

Obtención de sólidos con posibles efectos inhibidores de la corrosión por el método de electrocoagulación de la vinaza

Obtaining of Solids With Potential Corrosion Inhibitory Effects by Electrocoagulation Vinasse Methods

Dra. Elaine Ojeda-Armaignac, eo@fiq.uo.edu.cu,
MSc. Romelia Hing-Cortón, romelia@fiq.uo.edu.cu

Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

En el presente trabajo se realizan experimentos de electrocoagulación a diferentes muestras de vinazas, con vistas a la obtención de sólidos con posibles efectos inhibidores de la corrosión.

Los ensayos experimentales se realizaron con muestras de vinaza de los complejos azucareros Argeo Martínez» de la provincia Guantánamo y Urbano Noris» de la provincia Holguín, en el antiguo complejo de Destilería-Cervecería "Hatuey" de la provincia Santiago de Cuba, y en la fábrica de ron de Appleton en Kingston Jamaica. Los ensayos preliminares de electrocoagulación realizados con las vinazas procedentes de las destilerías de Santiago de Cuba, Guantánamo y Holguín permitieron la definición de las variables y su dominio, las cuales fueron consideradas en el diseño de experimentos para obtener las condiciones más favorables de operación. Éstos corroboraron que el aumento de la densidad de corriente y el pH incrementan de forma lineal los sólidos que se obtienen y que valores de densidad de corriente superiores a 0,194 5 A/cm² no son factibles ya que aumentan el consumo de energía del proceso y el incremento de los sólidos es despreciable. Se demostró la validación del método de electrocoagulación con los resultados obtenidos en el diseño de experimento a partir de la vinaza de Jamaica, obteniéndose resultados similares a los de la vinaza cubana; alcanzándose las condiciones favorables de operación para: densidad de corriente 0,1945 A/cm², pH igual a 8,97 y tiempo de 5,6 min, con un resultado de 15,42 g de sólidos totales para un mínimo de consumo de 8,44 kW-h/kg.

Palabras clave: vinaza, electrocoagulación, inhibidores de la corrosión.

In this paper, electrocoagulation experiments are performed at different vinasse samples with a view to obtaining solids with potential corrosion inhibitory effects. Experimental tests were performed with samples of complex sugar «Argeo Martínez» Guantánamo province, «Urbano Noris Holguín province, in the antique complex Distillery-Brewery «Hatuey» of the province of Santiago de Cuba and in the rum factory of Appleton» in Kingston Jamaica. Electrocoagulation preliminary tests performed with the vinasse from distilleries of Santiago de Cuba, Guantánamo and Holguín allowed the definition of the variables and their domain, which were considered in the design of experiments to obtain the most favorable conditions of operation. Preliminary experiments corroborated that increasing the current density and pH, increase linearly solids obtained and current density values exceeding 0,194 5 A/cm² are not feasible because they increase the energy consumption process and the increase of solids is negligible. Validation of electrocoagulation method was demonstrated with results of the experimental design from Jamaica's vinasse, that were similar to those obtained with Cuban vinasse; reaching favorable conditions for operation at current density of 0,194 5/cm², pH equal to 8,97 and time 5,6 min, resulting in 15,42 g of total solids for a minimum consumption of 8,44 kW-h/kg.

Key words: vinasse, electrocoagulation, corrosion inhibitors.

Introducción

En países tropicales y subtropicales, donde la caña de azúcar es un cultivo importante, las melazas por lo general son utilizadas como sustrato para la

producción de alcohol, mediante un proceso de fermentación con levaduras. El producto final puede ser alcohol 95 % o licor 40-45 % (ron, aguardiente) y vinazas, como residuo líquido fuertemente coloreado y contaminante de las fábricas de ron y licores.

Estudios realizados concluyen que después de la destilación de alcohol, se obtienen aproximadamente de 9 a 15 L de vinaza por cada litro de alcohol producido. Una destilería típica puede producir diariamente 20 000 litros de aguas residuales muy coloreadas y con un alto contenido de materia orgánica, que constituyen una amenaza para el medio ambiente /1-4/.

La composición de la vinaza está dada, entre otros factores, por la calidad de la materia prima empleada, el proceso de fermentación utilizado, los productos químicos y nutrientes incorporados al proceso, así como el tipo de levadura utilizada /5/. Es importante destacar que la composición de cualquier vinaza depende no sólo de la calidad de las mieles finales empleadas, sino de la tecnología y eficiencia fabril en la producción de alcohol.

La reducción de la contaminación de la vinaza en el origen ha sido el interés primordial de gran parte de los investigadores /6-11/, sin embargo, la variada composición que posee este residual, hace factible su valorización en diversos campos, destacándose su uso como inhibidor de la corrosión.

En Cuba se reporta una investigación sobre una formulación inhibidora de la corrosión en la que se adiciona de forma directa la vinaza combinada con fracción de cera de caña de azúcar y tensoactivos en la formulación de un aditivo para la corrosión del acero al carbono en medio ácido /12/, sin embargo, el uso de la vinaza de forma directa dificulta grandemente el traslado y manipulación de la misma. Estudios realizados por Ojeda E. y Hing R. /13/ sentaron las bases para la obtención de un sólido a partir de la electrocoagulación de la vinaza con carácter inhibidor, método de tratamiento que posibilita la obtención de forma concentrada y económica de un inhibidor a partir de la vinaza y que facilita su traslado y manipulación.

