielding an operational cost of $\$ 87.76 \cdot 10^{-3} \text{ /kg}$ and the energy consumption of $5.625 \cdot 10^{-4} \text{ kW . h/g}$ of the solids obtained, while the cost for iron was $\$ 198.921 \cdot 10^{-3} \text{ /kg}$ and the energy consumption of $8.46 \cdot 10^{-4} \text{ kW . h/g}$ of the solids obtained.

INTRODUCCIÓN

Estudios realizados concluyen que después de la destilación de alcohol, se obtienen aproximadamente de 12 a 15 L de vinaza por cada litro de alcohol producido. Las vinazas de las destilerías de alcohol etílico, son residuos que entre sus características más relevantes se destaca el pH bajo, gran carga orgánica e inorgánica DQO (50 000 – 100 000 mg/L), DBO (45 000 – 65 000 mg/L), elevada temperatura y la presencia de compuestos nitrogenados entre los que se destacan: proteínas, aminoácidos y vitaminas.¹⁻⁷

Las vinazas se caracterizan además por presentar color marrón muy oscuro, que se debe a la presencia de melanoidinas, las cuales constituyen el 70 – 80 % del peso de las sustancias que le confieren el color. Las melanoidinas son polímeros de alto peso molecular, que pueden bloquear el paso de la luz en ríos y cursos de agua donde sean vertidos estos residuos con afectación de la fotosíntesis y. por tanto, la oxigenación necesaria para la vida acuática. Estos polímeros son recalcitrantes a la biodegradación e interfieren en la aplicación de los métodos convencionales anaerobios-aerobios de tratamientos, lo que ha conducido a la búsqueda de alternativas para la decoloración de este tipo de efluentes.⁸⁻¹¹

La variada composición que posee este residuo, fundamentalmente la presencia de grupos nitrogenados, hace factible su reutilización en diversos campos. La valorización de residuos industriales resulta una alternativa atractiva que permite, al mismo tiempo, el tratamiento adecuado y su aprovechamiento mediante un valor agregado. Estudios realizados por la autora han reportado la obtención de sólidos inhibidores a partir de la vinaza, mediante la electrocoagulación, como una valorización de este residuo.¹²⁻¹⁴

La electrocoagulación es un método de tratamiento electroquímico simple, confiable y de costo efectivo para el tratamiento de aguas residuales que no necesitan la adición de productos químicos y por tanto, de contaminantes secundarios. Por medio de esta técnica, se desestabilizan los contaminantes suspendidos, emulsificados o disueltos en un medio acuoso. La electrocoagulación, también, se reporta en la literatura como proceso adecuado para reducir la contaminación que provoca la vinaza en el ecosistema donde sea vertida, fundamentalmente, para la disminución de la remoción de color, DQO, DBO₅ y turbiedad.¹⁵⁻¹⁸

El proceso se lleva a cabo induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas, que constituyen los ánodos y cátodos, electrodos consumibles generalmente de hierro o aluminio, por los cuales fluye la corriente necesaria.¹⁹ El coagulante se genera *in situ*, por oxidación electrolítica del ánodo al pH apropiado. El hidróxido provoca la remoción de una variedad de contaminantes, y neutraliza las cargas electrostáticas de los sólidos suspendidos y de las emulsiones que facilitan la aglomeración o coagulación y como resultado, se alcanza su separación de la fase acuosa.

Los principales factores que influyen en la eficiencia del proceso de electrocoagulación son: pH, tiempo de residencia, material de los electrodos e intensidad de corriente.¹⁹⁻²³

El material de los electrodos varía de acuerdo con el tipo de sistema utilizado, estos pueden ser de hierro, de aluminio, cobre, acero o aleaciones de aluminio y magnesio. Dos de los metales más utilizados son el hierro y el aluminio. Los electrodos son de sacrificio, según la Ley de Faraday, debido a que en el proceso electrolítico migran hacia el seno del agua residual los iones que desestabilizan los coloides. La eficiencia de los electrodos depende de la concentración, tipo de contaminante y la velocidad de agitación. Por ello, se debe hacer un estudio preliminar para su correcta selección.

La densidad de corriente determina la cantidad de iones liberados por los respectivos electrodos y por tanto, la dosificación del hidróxido a la disolución, también determina

la densidad de producción de las burbujas. La selección de la densidad de corriente debe realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación, como el pH y el tiempo. Para cada residuo existe un intervalo de pH óptimo para el cual la coagulación, mediante la formación de los hidróxidos, sucede rápidamente. El intervalo de pH es función del tipo de electrodo a ser utilizado y de la naturaleza del agua a tratar. En todos los modelos propuestos, la velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo. La permanencia del agua en un reactor electrolítico durante un tiempo inferior o superior al óptimo produce resultados inferiores, tanto más acentuados cuanto más se aleje este del tiempo óptimo de floculación.

