

# ESTUDIO DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN DE LA VINAZA EMPLEANDO ELECTRODOS DE ALUMINIO

Elaine Ojeda Armaignac, Romelia Hing Cortón  
Facultad de Ingeniería Química, Universidad Oriente

*El presente trabajo, forma parte de una de las investigaciones que se realizan en la facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Oriente, en búsqueda de soluciones que permitan obtener las condiciones operacionales más factibles, técnica y económica que influyan en el proceso de electrocoagulación de la vinaza, con el objetivo de determinar estas condiciones con electrodos de aluminio.*

*La vinaza utilizada en este trabajo se obtiene como residual del proceso de obtención de alcohol etílico a partir de las mieles finales de la caña de azúcar. Se realizaron ensayos experimentales para determinar la densidad de corriente, el tiempo de electrólisis y el pH de la solución.*

*En el estudio del proceso de electrocoagulación se realizó la determinación del color como parámetro de calidad de la vinaza, y para el seguimiento de la efectividad de este proceso, en cuanto a su descontaminación y obtención de sólidos, una vez determinadas estas condiciones, se hizo un análisis económico preliminar para determinar el costo operacional expresado en pesos por toneladas de sólidos removidos.*

**Palabras clave:** electrocoagulación, electrodos de aluminio, vinaza

*This work is part of one of the research being conducted at the Chemical Engineering Faculty, Universidad de Oriente, looking for solutions to achieve operational conditions technically and economically more feasible to influence the process of electrocoagulation of the vinasse to determine these conditions using aluminum electrodes.*

*The vinasse used in this work is obtained as a residual of the process of obtaining alcohol from the end of the process of honey production from sugar cane.*

*Experimental tests were conducted to determine the operational parameters on electrocoagulation process (current density, electrolysis time and pH of the electrolyte solution). The study of the electrocoagulation process is the determination of color as a parameter of quality of vinasse and for monitoring the effectiveness of this process in terms of decontamination and collection of solids.*

*Once these conditions, a preliminary economic analysis which determined the operational cost expressed in \$ per tons of solid removed was made.*

**Key words:** electrocoagulation, aluminium electrodes, vinasse

## Introducción

Con metales se opera en todas las ramas productivas de la sociedad, por lo que hay que tener en cuenta el fenómeno de corrosión por su efecto perjudicial, tanto económico como medioambiental y social, buscando vías para detener o disminuir la misma. Uno de los métodos fundamentales para la prevención de la corrosión es la utilización de inhibidores, y éstos son productos químicos que reaccionan con la superficie metálica, dando a la misma cierto nivel de protección. Algunos tipos de residuales industriales, contienen elementos que debido a sus propiedades inhibitorias pueden

ser usados para combatir este problema que afecta a nivel mundial.

Durante muchos años, la práctica tradicional ha sido exigir a la industria la utilización de tecnologías para el control de la contaminación al final de los procesos o actividades, a fin de garantizar el cumplimiento de los límites máximos admisibles de contaminantes en las emisiones y descargas, reduciendo con ello los riesgos para la salud y el ambiente asociados a este fenómeno, sin embargo, el problema persiste, siendo la utilización de residuales industriales una alternativa atractiva, que permite, al mismo tiempo, el tratamiento adecuado y aprovechamiento de los mismos, dis-

---

minuyendo la contaminación del medio ambiente. De esta forma, se pueden obtener productos valiosos y un desecho con valor negativo pasa a ser una materia prima cuyo empleo resulta económicamente ventajoso.

La contaminación es uno de los problemas ambientales más relevantes que afectan a nuestro mundo y surge cuando se produce un desequilibrio natural que cause efectos adversos en el hombre, en los animales y vegetales. Un ejemplo lo constituye la industria alcohólica cubana, que al verter sus efluentes (vinaza), trae como consecuencia un alto poder contaminante en ríos y mares provocando afectaciones al medio ambiente.

Las vinazas de las destilerías de alcohol etílico, son los residuales de mayor agresividad y carga orgánica que genera la industria azucarera en su conjunto (MINAZ. 1995), los que se producen en una proporción de 12 a 15 L por cada litro de alcohol producido y una agresividad de 60 000 a 150 000 mg DQO/L, casi mil veces mayor que la permitida por la normatividad. La solución de esta problemática debe apoyarse fundamentalmente en medidas para la reducción del volumen y agresividad de los mostos y alternativas de aprovechamiento.

La electrocoagulación, es un tratamiento electroquímico muy utilizado en el tratamiento de residuales, por medio del cual se desestabilizan contaminantes suspendidos, emulsificados o disueltos en un medio acuoso, haciendo pasar una corriente eléctrica a través del mismo. La operación se lleva a cabo usando una variedad de ánodo y cátodo geométrico, electrodos consumibles, generalmente de hierro o aluminio, por los cuales fluye la corriente necesaria para que los mismos comiencen a reaccionar con el medio, análogamente a un proceso de corrosión.