La electrocoagulación es una opción distinta, económica y ambiental que reúne los estándares de descarga del tratamiento de desperdicio de agua y requerimientos de conformidad. Entre los beneficios claves de la electrocoagulación se destacan: los costos de operación, que son menores comparativamente con los de procesos convencionales usando polímeros, equipos simples y

de fácil operación, elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos, genera lodos más compactos y en menor cantidad /14-15/.

Teniendo en cuenta todos los factores que influyen en la composición de la vinaza, así como el método de tratamiento electroquímico que se utiliza para la separación de los sólidos presentes en la misma, la presente investigación persigue los siguientes objetivos: obtención de sólidos a partir de la electrocoagulación de las vinazas procedentes de las destilerías de Santiago de Cuba, Guantánamo y Holguín; y la validación del método de electrocoagulación de las vinazas cubanas empleadas, a partir de la vinaza residual de la fábrica de ron de "Appleton" en Kingston, Jamaica.

Fundamentación teórica

La vinaza de destilación alcohólica es un líquido brillante con partículas en suspensión lo que le atribuye características coloidales. Tiene de color pardo oscuro a temperatura de 30 °C y pardo claro a 86 °C, olor característico a miel final de caña de azúcar, con sabor a malta, y se le observan sedimentos en reposo /16/.

Generalmente, el contenido orgánico de la vinaza es elevado y equivalente a la demanda biológica de oxígeno (DBO₅) en un intervalo de 25 000 – 45 000 mg/L y a una demanda química de oxígeno (DQO) de 70 000 – 120 000 mg/L, los contenidos de nitrógeno y sulfato se encuentran entre 4 000 – 6 000 y 7 000 – 9 000 mg/L, respectivamente, y los sólidos totales entre 30 000 – 45 000 mg/L, el pH oscila entre 4 – 5 /17-20/.

En este tipo de residual más del 50 % está formado por materias primas reductoras, ácidos volátiles y alcohol, que son compuestos carbonados con alto potencial en la producción de proteínas. Igualmente están presentes cantidades apreciables de pentóxido de difósforo, aminoácidos, proteínas, vitaminas y aminas, lo que completa los nutrientes /21, 22/.

A partir del estudio bibliográfico realizado sobre el tema, se ha podido constatar que entre las principales aplicaciones de la vinaza están como abono químico, en el fertirriego, us de sus cenizas en formulados de carbono, como suplemento vitamínico

para alimento animal concentrándolo, como combustible en caldera, para la producción de proteínas unicelulares por biodigestión anaeróbica, bioetanol, biomasa, generación de bioelectricidad, y como inhibidor de la corrosión /23-26/.

Históricamente para el tratamiento de la vinaza han sido empleados diversos métodos de tratamientos biológicos y fisicoquímicos /27-29/. La necesidad de un método de tratamiento que posibilite la obtención de forma concentrada y económica de un sólido con valor agregado a partir de la vinaza, continuó siendo una dificultad. Estudios realizados por Ojeda E. y Hing R. /13/ sentaron las bases para la obtención de un sólido a partir de la electrocoagulación de la vinaza con carácter inhibitor, constituyendo este método uno de los objetivos fundamentales de este trabajo.

La electrocoagulación se basa en la formación *in situ* de un coagulante que proviene del ánodo de sacrificio (cationes de aluminio o hierro), corroído debido a una corriente aplicada, mientras ocurre el desprendimiento simultáneo del hidrógeno en el cátodo. Esto permite la remoción de contaminantes por flotación. La ventaja de este tratamiento es la combinación de los fundamentos de electroquímica, coagulación e hidrodinámica en la remoción de contaminantes. El mecanismo de la electrocoagulación depende de las características del medio acuoso, en especial de la conductividad eléctrica /30-32/.

La electrocoagulación se aplica con el objetivo de obtener, a partir de la vinaza de destilación alcohólica, un sólido que se estudia como inhibidor de la corrosión, confiriéndole un valor agregado al residual y a su vez contribuyendo a disminuir la contaminación en el origen. Este sólido, que puede estar suspendido o disuelto, es una de las causas del poder contaminante de este residual.

Entre los beneficios claves de la electrocoagulación se destacan: los costos de operación son menores comparativamente con los de procesos que usan polímeros, requiere de equipos simples y de fácil operación, elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos, genera lodos más compactos y en menor cantidad, produce flóculos más grandes que los formados por coagulación química y

contienen menos agua ligada, alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes, el paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas incrementando la coagulación, los contaminantes son arrastrados por las burbujas a la superficie del agua tratada y son removidos con mayor facilidad /33, 34/.

Como principales desventajas del proceso de electrocoagulación, se destacan: la necesidad de reponer los electrodos de sacrificio, y que el óxido formado en el ánodo crea una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso /15/.

Métodos utilizados y condiciones experimentales

Materiales

Los ensayos experimentales se realizaron con muestras de vinaza, residual del proceso de obtención de alcohol etílico a partir de las mieles finales de la caña de azúcar, que se lleva a cabo en las destilerías pertenecientes a los complejos azucareros "Argeo Martínez" de la provincia Guantánamo, "Urbano Noris" de la provincia Holguín, el antiguo complejo de Destilería-Cervecería "Hatuey" de la provincia Santiago de Cuba, y en la fábrica de ron de "Appleton" en Kingston, Jamaica.