La presente investigación tuvo como propósito determinar, entre el hierro y el aluminio, cual es el material de electrodo que logra la mayor remoción de color, así como la separación eficiente de los sólidos desde el punto de vista técnico-económico. Otro aspecto de la investigación consistió en analizar el efecto de las variables: densidad de corriente, tiempo de electrólisis y pH en la remoción de color de la vinaza, utilizando de forma comparativa electrodos de hierro y aluminio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El residual de la investigación fue la vinaza, que se obtiene de la destilación alcohólica que se lleva a cabo en el complejo azucarero Argeo Martínez de la provincia de Guantánamo, cuando se parte de las mieles finales de la caña de azúcar.

Para la electrocoagulación de la vinaza se utilizó una celda electrolítica a escala de laboratorio (Figura 1), constituida por un reactor intermitente de vidrio con un volumen de vinaza de 350 mL a temperatura ambiente, equipada con dos electrodos planos de aluminio o de hierro dispuestos verticalmente, cuyas dimensiones totales fueron: 68 mm de largo, 40 mm de ancho y 1 mm de espesor, con un área total efectiva de 56,56 cm² y espaciados 15 mm. Para energizar el sistema se utilizó una fuente de corriente directa que regula la corriente y el voltaje aplicado, mediante la conexión del amperímetro y el voltímetro en serie y paralelo respectivamente. Los electrodos se conectaron en paralelo.

Durante la electrocoagulación el volumen de espuma se incrementa, la cual constituye parte de los sólidos que se separan, los otros sólidos precipitan. Cuando finaliza el tiempo prefijado, se abre el circuito, se separa la espuma y se evacua el líquido a un recipiente, la espuma se seca en la estufa a 40 °C durante 72 h, el líquido tratado se centrifuga para la separación de los sólidos precipitados, el sólido centrifugado se extrae en forma de lodo y se seca en la estufa a la misma temperatura y tiempo que la espuma. Los sólidos secos se pesan y envasan.

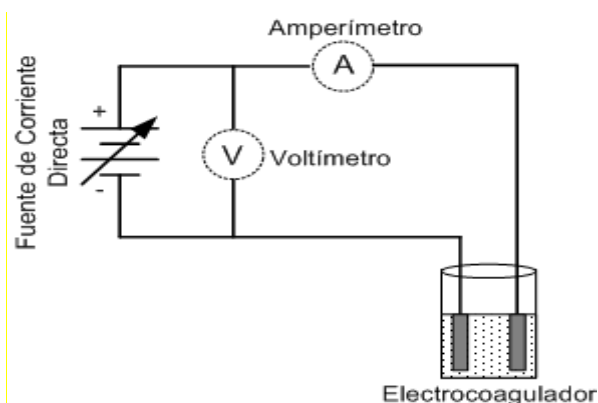


Fig. 1. Esquema del circuito eléctrico de la instalación experimental de electrocoagulación utilizada.

La electrocoagulación se realizó con hierro y aluminio como materiales de electrodos utilizada. En cada caso se estudiaron los parámetros que se indican a continuación: densidades de corriente (i) comprendidas entre 0,018 y 0,265 A/cm², pH de 3 a 7 y tiempo de electrólisis entre 1 y 8 min. Los sólidos obtenidos y la remoción de color del líquido residual fueron las variables de respuesta evaluadas.

La valoración espectrofotométrica del color del líquido residual se realizó mediante la determinación de la luminancia (%), según refiere el Standard Methods.²⁴ El método consistió en la medición del porcentaje de transmitancia de la muestra para el conjunto de longitudes de onda específicas de 400 a 700 nm, utilizando agua destilada como blanco. La suma de los porcentajes de transmitancia multiplicada por un factor (0,1) arroja el valor de luminancia. Las muestras de la vinaza residual se diluyeron (1/10) de modo que su transmitancia para las 10 longitudes de onda para las cuales se midió no fuera menor del 10 %. Las longitudes de onda (nm) determinadas fueron: 489, 515, 529, 541, 551, 561, 572, 584, 600, 627.

La remoción de color se calculó mediante la ecuación:

$$\%R = \frac{A_i - A_f}{A_i} \cdot 100 \quad (1)$$

$$A = 2 - \log L \quad (2)$$

donde:

L luminancia.

A_i: absorbancia de la vinaza antes de la electrocoagulación.

A_f absorbancia de la vinaza después de la electrocoagulación, % R: Porcentaje de remoción de color.

En el estudio económico preliminar se determinó el costo de operación. Se tomó en consideración que el costo del tratamiento electroquímico depende principalmente de la energía eléctrica (costo utilitario) y del costo de los ánodos (costo del electrodo). El proceso de cálculo realizado se describe a continuación.^{25,26}

$$E = U \cdot I \cdot t \quad (3)$$

$$\phi = \frac{\Delta M_{teórico}}{\Delta M_{experimental}} \quad (4)$$

$$\Delta M_{teórico} = \frac{M \cdot I \cdot t_{EC}}{n \cdot F} \quad (5)$$

$$S_{ee} = \frac{N \cdot F \cdot U}{3600 \cdot M \cdot \phi} \quad (6)$$

$$\text{Costo de operación} = C_o = a \cdot C_{energía} + b \cdot C_{electrodo}$$

donde:

E Energía eléctrica (kW.h).