Los principales factores que influyen en la eficiencia del proceso de electrocoagulación son: el pH, la temperatura de la solución, el tiempo de residencia, el material de los electrodos y la intensidad de la corriente.

En trabajos anteriores, se ha realizado un estudio para el posible uso de la vinaza de destilería en la obtención de sólidos inhibidores de la corrosión, aprovechando la rica composición que

la misma posee, pero todavía no tiene ninguna aplicación específica, por el contrario, contribuye a la contaminación del ecosistema.

En la actualidad, se llevan a cabo investigaciones para determinar las condiciones factibles técnica y económicamente que influyen en el proceso de electrocoagulación de la vinaza, con el objetivo de obtener sólidos inhibidores de la corrosión, resolviéndose dos problemas de gran importancia para la sociedad, la contaminación del medio ambiente y la corrosión de los materiales metálicos en contacto con medios agresivos. En esta investigación se persiguen los siguientes objetivos:

1. Determinar la densidad de corriente que permita un mayor por ciento de remoción de color en el proceso de electrocoagulación de la vinaza y un menor consumo de energía en el mismo.
2. Determinar el tiempo de electrólisis y el pH que permitan obtener una mayor eficiencia en el proceso de electrocoagulación de la vinaza.
3. Realizar un análisis económico preliminar del proceso de electrocoagulación de la vinaza.

## Materiales y métodos

El líquido a tratar en esta investigación es la vinaza residual, producto de la destilación alcohólica a partir de mieles finales de la caña de azúcar, que se lleva a cabo en el complejo azucarero Argeo Martínez perteneciente al MINAZ de la provincia Guantánamo.

Para la obtención del sólido a partir de la vinaza se utilizó un electrocoagulador a escala de laboratorio el cual está compuesto por 2 electrodos planos de aluminio, dispuestos verticalmente, cuyas dimensiones totales son de 68 mm de largo, 40 mm de ancho, y 1 mm de espesor, espaciados a 15 mm. Para energizar el sistema se utilizó una fuente de corriente directa, en la que se podía regular la corriente y el voltaje aplicado; mediante la conexión de un amperímetro y un voltímetro, en serie y paralelo respectivamente. Los electrodos fueron conectados en paralelo. La instalación eléctrica se muestra en la figura 1.

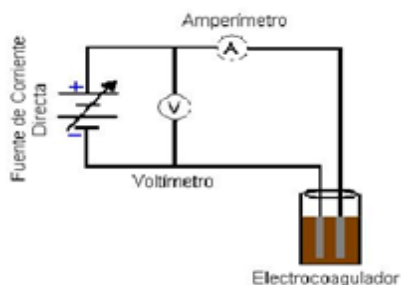
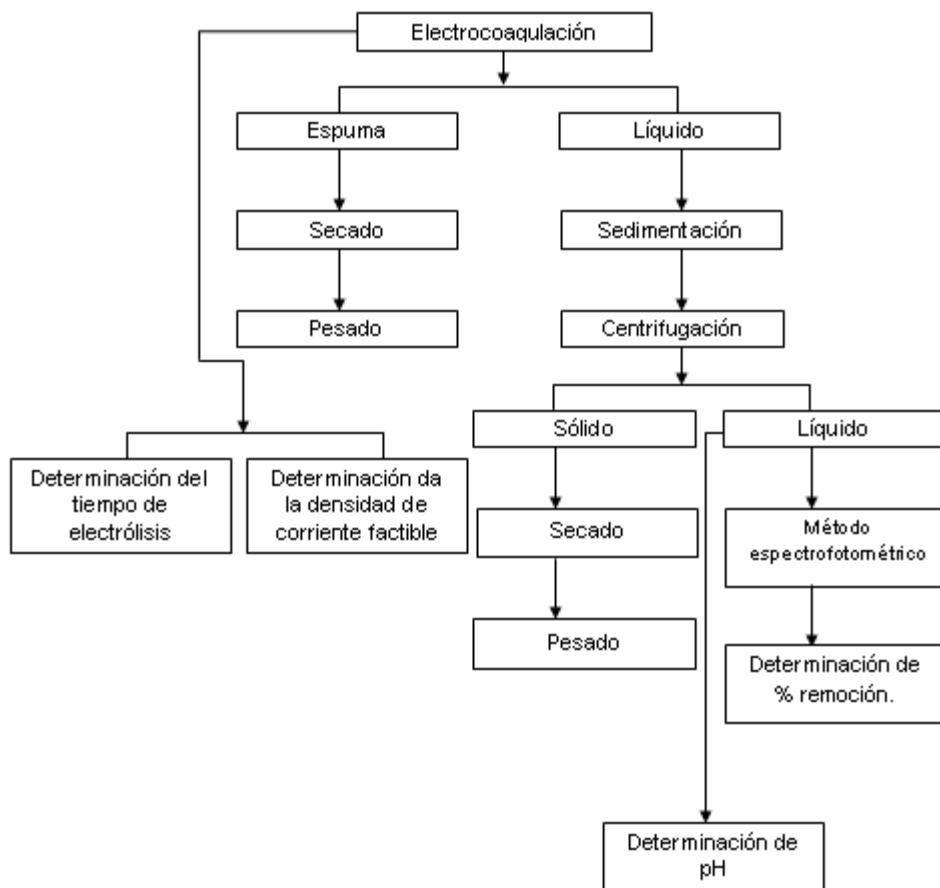


Fig. 1 Instalación eléctrica.