En la electrocoagulación de la vinaza se utilizó una celda electrolítica a escala de laboratorio, constituida por un reactor intermitente de vidrio para el volumen de vinaza de 350 mL a temperatura ambiente, equipada con dos electrodos planos de aluminio dispuestos verticalmente. Las dimensiones totales son: 68 mm de largo, 40 mm de ancho, y 1 mm de espesor para un área total efectiva de 56,56 cm² y espaciados 15 mm. Para el suministro de energía al sistema se utilizó una fuente de corriente directa con la que se regula 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 (figura 1).

Los reactivos químicos que se emplearon en la realización de los ensayos experimentales para el ajuste del pH inicial de la vinaza fueron los siguientes: ácido sulfúrico (H_2SO_4), concentración 98 %, e hidróxido de sodio (NaOH) concentración 97 %.

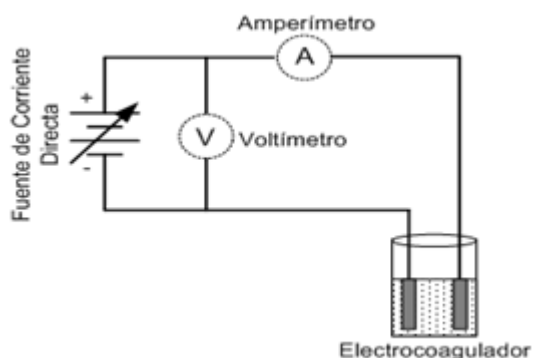


Fig. 1 Instalación experimental de la electrocoagulación.

Métodos

Caracterización de las vinazas

Los métodos analíticos para la determinación de DQO, DBO_5 , sólidos, viscosidad relativa, densidad, conductividad y pH, empleados para la determinación de la composición físico química de las distintas vinazas utilizadas, fueron extraídos de "Standard Methods for the examination of water and wastewater" /35/.

Procedimiento para la obtención de los sólidos por electrocoagulación

La vinaza a temperatura ambiente y pH ajustado previamente, con un volumen de 400 mL, (volumen de tratamiento), se evacua en el electrocoagulador experimental (figura1). El sistema se energiza usando la fuente de corriente directa con la intensidad de corriente que se fija. A medida que transcurre el proceso, el volumen de espuma se incrementa. Al transcurrir el tiempo prefijado se abre el circuito, se separa 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 72 h, el líquido tratado se

centrifuga y el sólido se separa en forma de lodo, el cual se pone a secar en la estufa a la misma temperatura y tiempo que la espuma. Los sólidos secos se pesan y envasan.

Estudio preliminar de las variables del proceso de electrocoagulación

Utilizando los valores reportados en la literatura se establecieron las condiciones iniciales de operación de los primeros experimentos de electrocoagulación, fijando: temperatura ambiente a la entrada de la vinaza, pH 4,3 - 4,5 (pH original de la vinaza), tiempo de electrólisis 7 min, aluminio como material de electrodo, se varió la densidad de corriente en un intervalo de 0,088 4, 0,176 8 y 0,265 2 A/cm², con vinazas procedentes de las destilerías de Santiago de Cuba, Guantánamo y Holguín. A la misma temperatura, tiempo, intervalos de densidad de corriente, material de electrodos y tipos de vinazas se varió el pH. Una vez determinado el comportamiento del pH y de las diferentes vinazas en la obtención de los sólidos se amplió el intervalo de la densidad de corriente entre valores de 0,017 7 y 0,265 2 A/cm², y se evaluaron dos materiales de electrodos: hierro y aluminio. Los parámetros escogidos para evaluar la efectividad del proceso de electrocoagulación fueron: la cantidad de sólidos separados y los kW·h por gramo de sólidos obtenidos. Finalmente se realizó un análisis técnico-económico comparativo de los resultados obtenidos con los dos materiales utilizados para la confección de los electrodos.

Diseño de experimentos

Para precisar la influencia de la densidad de corriente, el pH y el tiempo de electrólisis más adecuado en el proceso de electrocoagulación se empleó el diseño de experimentos factorial 3³ con una réplica. El procesamiento de los resultados experimentales se realizó mediante el programa STAGRAPHICS Plus 5.1. Los factores para el diseño y sus niveles aparecen en la tabla 1.

Tabla 1
Niveles de las variables utilizadas en los experimentos

Factor	Unidad	Variable decodificada	Nivel		
			-1	0	+1
Densidad de coiente	A/cm ²	i	0,053 0	0,123 8	0,194 5
pH	-	pH	3	6	9
Tiempo de electrólisis	min	t	3	5	7

Validación del método

La validación del método se determinó utilizando la vinaza de la fábrica de ron de Appleton en Kingston, Jamaica. El procedimiento para la obtención de los sólidos por electrocoagulación fue el mismo utilizado para las vinazas cubanas. Los experimentos se llevaron a cabo mediante un diseño factorial 3³ con una réplica, igual que el planeamiento explicado en el sub-acápite anterior.

