

ESTUDIO DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN DE LA VINAZA EMPLEANDO ELECTRODOS DE HIERRO

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

El presente trabajo forma parte de una de las investigaciones que se llevan a cabo en la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Oriente, en la búsqueda de soluciones que permitan obtener las condiciones operacionales más factibles técnica y económicamente que influyen en el proceso de electrocoagulación de la vinaza con el objetivo de determinar estas condiciones empleando electrodos de hierro. La vinaza utilizada en este trabajo se obtiene como residual del proceso de obtención de alcohol etílico a partir de las mieles finales del proceso de producción de azúcar de caña.

Fueron realizados ensayos experimentales para determinar los parámetros operacionales en el proceso de electrocoagulación (densidad de corriente, tiempo de electrólisis y pH de la solución electrolítica). En el estudio del proceso de electrocoagulación se realizó la determinación de color como parámetro de calidad de la vinaza y para el seguimiento de la eficacia de este proceso en cuanto a su descontaminación y la obtención de sólidos. Una vez determinadas estas condiciones, se realizó un análisis económico preliminar donde se determinó el costo operacional expresado en \$por tonelada de sólido removido.

Palabras clave: *electrocoagulación, vinaza residual.*

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 iron 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 ton of solid-removed was made.

Key words: *electrocoagulation, residual vinasse.*

Introducción

En la vida diaria con frecuencia se considera la corrosión de los metales como un problema industrial importante que se debe prevenir, y de esta forma evitar desechar los materiales metálicos o bien tener que limpiarlos o pintarlos frecuentemente para que puedan brindar un servicio durante más tiempo. La corrosión es la acción química o electroquímica, lenta o acelerada de la naturaleza o el medio ambiente, que degrada y destruye los materiales metálicos. Es importante aclarar, que la corrosión a nivel mundial viene a ser uno de los fenómenos más trascendentales en la economía de toda sociedad humana.

En todas las ramas productivas de la sociedad se opera con metales, 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.

Uno de los métodos tradicionales más utilizados para disminuir la velocidad de corrosión, es el uso de inhibidores, que son sustancias que añadidas en pequeñas cantidades al medio corrosivo, disminuyen apreciablemente la velocidad de co-

rosión. Algunos tipos de residuales contienen elementos que debido a sus propiedades anticorrosivas pueden ser usados para combatir este problema que afecta a nivel mundial.

En estudios anteriores se ha propuesto el uso de la vinaza de destilería, en la obtención de inhibidores a partir de un proceso de electrocoagulación, teniendo en cuenta la rica composición que la misma posee. En la actualidad se llevan a cabo investigaciones de este tipo, incidiendo sobre dos problemas de gran importancia para la sociedad, la contaminación del medio ambiente y la corrosión, pues al extraer los sólidos inhibidores de la vinaza, disminuye la carga contaminante de la vinaza. Por todo lo anteriormente expresado, el objetivo general del presente trabajo es el siguiente:

Objetivo general: Determinar las condiciones operacionales más eficientes para la separación de los sólidos presentes en el residual, a través del método de electrocoagulación, analizando la influencia de las variables: pH de la