El orden en que fueron realizados los ensayos se muestra en el siguiente esquema experimental.

### Desarrollo de la técnica experimental

La valoración espectrofotométrica del color de las muestras se llevó a cabo mediante la determinación de la luminancia (%) según refiere el Standard Methods (APHA, 1998).



Este método consiste en la medición del por ciento de transmitancia de la muestra para un conjunto de longitudes de onda específicas de 400-700 nm, utilizando agua destilada como blanco. La suma de los por cientos de transmitancia multiplicada por un factor (0,1) nos da el valor de luminancia (%), que es una medida de cuan clara es percibida la muestra por el ojo humano.

Las muestras con vinaza fueron electrocoaguladas y centrifugadas previamente, para la eliminación de los sólidos en suspensión y luego se diluyeron (1/10)

de modo que su transmitancia para las 10 longitudes de onda para las cuales se mide, no sea menor al 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:

$$A = 2 - \text{Log } 66,87 \quad (1)$$

$$\% R = \frac{A_i - A_f}{A_i} * 100 \quad (2)$$

donde:

L: Luminancia.

$A_i$ : Absorbancia de la vinaza antes de la electrocoagulación, obtenida de los valores de luminancia.

$A_f$ : Absorbancia de la vinaza después de la electrocoagulación, obtenida de los valores de luminancia.

%R: Por ciento de remoción de color

### Análisis económico preliminar del proceso de electrocoagulación de la vinaza con electrodos de aluminio

El cálculo económico se hizo teniendo en cuenta fundamentalmente el consumo de la energía eléctrica ( $C_{\text{energía}}$ ), la eficiencia de la energía eléctrica ( $\varphi$ ), el consumo de energía eléctrica específica ( $See$ ) y el costo de operación ( $C_o$ ).

El consumo de energía eléctrica y la eficiencia de la corriente son algunos de los parámetros de suma importancia en el proceso de electrocoagulación.

El consumo de la energía eléctrica fue calculado usando la ecuación:

$$See = \frac{n * F * V * \varphi}{3.6 * 10^3 * M} \quad (3)$$

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

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

donde:

n: Número de electrones.

F: Constante de Faraday ( $96487 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ ).

V: Voltaje (Volt).

$\varphi$ : Eficiencia de la corriente (%).

M: Peso molecular del aluminio ( $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ).

$\Delta M_{\text{experimental}}$ : Pérdida de peso experimental de los electrodos (g) durante el proceso de electrocoagulación (g).

$\Delta M_{\text{teórico}}$ : Cantidad teórica de hierro que se disuelve de acuerdo a la Ley de Faraday (g).

I: Intensidad de corriente (A).

$t_{EC}$ : Tiempo de electrocoagulación (seg).

El costo de operación incluye el costo del material (principalmente electrodos), costo utilitario (principalmente energía eléctrica), costo de mantenimiento y otros costos fijos. En este estudio económico preliminar, el costo de la energía y el costo del electrodo se consideran como los renglones principales por lo que, el mantenimiento y el costo fijo no son tomados en cuenta para la comparación en el cálculo del costo de operación.

## Resultados y discusiones

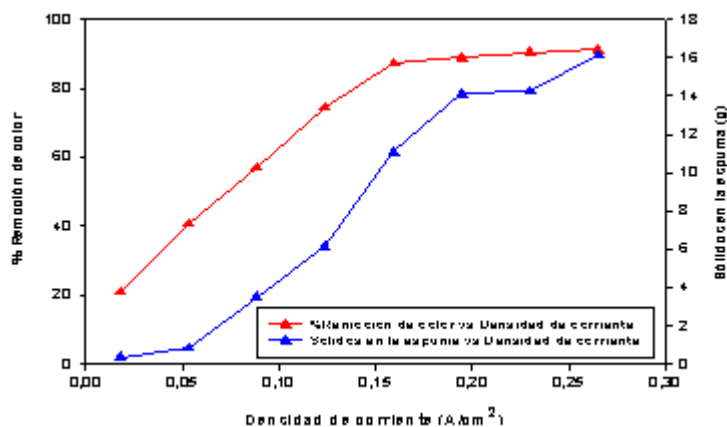
### Efecto de la densidad de corriente en la eficiencia de la remoción de color y la obtención de sólidos

En todo proceso electrolítico, la densidad de corriente es el parámetro más importante para controlar la velocidad de la reacción dentro del reactor. Es conocido que la densidad de corriente determina el régimen de producción de coagulante, de los hidróxidos que se forman, regulan la velocidad y volumen de burbujas que se producen, y en consecuencia afecta el crecimiento de los flóculos.