Resultados y su discusión

Resultados de la caracterización de las diferentes vinazas

Los resultados de la caracterización físico-química de las diferentes vinazas demuestran, que no existen diferencias significativas entre los valores analizados, aún cuando la composición de cualquier vinaza depende de la calidad de las mieles finales empleadas, así como de la tecnología y eficiencia fabril en la producción de alcohol. En las figuras 2 (a) y 2 (b) se presentan los perfiles analíticos de las vinazas estudiadas.

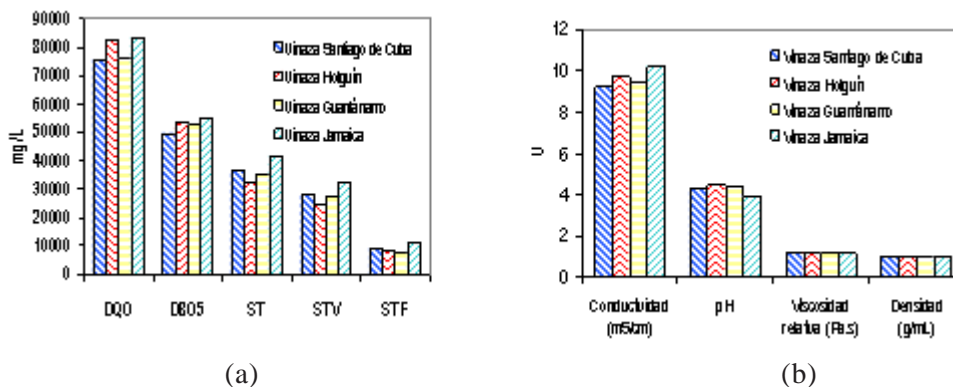


Fig. 2 Comparación de las características de las diferentes vinazas estudiadas.

Resultados del estudio preliminar de las variables del proceso de electrocoagulación

Los resultados comparativos obtenidos en las experiencias a temperatura ambiente, pH original de las diferentes vinazas, tiempo 7 min, electrodos de aluminio y diferentes densidades de corrientes, se representan en la figura 3 A las mismas condiciones anteriores se determinó el comportamiento del pH inicial, el cual se varió en un intervalo de: pH original de cada vinaza (4,3; 4,5 y 4,45) y pH 9 (figura 4).

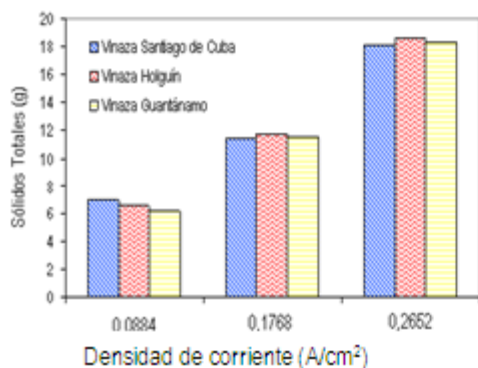


Fig. 3 Comportamiento de las diferentes vinazas a distintos valores de densidad de corriente.

Al variar el pH inicial de las vinazas, se observa que para cada densidad de corriente las mayores cantidades de sólidos se alcanzan a pH 9, y que a este valor de pH y a la densidad de 0,265 2 A/cm² se logran los mejores resultados (figura 4). Para cada residual existe un rango de pH óptimo para el cual la coagulación, mediante la formación de los hidróxidos, sucede rápidamente. El rango de pH se relaciona con el tipo de electrodos utilizados en el proceso de electrocoagulación, permitiendo una mayor separación de sólidos.

Se utilizó hierro y aluminio con el fin de determinar el comportamiento del material de

En ambos experimentos (figuras 3 y 4), se observa que con las tres vinazas estudiadas se obtienen cantidades de sólidos similares, y que a medida que se incrementa la densidad de corriente aumenta de forma proporcional la cantidad de sólidos que se obtiene, independientemente del origen de la vinaza, de ahí que al no haber cambios apreciables se puede trabajar de forma indistinta con ellas. La selección de la densidad de corriente debe llevarse a cabo teniendo en cuenta otros parámetros de operación, como pH y tiempo.

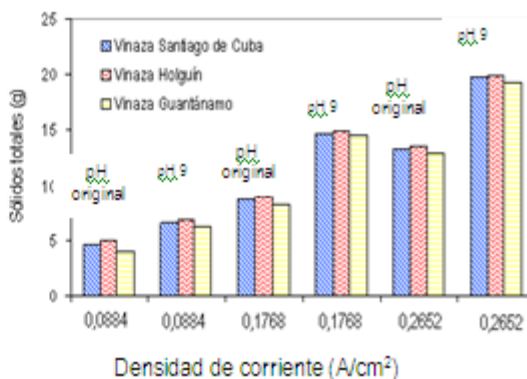


Fig. 4 Comportamiento de las diferentes vinazas a distintos valores de densidad de corriente y de pH inicial.

los electrodos. En el intervalo de densidad de corriente de 0,088 4 a 0,194 5 A/cm² (figura 5) no se aprecia una variación notable del consumo de energía mientras que los sólidos obtenidos aumentan de forma, prácticamente, lineal para ambos materiales de electrodos. Sin embargo, entre 0,194 5 y 0,229 8 A/cm² se pudo comprobar que con electrodos de hierro los sólidos obtenidos permanecen sin cambios considerables mientras que el consumo de energía aumenta casi el doble. Con electrodos de aluminio se obtienen menores consumos de energía y mayores cantidades de sólidos que con electrodos de hierro, para todas las densidades de corriente estudiadas.

