

Estudio del proceso de electrocoagulación de la vinaza empleando electrodos de aluminio.

Study of the vinasse electrocoagulation process using aluminum electrodes.

Autores: Ing. Daylín Frómeta-Frómeta, Lic. Williams Miguel Díaz-Rosales

Organismo: Centro de Aplicaciones Tecnológicas para el Desarrollo Sostenible, Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente, Guantánamo, Cuba.

E-mail: daylin@slcads.gtmo.inf.cu

Resumen.

Este trabajo forma parte de una investigación ejecutada en la Universidad de Oriente en búsqueda de soluciones que permitieran obtener las condiciones operacionales más factibles, que técnica y económicamente influyen en el proceso de electrocoagulación de la vinaza, utilizando electrodos de aluminio. La vinaza utilizada en este trabajo se adquiere como residual del proceso de obtención de alcohol etílico. 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 inhibidores de la corrosión, 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: Vinaza, electrocoagulación, sólidos inhibidores de la corrosión.

Abstract.

This work is part of an investigation accomplished at the Universidad de Oriente, in search of solutions that would allow obtaining the most feasible operational conditions, which technically and economically influence the vinasse electrocoagulation process using aluminum foil electrodes. The vinasse used in this work is acquired as residual from the process to obtain ethyl alcohol. Experimental tests were carried out to determine the current density, the electrolysis time and the pH of the solution. In the study of the electrocoagulation process, the color determination was applied as a vinasse quality's parameter and to monitor the effectiveness of this process, regarding contamination and obtaining solid inhibitors of corruption. Once determined these conditions, a preliminary economic analysis was made to determine the operational cost expressed in Cuban pesos per tons of solids removed.

Keywords: Vinasse, electrocoagulation, corrosion inhibitory solids.

Introducción.

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 inhibitoras 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, lo que contribuye a la disminución de 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 al 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 alcoholera 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.

Estudios realizados por Ojeda E. y Hing R. permitieron evaluar los sólidos de la vinaza obtenidos por electrocoagulación, demostrando la efectividad de este producto como inhibidor de la corrosión del acero a diferentes valores de pH.

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. El fundamento teórico de la electrocoagulación consiste en que la precipitación se lleva a cabo al mismo tiempo que la desestabilización de coloides.

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.

Método o Metodología.

Residuo industrial: La vinaza

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. Este residual es vertido directamente a un conducto que descarga dicho residuo en una laguna de oxidación.

Los reactivos químicos utilizados para la realización de los ensayos experimentales para determinar el efecto del pH fueron los siguientes:

Ácido sulfúrico (H_2SO_4) con una concentración de un 10%.

Hidróxido de sodio (NaOH) con una concentración de un 10%.

Electrodos

El material de los electrodos utilizados en esta investigación, es una aleación de aluminio. Es un excelente conductor del calor y de la electricidad; el valor de su densidad es de $2,7g/cm^3$ y las temperaturas de fusión y ebullición son de $660^{\circ}C$ y $2,467^{\circ}C$, respectivamente.



Figura 1. Electrodos de aluminio.

Descripción de la instalación experimental

Para la obtención del sólido a partir de la vinaza se utilizó un electrocoagulador a escala de laboratorio el cual está compuesto por dos 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 15 mm, previendo un cortocircuito en la instalación. 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 para que la diferencia de potencial entre las placas fuera la misma, ya que si se conectaran en serie existiría de un electrodo a otro una progresiva caída de voltaje y a la vez una mayor resistencia al paso de la corriente, esto se traduce en un incremento del consumo de energía. Todo este sistema se encuentra en el interior de un Beaker transparente de 1 mm de espesor, geometría cilíndrica, 10 cm de diámetro y 20 cm de profundidad. La capacidad

útil de la instalación es de 350 mL de vinaza a procesar, cubriendo el 100 % de los electrodos. En la **Figura 2** se observa la instalación experimental y en la **Figura 3** se puede observar tanto el cátodo como el ánodo luego del proceso de electrocoagulación, éste último cubierto por partículas sólidas.



Fig 2. Instalación experimental.