Para investigar el efecto de la densidad de corriente en la eficiencia de la remoción de color y en la obtención de los sólidos, el proceso de electrocoagulación se llevó a cabo empleando varias densidades de corriente.

La figura 2, muestra el por ciento de remoción de color y la cantidad de sólidos obtenidos por electroflotación (formados en la espuma), en contraste con diferentes densidades de corriente aplicada a los electrodos en el proceso de electrocoagulación de la vinaza.

Un aumento de la densidad de corriente conduce al incremento de la reducción de color y de la obtención de sólidos. A una densidad de corriente de  $0,15912 \text{ A/cm}^2$  (9A), aproximadamente el 87,41 % de color fue reducido y se obtuvo 11,09 g de sólidos en la espuma. Un incremento por encima de esta densidad de corriente provoca un aumento despreciable de la remoción de color, sin embargo, la cantidad de sólidos obtenidos en la espuma sigue aumentando según la Ley de Faraday.



**Fig. 2** Variación del porcentaje de remoción de color y la cantidad de sólidos obtenidos en la espuma en función de la densidad de corriente ( $I = 9A$ ,  $pH = 4.43$ ,  $t_{EC} = 5 \text{ min}$ ).

El comportamiento de la eficiencia de la remoción de color, puede deberse a que a densidades de corriente mayores de  $0,15912 \text{ A/cm}^2$ , durante el proceso de tratamiento se produce la transformación de compuestos y no necesariamente la desaparición de la materia orgánica por la degradación, permaneciendo determinadas sustancias cromóforas.

En cuanto a los sólidos en la espuma, estos resultados están muy vinculados a la densidad de corriente, pues al incrementar los valores de ésta, los procesos en los electrodos aumentan proporcionalmente a la misma, acelerándose el proceso de desprendimiento de gases, lo cual favorece el ascenso de los sólidos en la espuma y dificulta el proceso de formación de los flóculos.

En los procesos que ocurren en los electrodos, los iones hidronio migran hacia el cátodo, ocurriendo la reacción de reducción del mismo y se desprende hidrógeno, lo cual provoca un intenso burbujeo a medida que aumenta la intensidad de corriente. Los iones hidroxilo presentes en la solución, migran al ánodo experimentando una reacción de oxidación y desprendiendo oxígeno, esto incrementa el burbujeo y la mayor formación de espuma en el sistema. Esto se evidencia en la figura 3, donde se observa que los sólidos obteni-

dos en el líquido por floculación se mantienen casi constantes e independientes de la densidad de corriente.

Para que una sustancia se concentre en la superficie de una solución, debe estar formada por moléculas que tengan una estructura fuertemente asimétrica, que contenga tanto grupos polares como no polares, llamados hidrofílicos e hidrofóbicos respectivamente, atendiendo a su atracción o repulsión por el agua. A causa de tal estructura asimétrica, las moléculas en la capa superficial, se orientan de forma tal, que los grupos hidrofóbicos se orientan 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 flóculos que son hidrofílicos. Esto justifica el resultado de los sólidos obtenidos en la espuma, los cuales se incrementan casi de forma lineal mientras que en el líquido se mantienen independientes de la densidad de corriente porque la producción de burbujas dificulta el desarrollo de los flóculos.

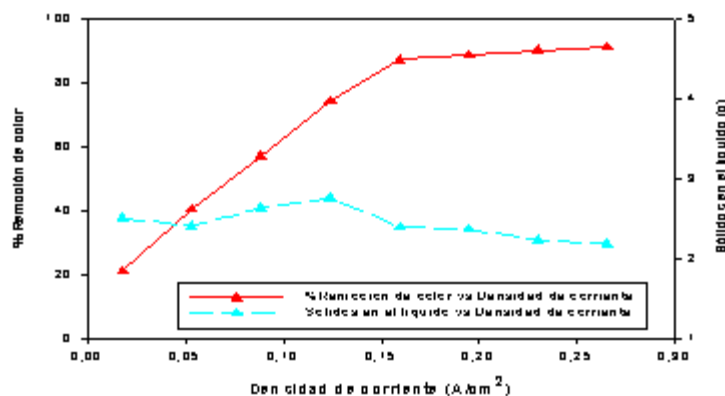
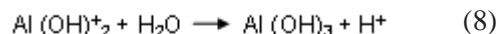
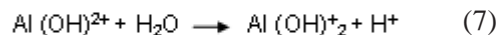
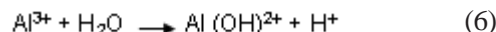


Fig. 3 Variación del porcentaje de remoción de color y la cantidad de sólidos obtenidos en el líquido en función de la densidad de corriente ( $I = 9A$ ,  $pH = 4.43$ ,  $t_{EC} = 5 \text{ min}$ ).