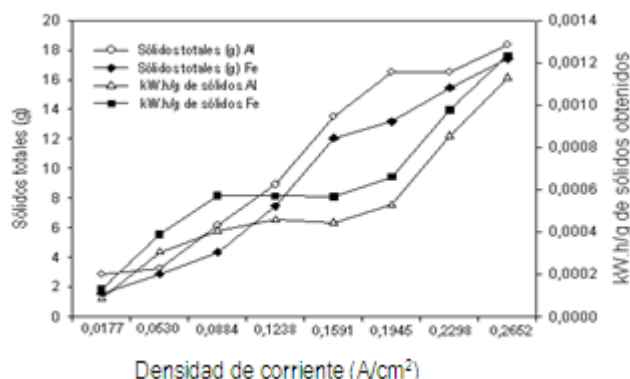


Fig. 5 Variación de los sólidos totales y del consumo de energía en función del material de electrodo y la densidad de corriente.

El análisis de los resultados experimentales preliminares, permitió comprobar que el aumento de la densidad de corriente y el pH incrementan de forma lineal los sólidos que se obtienen de la electrocoagulación de la vinaza, sin llegar a alcanzar un máximo cuando se analizan estas variables de forma independiente. El análisis de los kW·h por gramo de sólido obtenido, determinó que valores de densidad de corriente superiores a 0,194 5 A/cm² no son favorables, ya que aumentan el consumo de energía del proceso y el incremento de los sólidos es despreciable (figura 5). También se comprobó que con el aluminio como electrodo se logran los mejores resultados en el proceso, ya que se separan más sólidos con un menor consumo de energía.

Diseño de experimentos

Con los resultados experimentales obtenidos en los ensayos preliminares se desarrolló el diseño de experimentos. Las variables independientes consideradas fueron la densidad de corriente, el pH y el tiempo de electrólisis, el material de electrodo utilizado fue el aluminio. Las variables

respuestas fueron los sólidos obtenidos y el consumo de energía.

Según figura 6 y teniendo en cuenta las condiciones en que se desarrollaron los experimentos, la mayor influencia sobre la respuesta sólidos totales corresponde a la variable densidad de corriente, también resultaron significativas las variables tiempo de electrólisis y pH, así como las interacciones densidad de corriente-tiempo y densidad de corriente-pH. Todas las variables e interacciones significativas son proporcionales a la variable respuesta, provocando un incremento en la misma. La interacción pH-tiempo no resultó significativa.

Para el consumo de energía según figura 7, en los intervalos investigados se comprobó que la densidad de corriente, el tiempo de electrólisis, el pH y la interacción densidad de corriente-pH son factores significativos. La densidad de corriente y el tiempo son directamente proporcionales a la variable respuesta. Mientras que el pH y la interacción densidad de corriente-pH provocan una disminución del consumo de energía. Las interacciones pH-tiempo y densidad de corriente-tiempo no resultaron significativas.

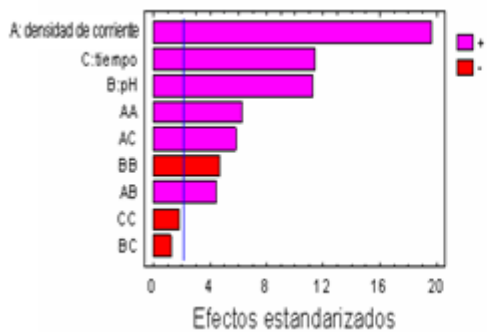


Fig. 6 Diagrama de Pareto para los sólidos obtenidos.

En las figuras 8 (a) y (b) se representan las superficies de contorno para la interacción densidad de corriente-tiempo y para la interacción densidad de corriente-pH respectivamente, para la respuesta sólidos totales, el resultado de estas curvas demuestran que estamos en presencia de interacciones significativas, que indican que estamos cerca de un máximo localizado para la densidad de corriente de 0,1945 A/cm², el tiempo de 7 min y el pH de 8,8, donde se alcanzan 18,356 g de sólidos.

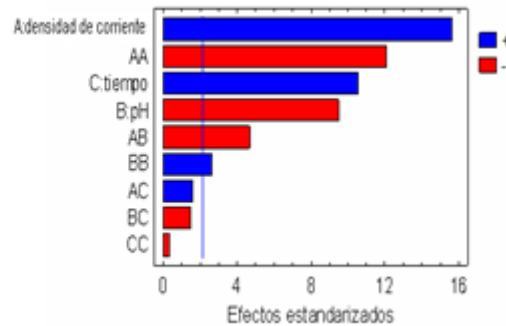


Fig. 7 Diagrama de Pareto para el consumo de energía.

En la figura 9 aparece la superficie de contorno para la interacción densidad de corriente-pH correspondiente al consumo de energía, las curvas de este gráfico indican que hay interacciones significativas y que nos encontramos cerca de condiciones que minimizan el consumo de energía, las cuales corresponden a la densidad de corriente de 0,0530 A/cm² y pH 6,6 para un tiempo de electrolisis de 7 min donde se obtienen 6,2026 g de sólidos, pero contradictoriamente son las condiciones donde se alcanzan las menores cantidades de sólidos.