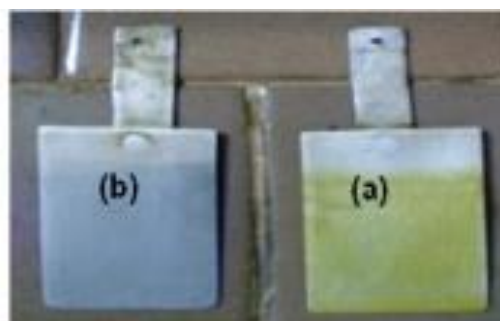


Fig 3. Electrodo luego del proceso de electrocoagulación: (a)Cátodo,(b) Ánodo

La secuencia del desarrollo del proceso de electrocoagulación se muestra en la siguiente figura.



Fig 4. Proceso de electrocoagulación.

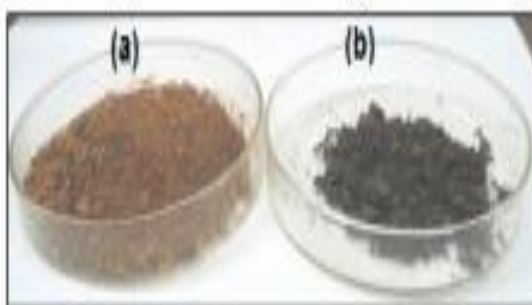


Figura 5. Sólidos Secos obtenidos de la electrocoagulación de la vinaza

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 centrífuga en

forma de lodo, éste se pone a secar en la estufa a la misma temperatura que la espuma. Al cabo de 72 horas 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.

Resultados y Discusión.

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. Cantidad de sólidos obtenidos en la espuma y en el líquido para diferentes densidades de corriente.

I (A)	pH _i	Luminancia (%)	%R	i (A/cm ²)	Sólidos totales (g)	Cantidad de sólidos (g)	
						Espuma	Líquido
1	4,02	9,92	21,08	0,01768	2,8903	0,3826	2,5077
3	4,02	17,68	40,73	0,05304	3,2712	0,8602	2,411
5	4,56	28,47	57,09	0,088402	6,1515	3,52	2,6315
7	4,47	47,38	74,49	0,12376	8,9202	6,16	2,7602
9	4,43	69,16	87,41	0,15912	13,4839	11,09	2,3939
11	4,56	72,13	88,84	0,19448	16,4816	14,11	2,3716
13	4,47	75,56	90,43	0,22984	16,4722	14,24	2,2322

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 Tabla 2. se muestran los datos, estos resultados permiten corroborar que la densidad de corriente más factible técnica y económicamente es 0.15912 A/cm² para la cual se obtiene un 87.41% de remoción de color y 44.50*10⁻⁵ kW.h/g de sólidos removidos

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

I (A)	pH _i	pH _f	%R	Sólidos totales (g)	kW.h/g totales	i (A/cm ²)
1	4,02	4,07	21,08	2,8903	8,65E-05	0,01768
3	4,02	4,17	40,73	3,2712	3,06E-04	0,05304
5	4,56	5,03	57,09	6,1515	40e64e-5	0,088402
7	4,47	4,93	74,49	8,9202	4,58E-04	0,12376
9	4,43	4,8	87,41	13,4839	4,45E-04	0,15912
11	4,56	4,43	88,84	16,4816	5,28E-04	0,19448
13	4,47	4,17	90,43	16,4722	8,55E-04	0,22984

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.

El cálculo económico se hizo teniendo en cuenta fundamentalmente el consumo de la energía eléctrica (Cenergía), la eficiencia de la energía eléctrica (φ), el consumo de energía eléctrica específica (See) y el costo de operación (Co).

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

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

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:

$$See = \frac{n * F * V * \varphi}{3.6 * 10^3 * M} \qquad \varphi = \frac{\Delta M_{\text{teórico}}}{\Delta M_{\text{experimental}}} \qquad \Delta M_{\text{teórico}} = \frac{M * I * t_{EC}}{n * F}$$

Estos cálculos fueron realizados para los parámetros operacionales factibles técnicamente en el proceso de electrocoagulación. (i= 0.15912 A/cm², t= 7min, pH=4.57). Los valores de los cálculos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros característicos calculados para el proceso de electrocoagulación en las condiciones arriba mencionadas.