En la figura 4, se representa la cantidad de sólidos totales y el porcentaje de remoción en función de la densidad de corriente, evidenciándose una vez más que la cantidad de sólidos aumenta proporcionalmente a la densidad de corriente, debido fundamentalmente, al aporte que hacen los sólidos obtenidos en la espuma.

En este proceso de electrocoagulación los iones aluminio ( $Al^{3+}$ ), que provienen de la disolución electrolítica del ánodo, se hidrolizan espontáneamente, generando varias especies monoméricas de acuerdo al siguiente mecanismo:



También, producto de la hidrólisis, se forman especies diméricas, triméricas y poliméricas de aluminio tales como:  $Al_2(OH)_2^{4+}$ ,  $Al_3(OH)_4^{5+}$ ,  $Al_6(OH)_{15}^{3+}$ ,  $Al_7(OH)_{17}^{4+}$ ,  $Al_8(OH)_{20}^{4+}$ ,  $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$ ,  $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$ . Según (M Kobya *et al.* 2006).

Los cationes hidrolizados de aluminio pueden reaccionar con los iones  $OH^-$ , hasta obtener finalmente el compuesto amorfo de hidróxido de aluminio.

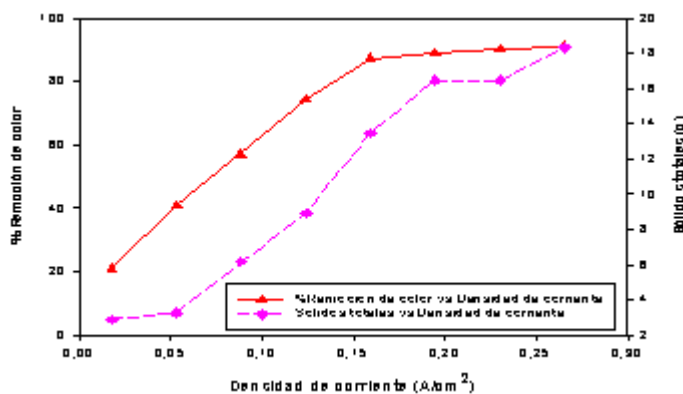


Fig. 4 Variación del porcentaje de remoción de color y la cantidad de sólidos totales obtenidos en función de la densidad de corriente ( $I = 9A$ ,  $pH = 4.43$ ,  $t_{EC} = 5 \text{ min}$ ).

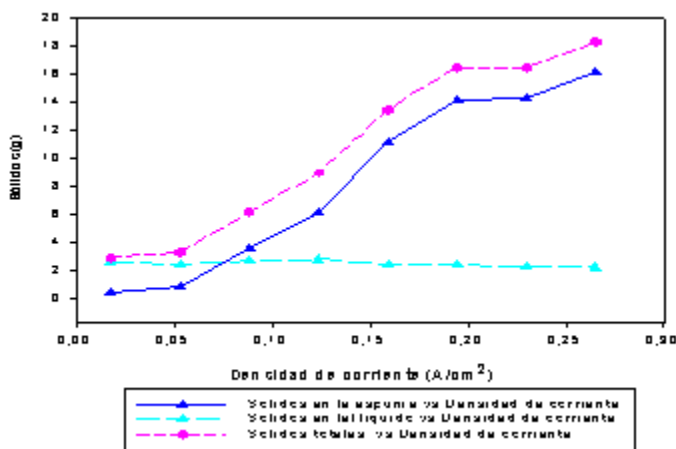
El modo de actuar de las especies de aluminio generadas en el proceso de electrocoagulación, se puede explicar en función de dos mecanismos:

1. Neutralización de las cargas de partículas coloidales negativas por los cationes, producto de la hidrólisis.
2. Incorporación de impurezas en el precipitado de hidróxido amorfo,  $Al(OH)_3$  (en el curso de la floculación).

La importancia de este mecanismo está estrechamente vinculada con el pH y la cantidad de hidróxido formado. Los compuestos amorfos formados de  $Al(OH)_3(s)$ , tienen un área superficial grande, la cual es beneficiosa para una rápida

adsorción de los compuestos orgánicos solubles, atrapando las partículas coloidales. Finalmente, estos flóculos son separados del medio acuoso por sedimentación, centrifugación y/o flotación.

En la figura 5, se corrobora el comportamiento analizado anteriormente, mostrándose la variación de los sólidos obtenidos en la espuma, en el líquido y los sólidos totales en función de la densidad de corriente, corroborándose que los sólidos en la espuma, aumentan proporcionalmente a la densidad de corriente, mientras que los del líquido se mantienen prácticamente constantes, esto también se refleja en los sólidos totales por la alta contribución que representan los sólidos obtenidos en la espuma.