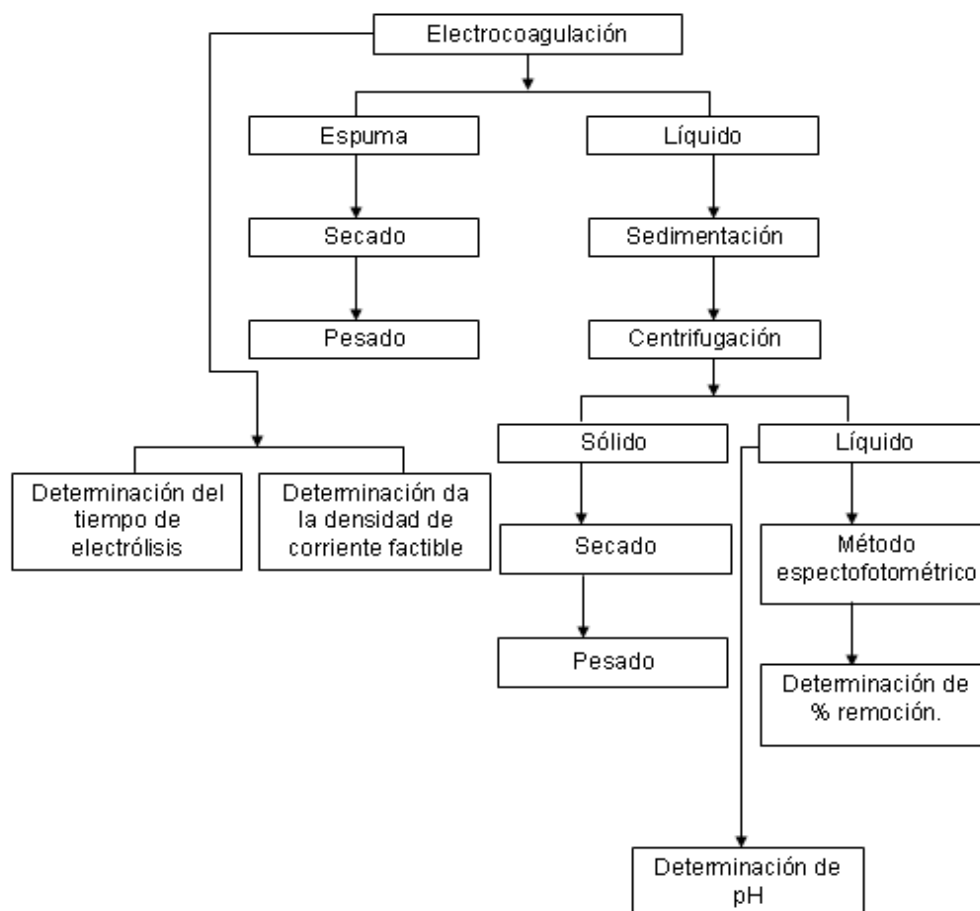
vinaza a tratar, tiempo de residencia e intensidad de corriente, y sus combinaciones, que permita obtener una mayor cantidad de sólidos y un mayor por ciento de remoción de color.

Materiales y métodos

El líquido a tratar en esta investigación es la vinaza, residual producto de la destilación alcohólica a partir de mieles finales, que se lleva a cabo en el complejo azucarero Argeo Martínez perteneciente al MINAZ de la provincia Guantánamo, este líquido es vertido directamente a un conducto que descarga dicho residuo en una laguna de oxidación.

Para la obtención del sólido a partir de la vinaza se utilizó un electrocoagulador a escala de laboratorio el cual está compuesto por electrodos planos de hierro. Para energizar el sistema, se utilizó una fuente de corriente directa. El orden en que fueron realizados los ensayos se muestra en el siguiente esquema experimental:

Desarrollo de la técnica experimental



Descripción del proceso de electrocoagulación

La vinaza a temperatura ambiente y un pH previamente determinado, con un volumen de 350 mL, (volumen de tratamiento), se evacua en el electrocoagulador experimental. Seguidamente se energiza el sistema instantáneamente comienzan a desprenderse de la placa metálica que trabaja como cátodo, pequeñas burbujas de hidrógeno, de gran superficie de adsorción dado a su tamaño, la intensidad de burbujeo es directamente proporcional a la intensidad de corriente aplicada. Al cabo de unos minutos comienzan a formarse en las proximidades de la placa positiva (ánodo) unos pequeños flóculos, los cuales van creciendo y pueden tener tres destinos:

1. Precipitar al fondo del equipo (lodo).
2. Incrustarse en las placas positivas.
3. Ser arrastrados a la superficie del líquido, por las burbujas de hidrógeno y oxígeno, formándose una gran espuma.

Al transcurrir el tiempo prefijado se detiene el paso de corriente por el sistema, se remueve la espuma y se evacua el líquido a un recipiente.

A continuación se pone a secar la espuma en la estufa a 40 °C y se procede a centrifugar el líquido tratado para acelerar la floculación, el sólido floculado se extrae de la centrifuga en forma de lodo, este se pone a secar en la estufa a la misma temperatura que la espuma. Al cabo de 72 h aproximadamente, el sólido presente, tanto en la espuma como en el lodo, se encuentra totalmente seco, y listo para ser pesado y envasado, el líquido residual es analizado por el método espectrofotométrico para la determinación del color.