U Voltaje de la celda (V).

t Tiempo de electrólisis (s).

M Peso molecular del hierro (g·mol⁻¹).

I Intensidad de corriente (A).

n Número de electrones.

F Constante de Faraday (96487 c. mol⁻¹).

Ψ Eficiencia de la corriente (%).

ΔM_{experimental} Pérdida experimental que sufre el electrodo (g).

ΔM_{teórico} Pérdida teórico que experimenta el electrodo según la Ley de Faraday (g).

- a Precio de energía eléctrica (\$/kW.h).
- b Precio del material del electrodo (\$/g de electrodo consumido).
- C_o Costo de operación (\$/g sólido removido).
- $C_{energía}$ Consumo de energía (kW.h/g sólido removido).
- $C_{electrodo}$ Consumo del electrodo ([g] electrodo consumido [g] sólido removido [g]).
- S_{ee} Consumo de energía eléctrica específica (kW-h/g de electrodo consumido)
- T_{EC} Tiempo de electrocoagulación (s)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de la densidad de corriente en la eficiencia de la remoción de color y la obtención de sólidos

En cuanto a los sólidos en la espuma (Fig. 2), al incrementarse la densidad de corriente, los procesos en los electrodos aumentan proporcionalmente a ella, de forma lineal según la Ley de Faraday;²⁰ con lo que se acelera el proceso de desprendimiento de gases y se favorece el ascenso de los sólidos en la espuma, lo que dificulta el proceso de formación de los sólidos que precipitan. El comportamiento que se analiza es el mismo para ambos electrodos (hierro y aluminio), aunque se observó que con electrodos de aluminio la cantidad de sólidos obtenidos es mayor que con electrodos de hierro, en todos los casos (Figuras 2 y 3).

Para que una sustancia se concentre en la superficie de una disolución, debe estar formada por moléculas que tengan una estructura fuertemente asimétrica, que contenga tanto grupos polares como no polares llamados hidrofílicos e hidrofóbicos respectivamente. A causa de tal estructura asimétrica, las moléculas en la capa superficial se orientan de forma tal que los grupos hidrofóbicos van hacia el aire y en general a la fase menos polar. De este modo, la condición de flotabilidad es una fuerte adhesión entre las partículas hidrofóbicas y las burbujas, las que tienen que ser capaces de soportar la agitación y la turbulencia en la celda, al contrario de las partículas que constituyen el sólido que forma los flocos que precipitan y que son hidrofílicos. Esto justifica el resultado relacionado con los sólidos obtenidos en la espuma, los cuales se incrementan de forma lineal mientras que los que precipitan se mantienen casi constantes e independientes de la densidad de corriente porque la producción de burbujas dificulta su precipitación (Fig. 2).

En los intervalos de densidad de corriente comprendidos entre 0,088 y 0,195 A/cm² la energía eléctrica consumida (kW-h)/el consumo de energía (g) de sólidos obtenidos permanece sin cambios considerables (Fig. 4), tanto para los electrodos de aluminio como de hierro, mientras que los sólidos aumentan para ambos materiales en ese mismo intervalo (Fig. 3). Se pudo comprobar, además, que con electrodos de aluminio a densidades de corriente comprendidas entre 0,195 y 0,265 A/cm² la variación de los sólidos obtenidos es poca, aunque se obtienen las mayores cantidades de sólidos; sin embargo, el consumo de energía aumenta casi el doble en esos mismos intervalos (Figuras 3 y 4). Con electrodos de aluminio se obtienen menores consumos de energía y mayores cantidades de sólidos que con electrodos de hierro (Fig. 4). Asimismo, resulta 0,195 A/cm². Asimismo, la densidad de corriente factible técnica y económicamente resulta.

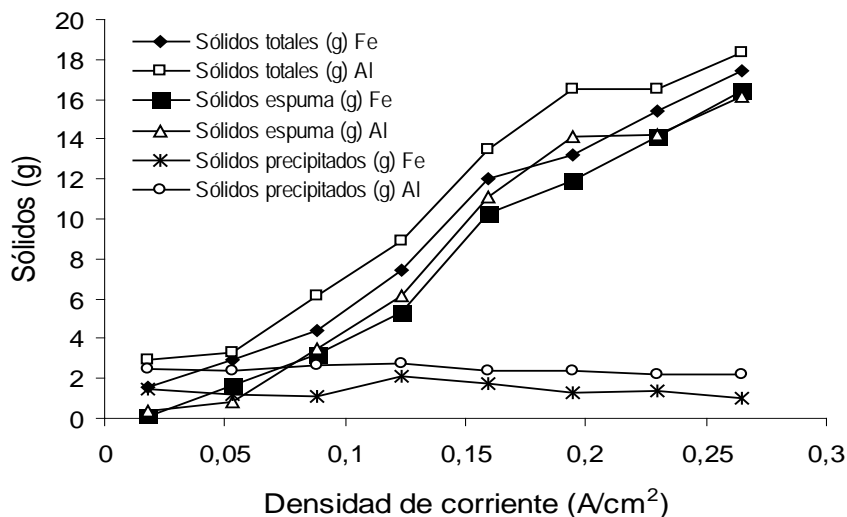


Fig. 2. Variación de los sólidos obtenidos en la espuma y los sólidos totales en función de la densidad de corriente ($pH = 4,42$, $t_{EC} = 5 \text{ min}$).