**Fig. 5** Variación de los sólidos obtenidos en el líquido, en la espuma y Totales en función de la densidad de corriente ( $I = 9A$ ,  $pH = 4.43$ ,  $t_{EC} = 5 \text{ min}$ ).

Para alcanzar el valor más factible de densidad de corriente, se hace necesario evaluar la eficiencia de la remoción de color y el consumo de energía. En la figura 6, se representa el por ciento de remoción de color y los kW.h/g de sólido removido en función de la

densidad de corriente, estos resultados permiten corroborar que la densidad de corriente más factible técnica y económicamente es  $0,15912 \text{ A/cm}^2$  para la cual se obtiene un  $87,41 \%$  de remoción de color y  $44,50 \cdot 10^{-5} \text{ kW.h/g}$  de sólidos removidos.

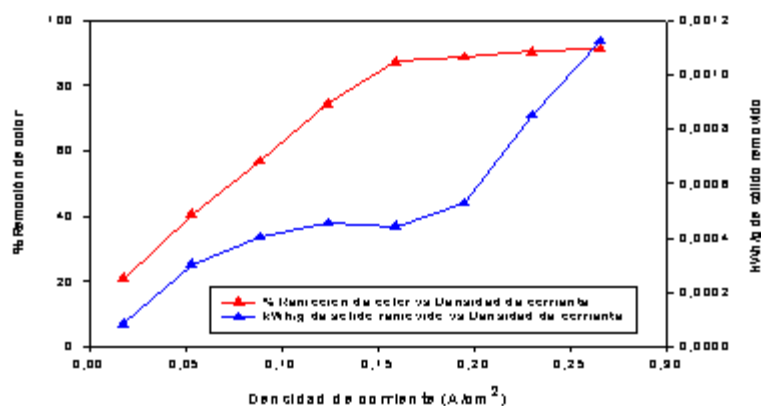


Fig. 6 Variación del por ciento de remoción de color y kWh/g de sólido removido en función de la densidad de corriente ( $I = 9A$ ,  $pH = 4.43$ ,  $t_{EC} = 5$  min).

### Efecto del tiempo de electrólisis en la eficiencia de remoción de color

El tiempo de electrólisis también influye en la eficiencia del tratamiento del proceso de electrocoagulación. Este tiempo, determina la velocidad de producción de iones  $Al^{3+}$  de los electrodos de aluminio.

En la figura 7, se muestra la relación entre la eficiencia de la remoción de color y el tiempo de electrólisis, estos ensayos fueron realizados para una densidad de corriente de  $0,15912 A/cm^2$  ( $9A$ ) y un  $pH = 4,42$ . Los estudios se realizaron entre 1 y 7 minutos, porque al transcurrir el tiempo de 7 min disminuye el volumen de líquido a tratar, y esto trae como consecuencia que el sistema cae en corto circuito provocando una disminución de corriente.

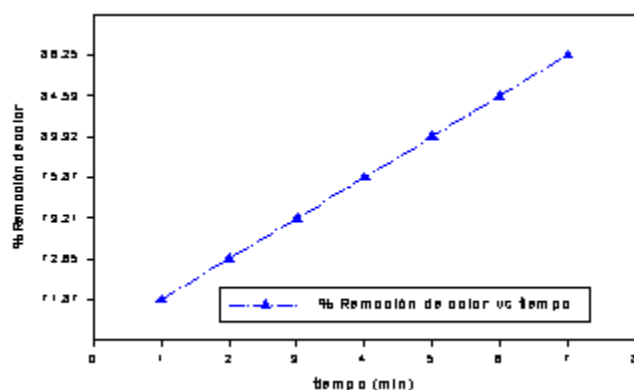


Fig. 7 Variación del por ciento de remoción de color en función del tiempo. ( $I = 9A$ ,  $pH = 4.42$ ).

En los resultados se observa que la remoción de color en la vinaza aumenta linealmente con el tiempo. La eficiencia de la remoción de color depende directamente de la concentración de hidróxido y de los iones metálicos producidos por los electrodos. Por tanto, un aumento del tiempo, promueve el crecimiento de los flóculos y su posterior precipitación, y a

la vez incrementa la producción de gases, que al ascender, llevan las partículas sólidas a la superficie formando la espuma, estos resultados se corresponden con los obtenidos por Clavel, 2008.

En consecuencia, de acuerdo a los resultados mostrados en la figura 3, el mejor tiempo de electrólisis fue de 7 min.



Efecto del pH inicial en la eficiencia de remoción de color

El pH es un parámetro muy importante que influye en el desarrollo del proceso de electrocoagulación, participando directamente en el equilibrio de la hidrólisis que determina el origen de las diversas especies en solución. El efecto del pH en la remoción de color de la

vinaza fue analizada a una densidad de corriente de  $0,159\ 12\ \text{A}/\text{cm}^2$  (9A), y un tiempo de 7 min. Para examinar este efecto, la vinaza fue ajustada al pH deseado para cada experimento por adición de una solución de hidróxido de sodio o de ácido sulfúrico.

