

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

**Study on the vinaza electric curdling process by 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](mailto:daylin@slcads.gtmo.inf.cu)

**Resumen.**

Este trabajo forma parte de una de las investigaciones que se han realizado en la Universidad de Oriente, en búsqueda de soluciones que permitan obtener las condiciones operacionales más factibles, técnica y económicamente que influyen en el proceso de electrocoagulación de la vinaza, utilizando electrodos de aluminio. La vinaza empleada en este trabajo se obtiene como residual del proceso de obtención de alcohol etílico. Fueron desarrollados 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 ha determinado el 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, se ha llevado a cabo un análisis económico preliminar para identificar el costo operacional expresado en pesos por toneladas de sólidos removidos.

**Palabras Clave:** Vinaza, electrocoagulación, sólidos inhibidores de la corrosión.

**Abstract.**

This work is one of the researches carried out at Universidad de Oriente in the searching of solutions which allow obtaining the most suitable operational conditions, from the technical and economical points of view that influence on the vinaza electric curdling process by using aluminum electrodes. The vinaza used on this work is obtained as a remainder at the time of obtaining ethyl alcohol. There were made experimental tests to determine the electrical power density, the electrolysis time and the pH of the solution. During the study of the electric curdling process the color has been set as an indicative element of the vinaza quality, and in order to keep measuring the effectiveness of this process regarding its cleaning after pollution and getting suppressing organic structures of the corrosion, an economical analysis has been made to identify the operational cost on bills for every ton of organic structures removed.

**Keywords:** Vinaza, electric curdling, suppressing organic structures

### **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, disminuyendo 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 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.

La electrocoagulación es un proceso electroquímico muy utilizado en el tratamiento de residuales, por medio del cual se desestabilizan contaminantes suspendidos, emulsificados o disueltos en un medio acuoso, al hacer 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, a través de los que fluye la corriente necesaria para que estos 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 desarrollan investigaciones para determinar las condiciones técnica y económicamente factibles 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.

## **Materiales y métodos.**

### **Materiales**

#### 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 ( $H_2SO_4$ ) concentración de un 10%.
- Hidróxido de sodio (NaOH) concentración de un 10%.

#### Electrodos

El material de los electrodos utilizados en esta investigación es una aleación de aluminio, 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

#### Equipamientos

En la realización de los ensayos fueron utilizados equipamientos de cuatro laboratorios diferentes dentro de la Universidad de Oriente:

1. Laboratorio de Química- Física – Corrosión, Facultad de Ingeniería Química.
2. Laboratorio de Fundamentos Químicos Biológicos (FQB), Facultad de Ingeniería Química.
3. Laboratorio de Investigaciones del Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA).
4. Laboratorio de investigaciones de Biofísica Médica.

### **Utensilios y equipos para el desarrollo de la técnica experimental de electrocoagulación de la vinaza.**

#### Equipos:

Fuente de corriente directa, GU- 2 E-24-12/10 BWue, voltaje  $220 \pm 10 \%$ , 50 – 60 Hz, procedente de Alemania 1980, utilizada para medir la intensidad de la corriente.

Centrífuga MLW, modelo T 52,2, de voltaje 220 V, 60 Hz y 10 000 rpm, potencia 350 Watt, de 22 Kg de peso, procedente de la URSS, del CNEA.

Balanza analítica marca SARTORIUS, modelo BP 121S, voltaje: 115-230 V, 50-60 Hz, con valor máximo de 120g y un d = 0,1 mg, procedencia Alemania, utilizada para determinar la cantidad de sólido.

Balanza marca SARTORIUS, modelo BP 610, voltaje 115-230 V, 50-60 Hz, con valor máximo de 120g y un d = 0,1 mg, procedencia Alemania, utilizada para determinar la cantidad de sólido.

Estufa marca LABORGERATE, modelo 13, de voltaje 220V, con potencia de 1600 W, 1974, procedente de Alemania, utilizada para secar las muestras y obtener los sólidos.

Amperímetro de corriente directa MSZ 808, procedencia Húngara.

Voltímetro M 1106 T 4.1, voltaje de 0.045 – 750 V, procedente de la URSS.

Conductímetro marca CRISON, modelo GLP 31, voltaje de 220V, 50 Hz potencia 6.6 watts, utilizado para medir conductividad de la vinaza.

El pH metro marca CRISON, modelo GLP 22, voltaje de 220V, 50 Hz potencia 6.6 watts, utilizado para medir pH de la vinaza.

Cronómetro de marca Lesser de procedencia Rusia, utilizado para medir el tiempo de centrifugación y la duración del proceso de electrocoagulación.

### **Métodos**

- Electrocoagulación.
- Método espectrofotométrico.
- Método matemático estadístico, para el procesamiento de la información obtenida por las técnicas aplicadas y analizar los resultados mediante las tablas. También posibilitó hacer los cálculos matemáticos correspondientes.
- La observación.