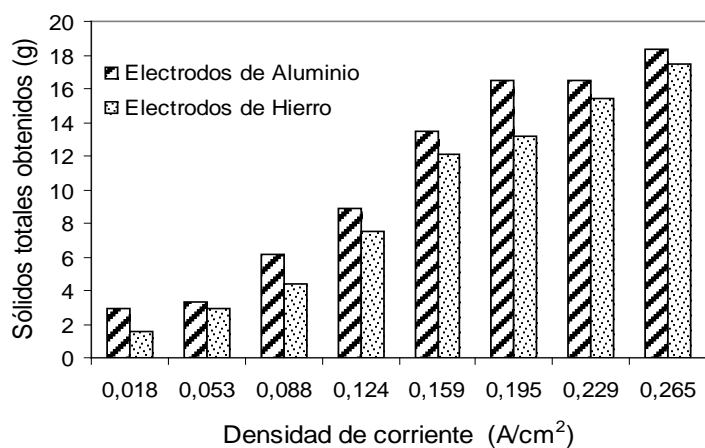


Fig. 3. Variación de la cantidad de sólidos obtenidos.

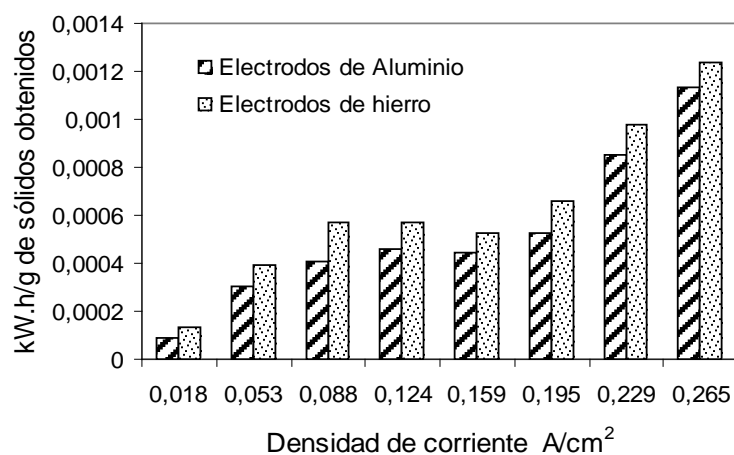


Fig. 4. Variación del consumo de energía en función del material del electrodo y la densidad de del material del electrodo y la densidad de corriente.

Se comprobó que con electrodos de aluminio (Fig. 5), y una densidad de corriente superior a $0,159 \text{ A/cm}^2$, se produce un aumento despreciable de la remoción de color, sin embargo, a $0,195 \text{ A/cm}^2$ se obtienen $18,84 \text{ g}$ de sólidos, cantidad mayor que para $0,159 \text{ A/cm}^2$. El comportamiento de la eficiencia de la remoción de color con electrodos de aluminio, se atribuye a que a densidades de corriente mayores de $0,159 \text{ A/cm}^2$, durante el proceso de tratamiento se produce la transformación de compuestos y no necesariamente la degradación de la materia orgánica, por lo que permanecen en el medio determinadas sustancias cromóforas.

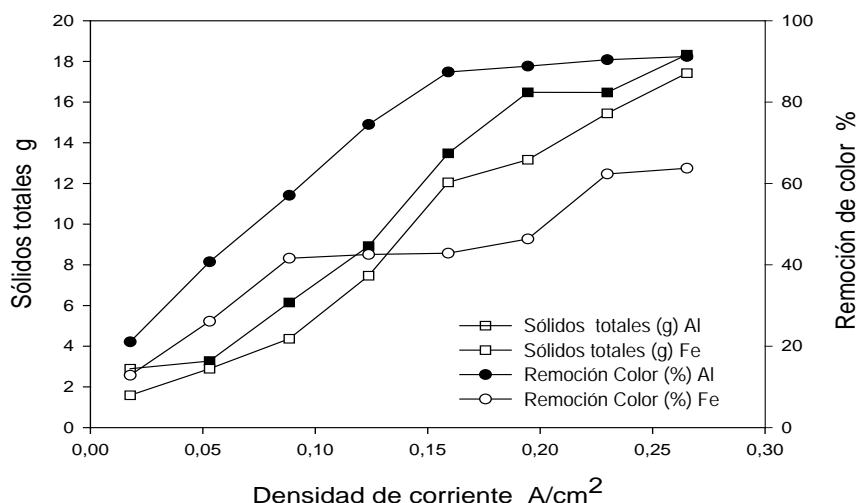


Fig. 5. Variación de los sólidos totales y de remoción de color en función de la densidad de corriente

($\text{pH} = 4,42$, $t_{\text{EC}} = 5 \text{ min}$).