Transmitancia óptica

La transmitancia óptica se define como la fracción de luz incidente, a una longitud de onda especi-

ficada, que pasa a través de una muestra. También se define como la capacidad de los materiales de transmitir la luz. Medida de la transmisión es la transmitancia; o sea la relación entre el flujo luminoso y el flujo luminoso incidente.

En fotometría, la luminancia se define como la densidad angular y superficial de flujo luminoso que incide, atraviesa o emerge de una superficie siguiendo una dirección determinada. Alternativamente, también se puede definir como la densidad superficial de intensidad luminosa en una dirección dada.

Los métodos de absorbancia o transmitancia son ampliamente utilizados para soluciones y dispersiones oscuras. Es por esta razón que se recurrió a la determinación de la transmitancia utilizando un espectrofotómetro, cuyo principio de funcionamiento se basa en la comparación de la intensidad de la luz dispersada por la muestra a valorar (vinaza) con la intensidad de la luz dispersada por una muestra estándar de referencia (agua destilada).

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 sistema. Es conocido que la densidad de corriente determina el régimen de producción de coagulante, los hidróxidos que se forman, regulan la velocidad y volumen de burbujas que se producen, y como 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.

Tabla 1
Valores del por ciento de luminancia, de remoción de color y cantidades de sólidos obtenidos para diferentes densidades de corriente

pH inicial	I (A)	i (A/cm ²)	Sólido total (g)	Cantidad sólido (g)		L (%)	R (%)
				Espuma	Líquido		
4,38	1	0,171 8	1,588 0	0,1	1,488 0	7,8	12,87
4,38	3	0,051 54	2,891 5	1,680	1,211 5	11,5	26,13
4,38	5	0,085 91	4,364 4	3,22	1,144 4	18,1	41,62
4,38	7	0,120 2	7,464 6	5,34	2,124 6	18,59	42,54
4,38	9	0,154 6	12,056 6	10,31	1,746 6	18,77	42,87
4,38	11	0,189 0	13,165 7	11,92	1,245 7	20,80	46,37
4,38	13	0,223 3	15,449 4	14,09	1,359 4	33,19	62,33
4,38	15	0,257 7	17,423 9	16,39	1,033 9	34,59	63,74

En la tabla 1, se reflejan los por ciento de luminancia, de remoción de color y los sólidos obtenidos en el proceso de electrocoagulación de la vinaza, para diferentes densidades de corriente, estos resultados se corroboran en la figura 1, donde

se representa el porcentaje de remoción de color y la cantidad de sólidos obtenidos por electroflotación (formados en la espuma), en contraste con la densidad de corriente aplicada a los electrodos en el proceso de electrocoagulación de la vinaza.

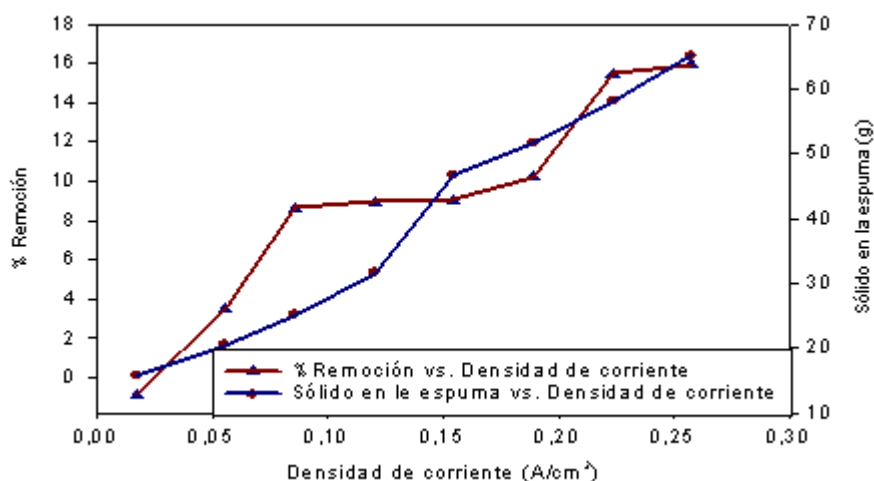


Fig. 1 Efecto de la densidad de corriente sobre el por ciento de remoción de color y de los gramos de sólidos obtenidos en la espuma.