### **Descripción de la instalación experimental**

Para la obtención del sólido a partir de la vinaza se utiliza un electro coagulador a escala de laboratorio 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, para preveer un cortocircuito en la instalación. Para energizar el sistema se utiliza una fuente de corriente directa, en la que se puede regular la corriente y el voltaje aplicado, mediante la conexión de un amperímetro y un voltímetro, en serie y paralelo respectivamente. Los electrodos son conectados en paralelo para que la diferencia de potencial entre las placas fuera la misma, ya que si se conectan en serie existiría una progresiva caída de voltaje de un electrodo a otro 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 pueden observar tanto el cátodo como el ánodo luego del proceso de electrocoagulación, éste último cubierto por partículas sólidas.



Fig. 2. Instalación experimental electrocoagulación:(a) Cátodo, (b) Ánodo

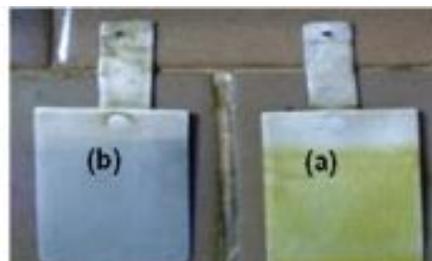


Fig. 3. Electrodo (a) luego del proceso.



Fig. 4. Proceso de electro coagulación.

La secuencia del desarrollo del proceso de electrocoagulación se muestra como sigue:



Figura 5. Sólidos Secos obtenidos de la electrocoagulación de la vinaza  
a) Procedentes de la espuma, (b) Procedentes del lodo.

A continuación se procede a secar la espuma en la estufa a 40 °C y a centrifugar el líquido tratado para acelerar la floculación. El sólido floculado se extrae de la centrífuga en forma de lodo, éste se seca 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 realiza 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)	pHi	Luminancia (%)	%R	i (A/cm <sup>2</sup> )	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 (Tabla 2); estos resultados permiten corroborar que la densidad de corriente más factible técnica y económicamente es 0.15912 A/cm<sup>2</sup> para la cual se obtiene un 87.41% de remoción de color y 44.50\*10<sup>-5</sup>kW.h/g de sólidos removidos.

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

I (A)	pHi	pHf	%R	Sólidos totales (g)	Kw./g totales	i (A/cm <sup>2</sup> )
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 mientras que 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 es desarrollado teniendo en cuenta fundamentalmente el consumo de la energía eléctrica (Cenergía), la eficiencia de la energía eléctrica ( $\varphi$ ), el consumo de energía eléctrica específica (See) y el costo de operación (Co).

$$\text{Costo de operación} = Co = a * Cenergía + b * Celectrodo$$

Cenergía / 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 es calculado por medio de la ecuación:

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

Estos cálculos son realizados para los parámetros operacionales técnicamente factibles en el proceso de electrocoagulación. (i= 0.15912 A/cm<sup>2</sup>, t= 7min, pH=4.57). Sus valores se muestran en la Tabla 3.

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

%RC	Cenergía (Kw h/g de sólido removido)	$\Delta M_{experimental}$ (g)	$\Delta M_{teórico}$ (g)	$\varphi$ (%)	See Kw h/g de Al disuelto	Co (\$/Ton)
90,15	5,625*10 <sup>-4</sup>	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 A/cm<sup>2</sup> (I= 9A), para el cual se alcanza un por ciento de remoción de color de 87.41% y un consumo de energía de 44.50\*10<sup>-5</sup>kW.h/g de sólidos removidos.

A medida que aumenta la densidad de corriente se ha comprobado que 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<sup>2</sup> 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<sup>2</sup> 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, mientras que los valores de pH son 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.

### **Referencias bibliográficas.**

Aguilar, M. (1989). *Determinación de algunas vitaminas del complejo B en mostos de destilerías*. Tesis en obtención al título de Licenciado en Química. Universidad de Oriente.

Almeida, M. P. (1997). Estudio de algunas vías de aprovechamiento de los efluentes de destilería. *Revistas ICIDCA sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*.

Bueno, et al. Contaminación e Ingeniería Ambiental, *FICYT*, Oviedo.

CITMA. (2005). *Aguas y saneamiento*.

Clavel Baldaquín, L. (2008). *Electrocoagulación y floculación de la vinaza*. Trabajo de Diploma. Facultad de Ingeniería Química.

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.

Colectivo de autores. (1987). *Introducción a la corrosión y protección de metales*. Ministerio de educación superior. La Habana.

Crespo Sariol, H. (2005). *Proyecto de Planta para "RECICLAR" el mosto de la destilería*. Trabajo de Diploma. Facultad de Ingeniería Química.

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.

González, et al., (1989). Desalinización de mosto de destilería con ácido sulfúrico concentrado. *Revista ICIDCA, sobre los derivados de la caña de azúcar*.

Handa, B. K., Seth, R. (1974). Waste management in distillery industry, *J. Indian Assoc. Environ. Manage.*

Hongve D. and Akesson G. (1996). Spectrophotometric determination of water colour in hazen units. *Water Research*.

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.

Morante, G. (2002). Electrocoagulación de aguas residuales. *Revista colombiana de física*. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

Wallen Rencurrell, Arianna. (2006). *La electrocoagulación como método de tratamiento para la depuración del residual de las destilerías de alcohol*. Trabajo de Diploma. Facultad de Ingeniería Química.

**Fecha de recibido: 9 oct. 2017**  
**Fecha de aprobado: 14 dic. 2017**