Con electrodos de hierro (Fig. 5), se observó que en el intervalo de densidad de corriente de $0,018$ a $0,088 \text{ A/cm}^2$ se produce un incremento de forma lineal de la remoción de color, sin embargo, en el intervalo de densidad de corriente entre $0,088$ y $0,195 \text{ A/cm}^2$ el porcentaje de remoción aumenta pero lentamente, lo cual se atribuye, no tanto a la degradación de las moléculas orgánicas, sino a la transformación de los iones hierro, los cuales promueven la formación de compuestos coloreados aportando color a la vinaza. A densidades de corriente superiores la remoción de color aumenta proporcionalmente al aumento de la densidad de corriente, ya que una vez concluida la transformación de los iones hierro continúa el proceso de formación de los hidróxidos y la adsorción de las impurezas para la formación de los agregados. En cuanto a los sólidos, se evidenció, una vez más, que la cantidad de sólidos aumenta proporcionalmente con la densidad de corriente y que con electrodos de aluminio se remueve más cantidad de sólidos y además se produce un mayor porcentaje de remoción de color que con electrodos de hierro.

Los resultados demuestran que con electrodos de aluminio la densidad de corriente factible técnica y económicamente es $0,195 \text{ A/cm}^2$, ya que se obtiene un $88,84 \%$ de remoción de color y $52,9 \cdot 10^{-5} \text{ kW.h/g}$ de sólidos removidos (Fig. 6). Mientras que con electrodos de hierro como ánodo, la densidad de corriente factible técnica y económicamente es $0,229 \text{ A/cm}^2$, que se obtiene un $62,33 \%$ de remoción de color y $77,134 \cdot 10^{-5} \text{ kW.h/g}$ de sólidos removidos. A esta densidad de corriente no se produce un aumento apreciable de la remoción de color. De manera general, se concluye que con

electrodos de aluminio hay una mayor remoción de color y un menor consumo de energía que cuando se emplean electrodos de hierro.

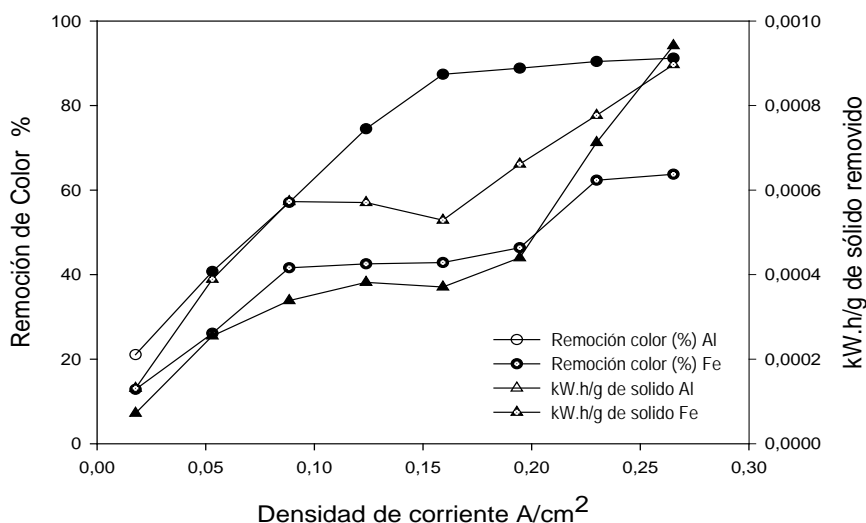


Fig. 6. Variación de la remoción de color y de los kW.h/g de sólido obtenido en función de la densidad de corriente con electrodos de Al y de Fe.

Efecto del tiempo de electrólisis

El tiempo de electrólisis determina la velocidad de producción de los cationes metálicos, tanto de Al^{3+} como de Fe^{2+} según el material de los electrodos utilizados en el proceso, que a su vez, facilitan la formación de los hidróxidos que actúan como coagulantes.

Con electrodos de aluminio como ánodos, los ensayos fueron realizados a una densidad de corriente de $0,195 \text{ A/cm}^2$, pH de 4,42 y tiempo comprendido entre 1 y 7 min. Los resultados revelaron que con los electrodos de aluminio se obtienen elevados porcentajes de remoción de color, aún a bajos tiempos de electrólisis (Fig. 7). Aunque la variación del porcentaje de color removido es poca entre 1 y 4 min, a 5 min se observa un aumento hasta mantenerse casi constante para el resto de los tiempos. En consecuencia, el mejor tiempo de electrólisis fue de 5 min para el que se alcanza una remoción de color de 83,32 %.

Con electrodos de hierro los ensayos fueron realizados a una densidad de corriente de $0,229 \text{ A/cm}^2$, tiempo variable entre 1 y 8 min y pH de 4,42. Se observó (Fig. 7), que en este caso, en los tiempos comprendidos entre 1 y 4 min, la remoción de color disminuye como consecuencia del aumento de la coloración de la disolución, lo cual se atribuye a que ocurren reacciones que pueden originar compuestos coloreados en esos primeros tiempos debido a la transformación de los iones hierro. Sin embargo, para tiempos mayores esas transformaciones se estabilizan y se forman los hidróxidos que constituyen los gérmenes de cristalización para la posterior formación de los agregados, aumentando de forma progresiva el porcentaje de remoción de color, hasta alcanzar aproximadamente un 72 %.