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 0,1546 A/cm² (9A), se obtuvo un 42,87 % de remoción de color y se logró 10,31 g de sólidos en la espuma.

La cantidad de sólidos obtenidos en la espuma aumentan casi de forma lineal, según la Ley de

Faraday. 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 de los mismos, desprendiéndose 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 desprendiendo oxígeno, esto incrementa el burbujeo y la mayor formación de espuma en el sistema. Esto se evidencia en la figura 2 donde se observa que los sólidos obtenidos 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 también 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.

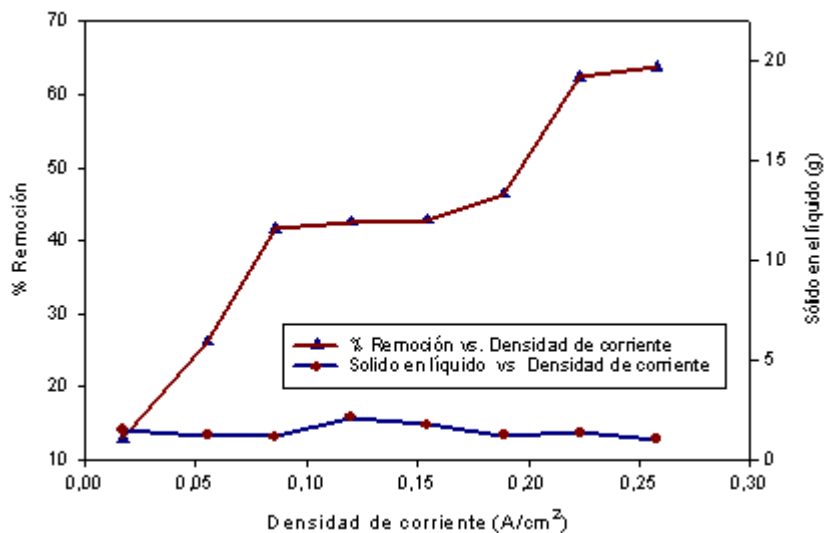
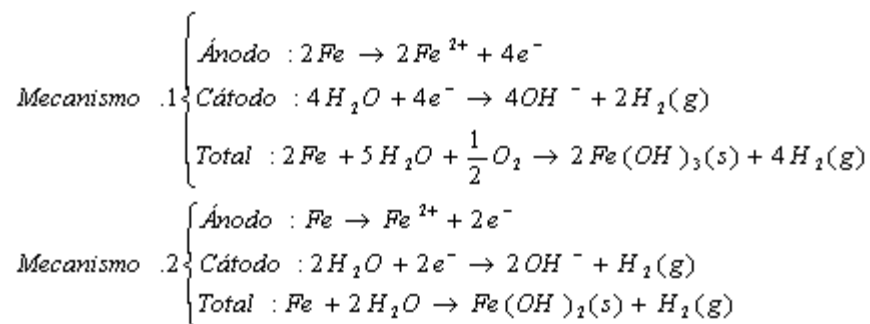


Fig. 2 Efecto de la densidad de corriente sobre el por ciento de remoción de color y de los gramos de sólidos obtenidos en el fondo del líquido.

Cuando se emplean electrodos de hierro como ánodos, luego de la oxidación en el sistema electrolítico, se produce hidróxido de hierro (Fe (OH)_n), donde n

puede ser 2 ó 3. Dos mecanismos son propuestos para la producción del hidróxido metálico, por Daneshvar *et al.* 2006 y Zaroual *et al.* 2006.



El hidróxido metálico insoluble de hierro puede remover los sólidos o contaminantes por la formación de complejos en la superficie o atracción electrostática.

Tabla 2
kW.h/g de sólido removido a diferentes densidades de corriente

I (A)	i (A/cm ²)	pH inicial	pH final	R (%)	Sólido total (g)	kW,h/g de sólidos totales (10 ⁶)
1	0,171 8	4,38	4,84	12,87	1,588 0	13,119 2
3	0,051 54	4,38	5,49	26,13	2,891 5	38,907 1
5	0,085 91	4,38	6,46	41,62	4,364 4	57,281 6
7	0,120 2	4,38	7,64	42,54	7,464 6	57,047
9	0,154 6	4,38	7,59	42,87	12,056 6	52,875 6
11	0,1890	4,38	6,94	46,37	13,165 7	66,144 1
13	0,2233	4,38	6,99	62,33	15,4494	77,1335
15	0,2577	4,38	6,48	63,74	17,4239	89,6757

La densidad de corriente factible técnica y económicamente es de 0,1546 A/cm² (9 A).