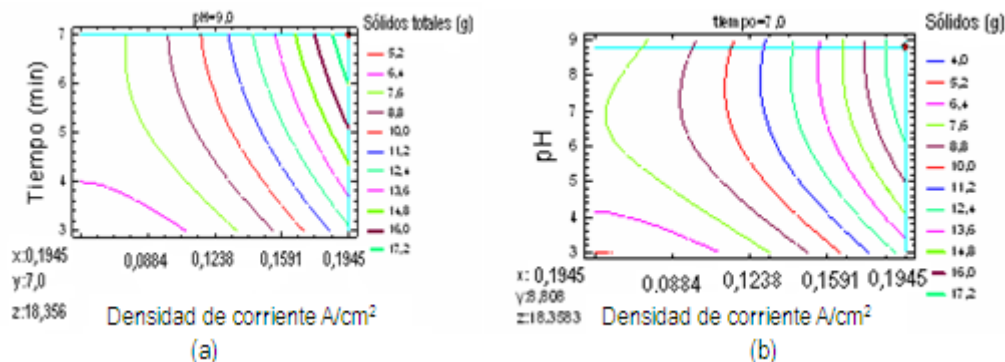


Fig. 8 Superficie de contorno para la respuesta estimada sólidos totales.

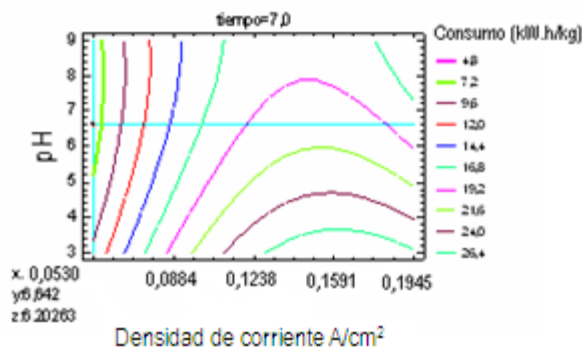


Fig. 9 Superficie de contorno para la respuesta estimada consumo de energía.

Optimización de respuesta múltiple

El procedimiento de optimización de respuesta múltiple determina la combinación de factores experimentales que simultáneamente optimiza varias respuestas. En la figura 10 se representa el gráfico de contorno para la optimización de respuesta múltiple respecto a la interacción densidad de corriente-pH por ser la más significativa para ambas respuestas, este análisis fue hecho con la vinaza cubana. Los resultados revelan que las condiciones favorables se alcanzan para: densidad de corriente $0,1945 \text{ A/cm}^2$, pH igual a $8,97$ y tiempo de $4,77 \text{ min}$, con un resultado de $15,42 \text{ g}$ de sólidos totales para un mínimo de consumo de $8,44 \text{ kW.h/kg}$.

Validación del método

Se realizó un nuevo diseño de experimento utilizando la vinaza residual de la fábrica de ron de Appleton en Jamaica, para la validación del método

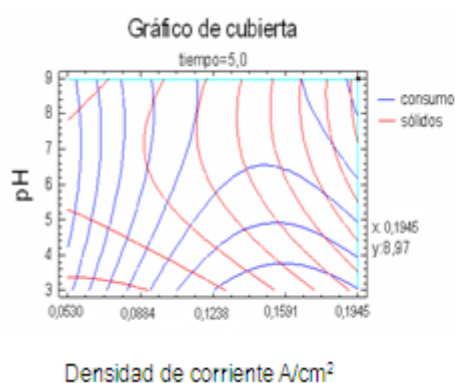


Fig. 10 Contornos de superficie de la optimización de respuesta múltiple para la vinaza cubana.

Conclusiones

1 Se comprobó, en los experimentos preliminares, que el aumento de la densidad de corriente y el pH incrementan de forma lineal los sólidos que se obtienen de la electrocoagulación de la vinaza, mientras que el análisis de los kW.h/g de sólido obtenido, permitió determinar que valores de densidad de corriente superiores a $0,1945 \text{ A/cm}^2$ no son factibles ya que aumentan el consumo de

de electrocoagulación. El procedimiento para este y el diseño de experimentos se desarrolló según lo descrito en los sub-acápites para la vinaza cubana. Se estudiaron las mismas variables independientes, así como sus intervalos, el material de electrodo utilizado fue el aluminio. Las variables respuestas fueron las mismas: sólidos totales y consumo de energía.

En la figura 11 se representa el gráfico de contorno para la optimización de respuesta múltiple respecto a las interacciones densidad de corriente-pH, este análisis fue hecho teniendo en cuenta las respuestas analizadas para la vinaza cubana y jamaicana en conjunto, determinándose que las condiciones favorables se alcanzan para: densidad de corriente $0,1945 \text{ A/cm}^2$, pH $8,97$ y tiempo de $4,87 \text{ min}$. Las curvas de tendencias del gráfico de contorno demuestran que el comportamiento del consumo de energía y los sólidos obtenidos para ambas vinazas y para las dos variables respuestas son similares, por lo que se demuestra la validación del método.