Los resultados también indicaron que con electrodos de hierro se requieren tiempos grandes para la obtención de una significativa remoción de color mientras que resultan mucho menores con el uso de electrodos de aluminio. En estudios realizados por otros investigadores, se reporta que la dosis requerida de coagulante depende de la concentración de material húmico, también se refiere que la coloración que muestra la vinaza se debe a la presencia de material húmico.^{11,27} En consecuencia, de acuerdo con

los resultados mostrados el tiempo de electrólisis recomendable para el uso de electrodos de hierro es de 8 min con el que se obtendría una remoción de color del 71,85 %.

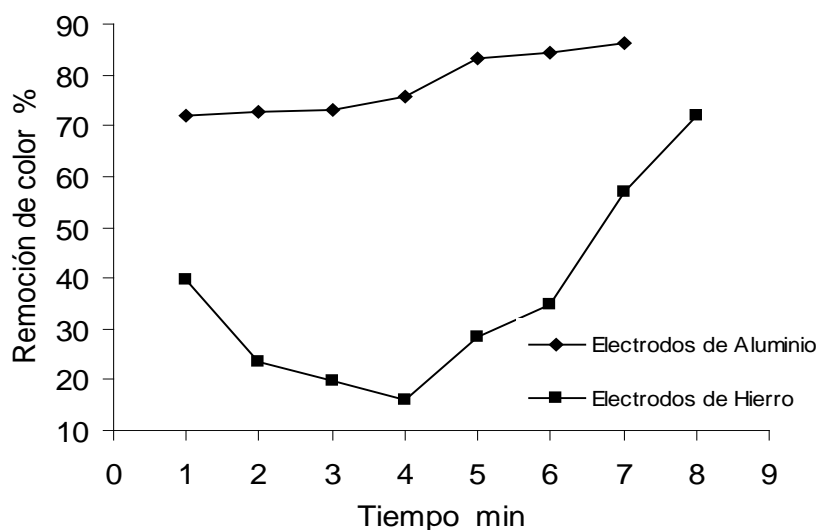


Fig. 7. Variación de la remoción de color en función del tiempo de electrólisis.

Efecto del pH inicial en la eficiencia de remoción de color

El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido, considerado como una de las variables más importantes, por participar directamente en el equilibrio de la hidrólisis que determina el origen de las diversas especies en disolución.

El intervalo de pH es función del tipo de electrodos que se utiliza y de la naturaleza del agua residual que se trata. En general, las mejores remociones de contaminantes se han obtenido a pH cercanos a 7.²² Para cada material de electrodo estudiado, la vinaza fue ajustada al pH deseado por adición de una disolución de hidróxido de sodio o de ácido sulfúrico, a las mejores condiciones determinadas en los ensayos de variación de densidad de corriente y tiempo de electrólisis.

Con los electrodos de aluminio el efecto del pH en la remoción de color de la vinaza fue analizada a la densidad de corriente de $0,195 \text{ A/cm}^2$ y tiempo de 5 min y con electrodos de hierro las condiciones fueron de $0,229 \text{ A/cm}^2$ de densidad de corriente y tiempo de 8 min. Los resultados revelaron, (Fig. 8), que con electrodos de aluminio como ánodo, en el intervalo de pH estudiado, se obtiene una remoción de color con poca variación, que oscila entre 78,97 y 83,53 % mayor que con los electrodos de hierro. La mayor remoción de color se alcanza cuando el pH de la vinaza se encuentra entre 3 y 4,42 (pH original).

Cuando se trabaja con electrodos de hierro, los resultados indican que cuando el pH aumenta desde el original de la vinaza hasta pH 7 la remoción aumenta hasta un máximo de 79,84 %. Como la diferencia de la remoción de color es tan poca entre pH 7 y 6 se considera el pH 6 como el mejor valor, teniendo en cuenta que se tiene que añadir menos reactivo para alcalinizar la disolución. A pH bajos, los hidróxidos formados permanecen en la disolución, pero a medida que aumenta este, se propicia la formación de $[\text{Fe}(\text{OH})_{3(s)}]$ y $[\text{Fe}(\text{OH})_{2(s)}]$, los cuales presentan estructuras amorfas, largas áreas superficiales, cargas positivas y propiedades hidrofóbicas que favorecen la interacción con las partículas orgánicas, beneficiando la floculación de los sistemas coloidales presentes en la vinaza tratada y su posterior sedimentación.