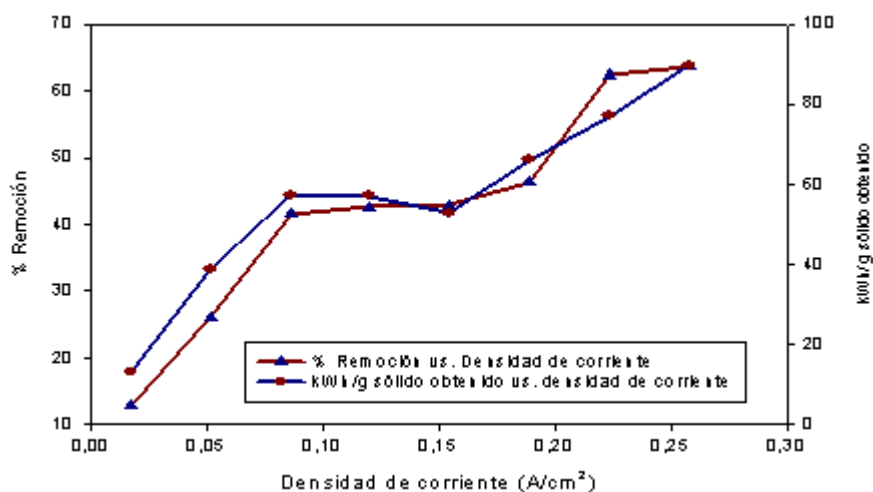


Fig. 3 Efecto de la densidad de corriente sobre el por ciento de remoción de color y el consumo de energía por gramos de sólidos totales obtenidos.

Efecto del tiempo de electrólisis en la eficiencia de la remoción de color, luego de haber determinado la densidad de corriente recomendada:

$$i = 0,1546 \text{ A/cm}^2 \text{ (9A)}$$

El tiempo de electrólisis también influye en la eficiencia del tratamiento del proceso de electrocoagulación. Este tiempo determina la velocidad de producción de iones hierro, producidos por el desgaste que experimentan los electrodos utilizados en el proceso.

En la figura 4 se muestra la relación entre la eficiencia de la remoción de color y el tiempo de electrólisis. Para un incremento del tiempo de 1 a 4

min se observa que el por ciento de remoción disminuye, producto de un aumento en la coloración de la solución, esto puede deberse a la formación de flóculos o a que ocurren reacciones que pueden originar compuestos coloreados, sin embargo, para tiempos mayores los coágulos se estabilizan y aumenta de forma progresiva el por ciento remoción de color, alcanzando valores de aproximadamente 72 %. Resultados similares fueron obtenidos por Zayas, 2007 al aplicar los procesos de floculación y electrocoagulación al tratamiento de la vinaza.

En consecuencia, de acuerdo a los resultados mostrados en la figura 4, el tiempo de electrólisis recomendable es de 8 min.