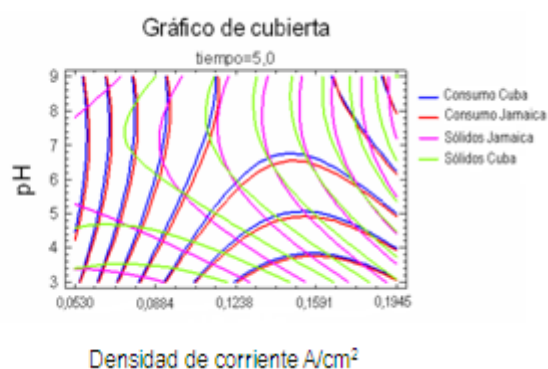


Fig. 11 Contornos de superficie de la optimización de respuesta múltiple para la vinaza cubana y jamaicana.

energía del proceso y el incremento de los sólidos es despreciable.

2 Se demostró, mediante el diseño de experimento que todas las variables estudiadas: densidad de corriente, pH y tiempo de electrolisis, presentan un efecto altamente significativo sobre la cantidad de sólidos obtenidos y el consumo de energía en el intervalo definido para cada variable. Igualmente, resultan altamente significativas

las interacciones entre dos factores: densidad-tiempo y pH-densidad para los sólidos obtenidos, y pH-densidad para el consumo de energía.

- 3 Se determinó, mediante la optimización de respuesta múltiple que las condiciones favorables de operación se alcanzan para: densidad de corriente 0,194 5 A/cm², pH igual a 8,97 y tiempo de 5,6 min, con un resultado de 15,42 g de sólidos totales para un mínimo de consumo de 8,44 kW.h/kg.
- 4 Se demostró la validación del método de electrocoagulación con los resultados obtenidos en el diseño de experimento a partir de la vinaza de Jamaica, se obtuvieron resultados similares a los de la vinaza cubana.

Nomenclatura

DBO₅: demanda bioquímica de oxígeno, mg/L

DQO: demanda química de oxígeno, mg/L

i: densidad de corriente, A/cm²

pH: grado de acidez de la solución electrolítica

ST: sólidos totales, mg/L

STV: sólidos totales volátiles, mg/L

STF: sólidos totales fijos, mg/L

t: tiempo de electrocoagulación, s

Bibliografía

- 1 KOTRAPPAVAR, N. S.; HOSAMANI, K. M.; AMINABHAVI, T. M. "Distillery Wastewater Treatment by the Membrana-Based Nanofiltration and Reverse Osmosis Processes". *Water Research* 40. Págs. 2349-2356, 2006.
- 2 KRISHNA, P. R.; SRIVASTAVA, S. N. "Electrochemical Degradation of Distillery Spent Wash Using Catalytic Anode: Factorial design of Experiments". *Chemical Engineering Journal* 146. Págs. 22-29. 2009.
- 3 MOHANA, S.; ACHARYA B. K. "Distillery Spent Wash: Treatment Technologies and Potential Applications". *Journal of Hazardous Materials* 163. Págs. 12-25, 2009.
- 4 YAVUZ, Y. "EC and EF Processes for the Treatment of Alcohol Distillery Wastewater". *Separation and Purification Technology* 53. Págs. 135-140. 2007.
- 5 ALMEIDA, P.; PÉREZ, J. "Estudio de algunas vías de aprovechamiento de los efluentes de destilería". *Revista ICIDCA*, sobre los derivados de la caña de azúcar. N° 2.Vol. XXI. Págs. 4, 5. 1987.
- 6 CHEN, Y.; LEI, H., WEIQING, H., WANG, L., XIUYUN, S., JIANSHEG, L. "Treatment of High Explosive Production Wastewater Containing RDX by Combined Electrocatalytic Reaction and Anoxic-oxic bioDegradation". *Chemical Engineering Journal* 168, 1256-1262, 2011
- 7 DÁVILA, R. J., MARRIAGA, C. N., MACHUCA, M. F., "Remoción de sólidos totales de vinazas por electrocoagulación-electroflotación", *Dyna*. Vol. 72. Págs. 158, 2009.
- 8 FERREIRA, R. L.F., AGUIAR, M. M., MESSIAS, T. G., POMPEU, G. B., QUEIJEIRO, L. A.M., SILVA, D. P., MONTEIRO, R.,T. "Evaluation of Sugar-Canevinassetreatedwith *Pleurotussajor-caju* Utilizing aquatic organisms astoxicological indicators". *Ecotoxicology and Environmental Safety* 74. Págs. 132-137, 2011.
- 9 KUMAR, V. A., CHANDRALATA, R., GOVIND, N. C., "A novel hybrid technology for remediation of molasses-based raw effluents". *Bioresource Technology* 102. Págs. 2411-2418. 2011.
- 10 SILES, J. A., GARCÍA-GARCÍA, I., MARTÍN, A., MARTÍN, M. A. "Integrated Ozonation and Biomethanization Treatments of Vinasse Derived from Ethanol Manufacturing". *Journal of Hazardous Materials* 188. Págs. 247-253, 2011.
- 11 SOTO L, M., MOURE, A., DOMÍNGUEZ, H., PARAJÓ, J. C. "Recovery, Concentration and Purification of Phenolic Compounds by Adsorption: A Review". *Journal of Food Engineering* 105. Págs. 1-27, 2011.
- 12 SANDIANES, V. B., URUCHURTU, C. J., RONDA, M. M. "Composición inhibitoria de la corrosión del acero en medio ácido". *Tecnología Química*. Volumen 29:2. 2009.
- 13 OJEDA, E., HING, R. "Obtención de inhibidores ecológicos de la corrosión por electrocoagulación a partir de la vinaza". *Tecnología Química*. Volumen 28:1. 2008.
- 14 BARROCAL, V. M., GARCÍA, C. M., GONZÁLEZ, B. G., COCA, M. "Production of Biomasa by Spirulina Máxima Using Sugar Beet Vinasse in Growth Media". *New Biotechnology*. 27: 6. 2010.
- 15 RESTREPO, M. A., ARANGO, R. A., GARCÉS, G. L. "La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas". *Producciones + Limpías*. Vol. 1. No. 2. 2006.
- 16 Colectivo de autores. "Características de la vinaza de destilería (mosto)". Realizado por el grupo de tratamiento y aprovechamiento de residuales de la Facultad de Ciencias Naturales. Universidad de Oriente. 2004.