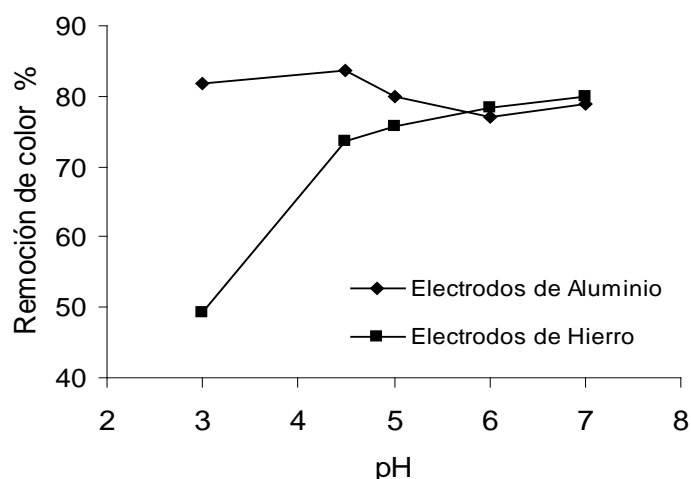


Fig. 8. Variación de la remoción de color en función del pH.

Análisis del costo de operación

El consumo de energía eléctrica y la eficiencia de la corriente son parámetros económicos muy importantes en el proceso de electrocoagulación de modo similar a otros procesos electrolíticos (el proceso de cálculo se describió en Materiales y Métodos). El cálculo de la eficiencia de la corriente (ϕ) se basó en la comparación de la pérdida de peso experimental de los electrodos ($\Delta M_{\text{experimental}}$) durante el proceso de electrocoagulación con la cantidad teórica de metal disuelto ($\Delta M_{\text{teórico}}$) de acuerdo con la Ley de Faraday (ecuación 5). Cuando se trabaja con aluminio, el $\text{Al}(\text{OH})_3 (\text{s})$ es la especie química formada, el número de electrones en la reacción es igual a 3. En el caso del hierro, el $\text{Fe}(\text{OH})_2 (\text{s})$ es la especie formada y el número de electrones en la reacción es igual a 2. El consumo de energía eléctrica específica se determinó como una función de la cantidad de electrodo consumido (ecuación 6).

El costo de operación incluyó el costo del material (electrodos) y el costo utilitario (principalmente energía eléctrica), se expresó como kW.h/g de sólidos removidos.

Los cálculos fueron realizados para los parámetros operacionales técnicamente factibles en el proceso de electrocoagulación. Con electrodos de aluminio ($i = 0,195 \text{ A/cm}^2$, $t = 5 \text{ min}$, $\text{pH} = 4,42$), y con electrodos de hierro ($i = 0,229 \text{ A/cm}^2$, $t = 8 \text{ min}$, $\text{pH} = 6$). (Tabla 1)

Tabla 1. Parámetros característicos calculados para el proceso de electrocoagulación en las mejores condiciones de trabajo.

Material de los electrodos	%RC	$C_{\text{energía}}$ (kW . h/g de sólidos removidos)	$\Delta M_{\text{experimental}}$ (g)	$\Delta M_{\text{teórico}}$ (g)	ϕ (%)	See kW . h/g de Al disuelto	Co (\$/kg) 10^3
Al	90,15	$5,625 \cdot 10^{-4}$	0,36	0,352	97,78	21,85	87,76
Fe	79,92	$8,460 \cdot 10^{-4}$	1,5	1,250	83,35	6,800	198,92

% RC ____ $C_{\text{energía}}$ Consumo energético $\Delta M_{\text{experimental}}$ ____ $\Delta M_{\text{teórico}}$ ____

Los resultados demostraron que el mejor material de electrodo es el aluminio, además de que se obtienen una mayor remoción de color, en el análisis económico todos los parámetros resultaron factibles económicamente, con un menor consumo de energía, mayor eficiencia de la corriente y menor costo de operación.

CONCLUSIONES

Se determinó que a medida que aumenta la densidad de corriente en el proceso de electrocoagulación de la vinaza, se obtiene mayor cantidad de sólidos en la espuma, mientras que el sólido que precipita en el líquido permanece prácticamente constante, siendo este comportamiento independiente del material de los electrodos empleados. Se comprobó además que con electrodos de aluminio se obtiene mayor cantidad sólidos y menor consumo de energía, siendo $0,195 \text{ A/cm}^2$ la densidad de corriente factible técnica y económicamente.

Las mejores condiciones de operación para la remoción de color con electrodos de aluminio son: densidad de corriente $0,195 \text{ A/cm}^2$, tiempo 5 min y pH 4,42 y con electrodos de hierro: densidad de corriente $0,229 \text{ A/cm}^2$, tiempo 8 min y pH 6, siendo los primeros, los que más color remueven en la vinaza electrocoagulada.