La variación del por ciento de remoción de color como una función del pH se muestra en la figura 8.

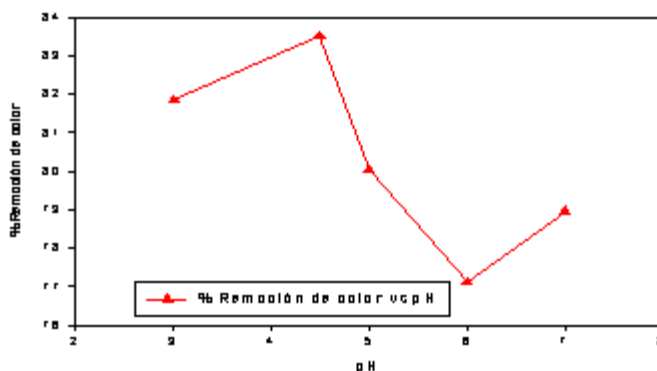


Fig. 8 Variación del por ciento de remoción de color en función del pH.

Los resultados revelan que cuando el pH de la vinaza se encuentra a 4.49 (pH original) se alcanza la máxima remoción de color. El ajuste de la vinaza a pH superiores al original incrementa el color de la misma, provocando un descenso significativo de la luminancia. Esto podría estar causado porque a pH mayores se favorece la polimerización de los productos que han quedado de las reacciones de caramelización (reacciones que ocurren en las mieles que dan origen a la vinaza), reduciendo el paso de la luz y por tanto, la reducción de los por cientos de luminancia y de remoción de color. Se conoce que a pH alcalino se favorece la formación de las melanoidinas. Por tanto no es necesaria la adición de sustancias químicas para cambiar el valor de pH original de la vinaza para ser tratado con electrodos de aluminio.

### Consumo de energía y costo de operación

El consumo de energía eléctrica y la eficiencia de la corriente son parámetros económicos muy importantes en el proceso de electrocoagulación; similar a otro proceso electrolítico. El consumo de energía eléctrica fue calculado usando la ecuación 3. En la

figura 6, se observa que un incremento de la densidad de corriente causa un aumento de la eficiencia de remoción de color, incrementándose también el consumo de energía.

Sin embargo, para la densidad de corriente de  $0.15912\ \text{A}/\text{cm}^2$  (9A) se alcanza el valor más factible técnica y económicamente del por ciento de remoción de color y a su vez una disminución del consumo de energía. Valores superiores a la densidad de corriente de  $0,159\ 12\ \text{A}/\text{cm}^2$  ( $I=9\text{A}$ ) no se producen cambios apreciables en la eficiencia de remoción de color sin embargo el consumo de energía se incrementa de forma apreciable.

La eficiencia de la corriente ( $\varphi$ ) del proceso de electrocoagulación fue calculada por la ecuación 2.4. El cálculo está basado en la comparación de la pérdida de peso experimental de los electrodos de aluminio ( $\Delta M_{\text{experimental}}$ ) durante el proceso de electrocoagulación con la cantidad teórica de aluminio disuelto ( $\Delta M_{\text{teórico}}$ ) de acuerdo a la Ley de Faraday, ecuación 5.

Como  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (s) puede ser la especie formada, el número de electrones en la reacción de disolución es igual a 3.

El costo de operación incluye el costo del material (principalmente electrodos), costo utilitario (principalmente energía eléctrica), costo de mantenimiento y otros costos fijos. En este estudio económico preliminar, el costo de la energía y el costo del electrodo se consideran como los renglones fundamentales, el mantenimiento y el costo fijo no son significativos para la comparación en el cálculo del costo de operación, expresándose este costo como kW.h por gramo de sólidos removidos.

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

Cenergía y Celectrodo: son las cantidades de consumo de energía y de electrodo respectivamente por gramo de sólido removido, los cuales se obtienen experimentalmente.

Especificado en el mercado internacional en el 2009, el precio unitario de c y b son los siguientes:

- a: precio de energía eléctrica, \$/kW.h
- b: precio del material del electrodo, \$/kg

Estos cálculos fueron realizados para los parámetros operacionales factibles técnicamente en el proceso de electrocoagulación. ( $i = 0,15912 \text{ A/cm}^2$ ,  $t = 7 \text{ min}$ ,  $\text{pH} = 4,57$ ). Los valores de los cálculos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1  
Parámetros característicos calculados para el proceso de electrocoagulación en las condiciones arriba mencionadas

%RC	$C_{\text{energía}}$ (kW.h/g de sólido removido)	$\Delta M_{\text{experimental}}$ (g)	$\Delta M_{\text{teórico}}$ (g)	$\phi$ (%)	See kW.h/g de Al disuelto	$C_o$ (\$/Ton)
90,15	$5,625 * 10^{-4}$	0,36	0,352	97,78	21,85	87,76