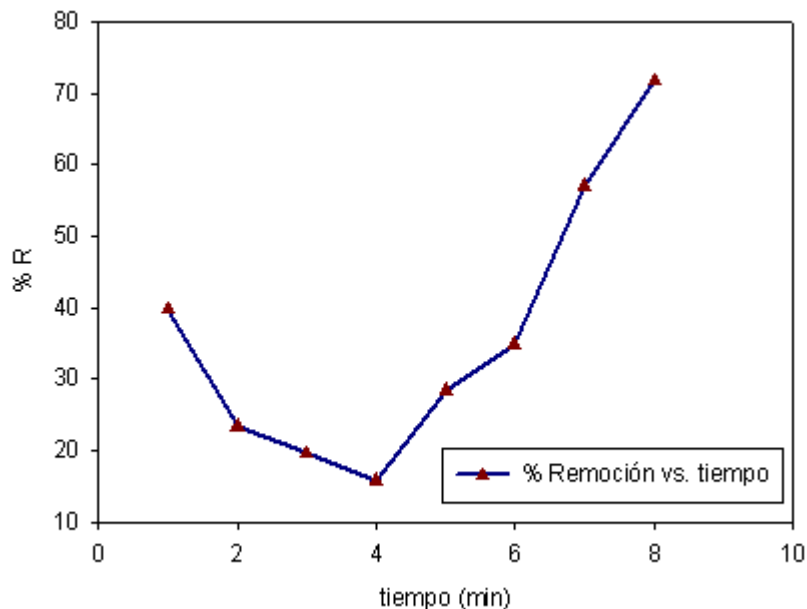


Fig. 4 Efecto del tiempo de electrólisis sobre el por ciento de remoción de color.

Efecto del pH inicial de la solución electrolítica en la eficiencia de la remoción de color luego de haber determinado el mejor valor de la densidad de corriente: $i = 0,1546 \text{ A/cm}^2$ (9A) y del tiempo de electrólisis: 8 min.

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 $i = 0,1546 \text{ A/cm}^2$ (9A) y un tiempo de 8 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. El efecto del pH sobre el por ciento de remoción de color se muestra en la figura 5 y los resultados de la luminancia y la eficiencia de remoción de color en la tabla 3.

Tabla 3
 Valor de pH factible técnicamente
 en el proceso de electrocoagulación,
 para $i = 0,1546 \text{ A/cm}^2$ (9 A) y $t = 8 \text{ min}$

pHi	pHf	% L	% R
3	6,05	22,59	49,19
4,54	6,69	45,99	73,47
5	6,99	49,12	75,72
6	7,38	53,14	78,41
7	7,18	55,42	79,84

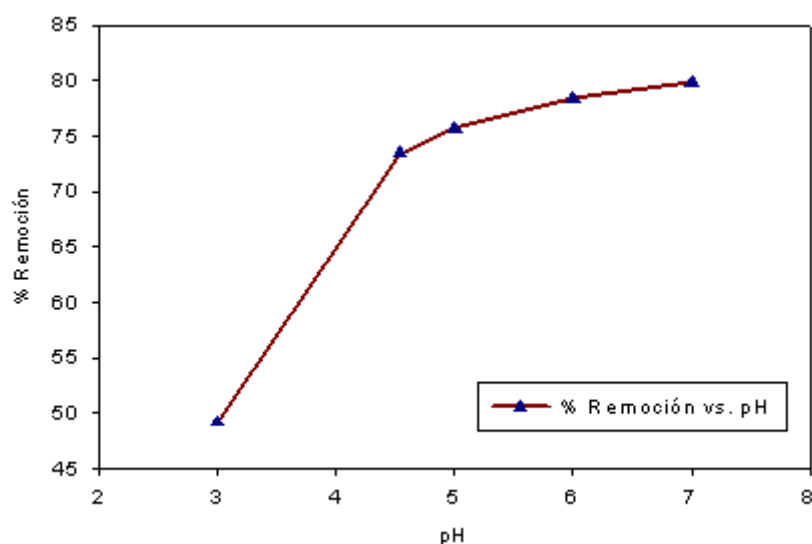


Fig. 5 Efecto del pH sobre el % de remoción de color.

Los resultados revelan, que cuando el pH aumenta desde el pH original de la vinaza hasta 7 (pH neutro) aumenta el porcentaje de remoción, alcanzándose un máximo de 79,84 % a pH 7. En estudios realizados por Zayas *et al.* 2007 en el tratamiento de la vinaza con coagulantes de Hierro, se necesitan alta dosis de coagulante a un pH ligeramente alcalino (8) para lograr una significativa remoción de color y de materia orgánica.

Consumo de energía y costo de operación

El consumo de energía eléctrica y la eficiencia de la corriente son parámetros económicos muy significativos en el proceso de electrocoagulación; similar a otro proceso electrolítico. En la tabla 1, 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 $0,1546 \text{ A/cm}^2$, se alcanza el valor aparentemente más factible técnica y económicamente del porcentaje de remoción de color y a su vez una disminución del consumo de energía. Valores superiores a la densidad de corriente de $0,1546 \text{ A/cm}^2$ no se producen cambios apreciables en la eficiencia de remoción de color con respecto al incremento del consumo energía.