Los mejores electrodos de trabajo son los de aluminio, ya que con su empleo se logra una mayor remoción de color y se remueven más sólidos con un menor consumo de energía que cuando se emplean los de hierro. De igual manera, desde el punto de vista económico también resultan los mejores, al garantizar para los valores técnicamente factibles un costo de operación más bajo ($87,76 \cdot 10^{-3} \text{ \$/kg}$ de sólidos removidos), que los de hierro ($198,924 \cdot 10^{-3} \text{ \$/kg}$ de sólidos removidos).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Kannan N, Karthikeyan G, Tamilselvan N, Comparison of treatment potential of electrocoagulation of distillery effluent with and without activated Areca catechu nut carbon. *Journal of Hazardous Materials*. 2006: B137: 1803-1809.
2. Kotrappanavar NS, Hosamani KM, Aminabhavi TM. Distillery wastewater treatment by the membrane-based nanofiltration and reverse osmosis processes. *Water Research*. 2006: 40: 2349–2356.
3. Krishna PR, Srivastava SN. Electrochemical degradation of distillery spent wash using catalytic anode: Factorial design of experiments. *Chemical Engineering Journal*. 2009:146: 22-29.
4. Kumar M, Ponselvan F, Anto I. Treatment of bio-digester effluent by electrocoagulation using iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials*. 2009: 165: 345-352.
5. Manisankar P, Rani C, Viswanathan S. Effect of halides in the electrochemical treatment of distillery effluent. *Chemosphere*. 2004: 57: 961-966.
6. Mohana S, Acharya K, Madamwar D. Distillery spent wash: Treatment technologies and potential applications. *Journal of Hazardous Materials*. 2009: 163: 12-25.
7. Yavuz Y. EC and EF processes for the treatment of alcohol distillery wastewater. *Separation and Purification Technology*. 2007: 53: 135-140.
8. Satyawali Y, Balakrishnan M. Wastewater treatment in molasses-based alcohol distilleries for COD and color removal: A review. *Journal of Environmental Management*. 2008: 86: 481-497.
9. Sayas KA, Sevki YY, Keskinler B, Demircioglu N. Effect of initial pH on the removal of humic substances from wastewater by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*. 2008: 59: 175-182.

10. Villalobos CF. Disminución de la materia orgánica biodegradable presente en vinazas mezcaleras mediante digestión anaerobia. [Tesis de grado]. Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2009. Huajuapán de León, Oaxaca, Mexico.
11. Yýldýz YS, Koparal AS, Keskinler B. Effect of initial pH and supporting electrolyte on the treatment of water containing high concentration of humic substances by electrocoagulation. *Chemical Engineering Journal*. 2008;138: 63-72.
12. Ojeda E, Hing R. Obtención de inhibidores ecológicos de la corrosión por electrocoagulación a partir de la vinaza. *Revista Tecnología Química*. 2008; 28(1): 11-21
13. Ojeda E, Hing R. Tratamiento de la vinaza por electrocoagulación. *Revista Tecnología Química*. 2008; 28(2): 5-10
14. Ojeda E, Hing R. Condiciones operacionales más eficientes en el tratamiento de la vinaza mediante el método de electrocoagulación. *Revista Tecnología Química*. 2009; 29(2): 22-27
15. Cañizares P, Jiménez C, Martínez F, Rodrigo MA, Sáez C. The pH as a key parameter in the choice between coagulation and electrocoagulation for the treatment of wastewaters. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 183: 158-164.
16. Chandrakant T, Chandra SV, Deo MI. Electrochemical treatment of a distillery wastewater: Parametric and residue disposal study. *Chemical Engineering Journal*. 2009; 148: 496-505.
17. Ilhan F, Kurt U, Apaydin O, Gonullu T. Treatment of leachate by electrocoagulation using alum and iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials*. 2008; 154: 381-389.
18. Kirzhner F, Zimmels Y, Shraiber Y. Combined treatment of highly contaminated winery waste water. *Separation and Purification Technology*. 2008; 63: 38-44.
19. Restrepo MA, Arango AR, Garcés LF. La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producciones + Limpias*. 2006; 1(2) 58-77.
20. Ben SM., Calmanob W, Adina A. Iron-oxidation processes in an electrocoagulation cell. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 171: 704-709.
21. Chih T, Wei-Lung C, Yi-Ming K. Removal of COD from laundry wastewater by electrocoagulation/electroflotation. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 164: 81-86.
22. Hani RM. Utilización de un sistema híbrido basado en filtración con membranas y electrooxidación avanzada para depurar efluentes complejos. [Tesis de grado]. Universidad de Concepción, Chile, Facultad de Ingeniería, 2009.
23. Zaroual Z, Azzi M, Saib N, Chainet. Contribution to the study of electrocoagulation mechanism in basic textile effluent. *Journal of Hazardous Materials*. 2006; B 131: 73-78.
24. APHA. Standard Methods for the examination of wastewater. 1998.
25. Daneshvar N, Oladegaragoze A, Djafarzadeh N. Decolorization of basic dye solution by electrocoagulation: An investigation of the effect of operational parameters. *Journal of Hazardous Materials*. 2006; B 129: 116-122.
26. Wei-Lung C, Chih T, Kai-Yu H. Effect of operating parameters on indium (III) ion removal by iron electrocoagulation and evaluation of specific energy consumption. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 167: 467-474.
27. Zayas T, Azzi M, Chainet E. Applicability of coagulation/flocculation and electrochemical processes to the purification of biologically treated vinasse effluent. *Separation Purification Technology*. 2007; 57: 270-276.