## Conclusiones

- El mejor valor factible técnica y económicamente de la densidad de la corriente para el proceso de electrocoagulación de la vinaza es de:  
 $i = 0.15912 \text{ A/cm}^2$  ( $I = 9 \text{ A}$ ), para el cual se alcanza un por ciento de remoción de color de 87,41 % y un consumo de energía de  $44,50 * 10^{-5} \text{ kW.h/g}$  de sólidos removidos.
- Se comprobó que a medida que aumenta la densidad de corriente se obtiene mayor cantidad de sólidos en la espuma mientras que en el líquido permanece prácticamente constante.
- El tiempo de electrólisis que permite obtener una mayor eficiencia en el proceso de electrocoagulación de la vinaza para una densidad de corriente de  $0,15912 \text{ A/cm}^2$  es de 7 min.
- El pH de la solución electrolítica que permite obtener un mayor por ciento de remoción de color en el proceso de electrocoagulación de la

vinaza para una densidad de corriente de  $0,15912 \text{ A/cm}^2$  y un tiempo de 7 min es de 4.57.

- El costo del proceso de electrocoagulación de la vinaza es de 87,76 \$/Ton de sólido removido para los valores factibles técnica y económicamente siendo los valores de pH de 4,57 y tiempo de electrólisis de 7 min.

## Bibliografía

- Almeida, María del Pilar. "Estudio de algunas vías de aprovechamiento de los efluentes de destilería". Revistas ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar. 1987.
- Andía Cárdenas, Yolanda; de Vargas, Lidia y Barrenechea Martel, Ada. "Tratamiento de agua: coagulación - floculación". Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. SEDAPAL. Lima, Abril del 2000.
- APHA. Standard Methods for the examination of wastewater. 1998.
- Bourzac Suárez, Verónica y Mesa Mesa, Liliana. "Obtención de inhibidores ecológicos de la corro-

- 
- si3n por electrocoagulaci3n a partir de la vinaza". Trabajo de Diploma. Facultad de Ingenier3a Qu3mica. 2006.
5. Bueno, J. L.; Sastre, H. y Lav3n, A. G. "Contaminaci3n e Ingenier3a Ambiental", FICYT, Oviedo 1997.
  6. Cervantes, F; Santos A, Review paper on current technologies for de colourisati3n of textile wastewaters: Perspectives for anaerobic biotechnology. 2007.
  7. CITMA. "Aguas y saneamiento".2005.
  8. Colectivo de autores. "Caracter3sticas de la vinaza de destiler3a (mosto). Realizado por el grupo de tratamiento y aprovechamiento de residuales de la Facultad de Ciencias Naturales". Universidad de Oriente. 2004.
  9. COLECTIVO DE AUTORES. "Introducci3n a la corrosi3n y protecci3n de metales. Ministerio de educaci3n superior. La Habana, 1987.
  10. Clavel Baldaqu3n, L3zaro. "Electrocoagulaci3n y floculaci3n de la vinaza". Trabajo de Diploma. Facultad de Ingenier3a Qu3mica. 2008.
  11. Crespo Sariol, Harold. " Proyecto de Planta para "RECICLAR" el mosto de la destiler3a". Trabajo de Diploma. Facultad de Ingenier3a Qu3mica. 2005.
  12. Gonz3lez, Mar3a; V3zquez Miguel y Tab3o Marina. "Desalinizaci3n de mosto de destiler3a con 3cido sulf3rico concentrado". Revista ICIDCA, sobre los derivados de la ca3a de az3car.1989.
  13. Gonz3les T. "Aspectos fisiol3gicos y moleculares de la decoloraci3n enzim3tica de efluentes de destiler3a con el hongo basidiomiceto". Tesis de Doctorado. Universidad de Alcal3, Espa3a. 2001.
  14. Hern3ndez B; S3enz C; Alberdi C; 3brego S; Berrogui M; Di3eiro J. M. "Obtenci3n de patrones de comparaci3n para la evoluci3n visual del color de productos agroalimentarios". 3ptica pura y aplicada. 2004.
  15. Hongve D. and Akesson G. "Spectrophotometric determination of water colour in hazen units". Water Research. 1996.
  16. Kort M.J. Colour in the Sugar Industry. Science and technologies. Birch GG y Parker KJ, London.1979.
  17. MINAZ. "Tratamiento de los desechos de las f3bricas de producci3n de alcohol a partir de mieles de ca3a de az3car mediante la recuperaci3n de levadura *Saccharomyces* y la producci3n de biog3s". Ciudad de la Habana. 1995.
  18. Morante, Gonzalo G. Electrocoagulaci3n de aguas residuales. Revista colombiana de f3sica. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. 2002.
  19. M. Kobya, H. Hiz, E. Senturk, C. Aydiner, E. Demirbas, Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation, desalination 190 (2006)201-211.