%RC	<i>Cenergía</i> (kW.h/g de sólido removido)	$\Delta M_{experimental}$ (g)	$\Delta M_{teórico}$ (g)	φ (%)	See kW.h/g de Al disuelto	Co (\$/Ton)
90,15	$5,625 \cdot 10^{-4}$	0,36	0,352	97,78	21,85	87,76

Conclusiones.

El mejor valor factible técnica y económicamente de 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 $44.50 \cdot 10^{-5}$ 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 del 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 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 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.

Recomendaciones.

- Realizar un diseño de experimentos partiendo de los resultados obtenidos en este trabajo investigativo, que permita determinar la interacción de las variables estudiadas.
- Realizar un estudio sobre la influencia de la conductividad de la vinaza en el proceso de electrocoagulación.
- Caracterizar los sólidos en las condiciones factibles técnica y económicamente, y realizar un estudio de los mismos como inhibidores de la corrosión.

Bibliografía.

- Alonso, et al., "Alternativas tecnológicas para reducir el volumen de las vinazas de la industria alcoholera y su tratamiento". cen. az. vol.43 no.1 Santa Clara ene.-mar. 2016.
- COLECTIVO DE AUTORES. (2004) "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.
- Clavel Baldaquín, Lázaro. (2008) "Electrocoagulación y floculación de la vinaza". Trabajo de Diploma. Facultad de Ingeniería Química.
- Crespo Sariol, Harold. (2005) "Proyecto de Planta para "RECICLAR" el mosto de la destilería". Trabajo de Diploma. Facultad de Ingeniería Química.
- González, et al., (1989) "Desalinización de mosto de destilería con ácido sulfúrico concentrado". Revista ICIDCA, sobre los derivados de la caña de azúcar.
- González, et al., " La fertirrigación con vinaza de caña de azúcar limita la tasa fotosintética de soja (*Glycine max*, Leguminosae) ". vol.54, Nº 2, 2019
- González T. (2001) "Aspectos fisiológicos y moleculares de la decoloración enzimática de efluentes de destilería con el hongo basidiomiceto". Tesis de Doctorado. Universidad de Alcalá, España.
- Higueta-Vásquez, J., Rojas-Gonzalez, A., Pineda-Pineda, S.. (2020). Conventional and non-conventional alternatives for vinasse management through physical-chemical or biological technologies: a review. *dyna Energía y Sostenibilidad*, 9(1). [11 P.]. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES9355>
- Ibarra R., Camacho L " Caracterización químico-física de vinazas de destilerías" *Ciencia en su PC*, vol. 1, núm. 2, 2018.
- Ibarra R., et al "Caracterización fisico-química de vinazas de destilerías" *Rev Cub Quim* vol.31 no.2 Santiago de Cuba mayo.-ago. 2019
- Jiménez J., (2016) "Remoción de contaminantes refractarios de las vinazas tequileras por electrocoagulación" Tesis para obtener el grado de maestro en ingeniería ambiental. Universidad Autónoma de Puebla. Facultad de Ingeniería.
- MINAZ. (1995.) "Tratamiento de los desechos de las fábricas de producción de alcohol a partir de mieles de caña de azúcar mediante la recuperación de levadura *Saccharomyces* y la producción de biogás". Ciudad de la Habana.
- Ojeda E., Hing R., "Sólido obtenido por electrocoagulación de la vinaza, nuevo inhibidor para la corrosión ácida del latón". *Tecnología Química*, vol.36, Nº 3, 2016.
- Sandoval Rojas, Martha Elvira (2016). Tratamiento de vinazas provenientes de etanol en un reactor de lecho fluidizado inverso. Tesis (Doctoral)

Yagual, Ana Paula (2017) "Diseño y construcción de un equipo didáctico de electrocoagulación para el tratamiento de vinaza proveniente de una destilería"

Fecha de recibido: 6 ene. 2020

Fecha de aprobado: 10 mar. 2020