-
- 17 DÁVILA, R. J., MACHUCA, M. F., MARRIANGA, C. N. "Reducción de demanda química de oxígeno, carbono orgánico total y sólidos totales en vinazas mediante electroflotación/oxidación", *Ingeniería e investigación*. vol. 29. 1. 2009.
- 18 KANNAN N., KARTHIKEYAN G., TAMILSELVAN N., "Comparison of treatment potential of electrocoagulation of distillery effluent with and without activated Areca catechu nut carbon". *B* 137. Págs. 1803-1809, 2006.
- 19 KOTRAPPAVAR N.S., HOSAMANI K.M., AMINABHAVI T.M., "Distillery wastewater treatment by the membrana-based nanofiltration and reverse osmosis processes". *Water Research* 40. Págs. 2349-2356, 2006.
- 20 MOHANAKRISHNA G., MOHAN V.S., SARMA P.N., "Bio-electrochemical treatment of distillery wastewater in microbial fuel cell facilitating decolorization and desalination along with power generation". *Journal of Hazardous Materials* 177. Págs. 487-494. 2010.
- 21 AGUILAR M., "Determinación de algunas vitaminas del complejo B en Mostos de Destilerías". Tesis en obtención al título de Licenciado en Química. Universidad de Oriente. Págs. 3, 4. 1989.
- 22 MÁRTINEZ R., "Determinación del contenido proteico en Mostos de Destilería". Tesis en obtención al título de Licenciado en Química. Universidad de Oriente, páginas 4 y 5. 1989.
- 23 BARROCAL V.M., GARCÍA C.M., GONZÁLEZ B.G., COCA M., "Production of biomasa by *Spirulina* máxima using sugar beet vinasse in growth media". *New Biotechnology*, 27: 6. 2010.
- 24 KAPARAJU P., SERRANO M., ANGELIDAKI I., "Optimization of biogas production from wheat straw stillage in UASB reactor". *Applied Energy* 87. Págs. 3779-3783. 2010.
- 25 MOHANAKRISHNA G., VENKATA M.S., SARMA P.N., "Bio-electrochemical treatment of distillery wastewater in microbial fuel cell facilitating decolorization and desalination along with power generation", *Journal of Hazardous Materials* 177. Págs. 487-494. 2010.
- 26 OJEDA E., HING R., "Estudio de inhibidores ecológicos y naturales". *Tecnología Química*, Volumen 26: 3. 2006.
- 27 Rodríguez S., Bermúdez R.C., Giardina P., Fernández B.M., "Tratamiento Combinado (anaerobio-aerobio) para la Decoloración de la Vinaza de Destilería". *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, vol. 36. No. Especial. 2005.
- 28 SOTO L.M., MOURE A., DOMÍNGUEZ H., PARAJO J.C., "Charcoal adsorption of phenolic compounds present in distilled grape pomace". *Journal of Food Engineering* 84. Págs. 156-163. 2008.
- 29 VILLALOBOS C.F. Disminución de la materia orgánica biodegradable presente en vinazas mezcaldas mediante digestión anaerobia. Tesis de grado. Universidad Tecnológica de la Mixteca. 2009.
- 30 LINARES H.I, BARRERA D.C., ROA M.G., BILVEU B., UREÑA N.F., "Influence of the anodic material on electrocoagulation performance", *Chemical Engineering Journal*. 148. Págs. 97-105. 2009.
- 31 MANPREET B.S., REDDY A.S., THUKRAL A.K., "Electrocoagulation removal of Cr(VI) from simulated wastewater using response surface methodology". *Journal of Hazardous Materials* 172. Págs. 839-846, 2009.
- 32 TAWANG C., CHOU W.L., KUO Y.M., "Removal of COD from laundry wastewater by electrocoagulation/electroflotation", *Journal of Hazardous Materials* 164. Págs. 81-86. 2009.
- 33 BEN M.S., Calmano W., Adin A., "Iron-oxidation processes in an electroflocculation (electrocoagulation) cell", *Journal of Hazardous Materials* 171. Págs. 704-709, 2009.
- 34 CAÑIZARES P., JIMÉNEZ C., MARTÍNEZ F., RODRIGO M.A., SÁEZ C., "The pH as a key parameter in the choice between coagulation and electrocoagulation for the treatment of wastewaters", *Journal of Hazardous Materials* 163. Págs. 158-164, 2009.
- 35 APHA. *Standard Methods for the examination of wastewater*. 1998.