En la tabla 4 se presentan los parámetros característicos calculados para el proceso de electrocoagulación, habiéndose realizado para los valores recomendados de $i = 0,1546 \text{ A/cm}^2$, $t = 8 \text{ min}$ y $\text{pH}=7$.

Tabla 4
Parámetros característicos calculados para
el proceso de electrocoagulación en las condiciones arriba mencionadas

%R	E (kW,h/g de sólido removido)	$\Delta M_{\text{experimental}}$ (g)	$\Delta M_{\text{teórico}}$ (g)	φ (%)	See (kW,h/g electrodo consumido)	Co (\$/ton)
79,92	8,460 1,10 ⁻⁴	1,5	1,250 2	83,35	6,800 188 9	198,92

donde:

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

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

φ : Eficiencia de la corriente (%).

Cenergía: Cantidad de energía consumida por gramo de sólido removido (kW.h/ gramo de sólido obtenido).

Celectrodo: Consumo del electrodo por gramo de sólido removido (g de electrodo consumido/ gramo de sólido obtenido).

See: Consumo de energía eléctrica específica (kW.h/g de electrodo consumido)

Co: Costo de operación (\$/ton sólido removido).

Conclusiones

1. El valor de densidad de corriente factible económica y técnicamente para el proceso de electrocoagulación de la vinaza es de 0,1546 A/cm² (I=9 A), para el cual se alcanza un 46,37 % de remoción de color y un consumo de energía de 52,875 6*10⁻⁵ kW.h/g de sólidos removidos.
2. Se comprobó que a medida que aumenta la densidad de corriente se obtiene mayor cantidad de sólido en la espuma, mientras que el sólido que se obtiene en el líquido (lodo) permanece prácticamente constante.
3. El tiempo de electrólisis que permite obtener mayor eficiencia en el proceso de electrocoagulación de la vinaza para una densidad de corriente de 0,1546 A/cm² es de 8 min.
4. El pH de la solución electrolítica que permite un mayor por ciento de remoción es de 7, para

una densidad de corriente de 0,1546 A/cm² y un tiempo de 8 min.

5. El costo del proceso de electrocoagulación de la vinaza es de 198,92 \$*ton⁻¹ de sólido removido.

Bibliografía

1. 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.
3. 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.
6. Chang T C, Yang W L. "Study on feed yeast production from molasses distillery stillage", Taiwan Sugar 20, 1973.
7. Ching H.W, Tanaka T.S, Elimelech M. "Dynamics of coagulation of kaolin particles with ferric chloride". Water Res. 45, 1994.
10. Clavel Baldaquín, Lázaro. "Electrocoagulación y floculación de la vinaza". Trabajo de Diploma. Facultad de Ingeniería Química. 2008.
11. Daneshvar. N, Oladegaragoze. A, Djafarzadeh. N "Decolorization of basic dye solution by electrocoagulation: an investigation of the effect of operational parameter"
12. Hernández B; Sáenz C; Alberdi C; Ábrego S; Berroguí M; Diñeiro J. M. "Obtención de patrones de comparación para la evolución visual del color de productos agroalimentarios". Óptica pura y aplicada. 2004.
13. Luminancia y transmitancia óptica. Búsqueda el 26 de febrero. 2009. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Luminancia>
19. Morante, Gonzalo G. "Electrocoagulación de aguas residuales". Revista colombiana de física. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. 2002.
20. Piñirí Guilarte, Norleidis; Días González Alexander. "Tratamiento de la vinaza por electrocoagulación". Trabajo de Diploma. Facultad de Ingeniería Química. 2007.
25. Tratamiento de aguas residuales por electrocoagulación.

Búsqueda el 25 de febrero. 2009. Disponible en:
[www.aguamarket.com/sql/temas_interes/
tema_interes.asp?id_tema_interes=71](http://www.aguamarket.com/sql/temas_interes/tema_interes.asp?id_tema_interes=71)

26. Urbietta. Jissel L. Contaminación y purificación del agua. [http://www.monografias.com/trabajos7/mono/
mono.shtm/](http://www.monografias.com/trabajos7/mono/mono.shtm/) Búsqueda, Abril del 2006.