

Estudio experimental de la electrocoagulación y diseño preliminar de una planta piloto

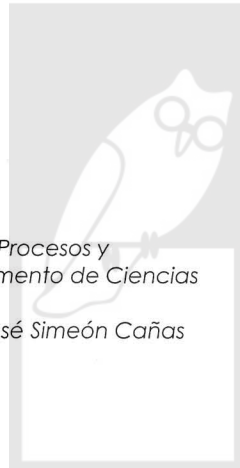
Baiza, Rodrigo

Martínez, Violeta

Zeledón, Héctor

Rivas, Luis

Departamento de Ingeniería de Procesos y Ciencias Ambientales y Departamento de Ciencias Energéticas y Fluídicas
Universidad Centroamericana José Simeón Cañas
vamartinez@uca.edu.sv



Abstract— La electrocoagulación es un tratamiento de aguas residuales que se basa en la desestabilización electroquímica de las moléculas contaminantes presentes en un efluente y que ofrece grandes ventajas a la industria en cuanto a los requerimientos de operación e instalación, generación de desechos y costos económicos. Por tal razón, la presente investigación se enfocó proponer el diseño preliminar de una planta de electrocoagulación a escala piloto mediante la determinación de la configuración óptima a escala de laboratorio, para lo cual se utilizó agua residual proveniente de una industria de embutidos salvadoreña y se analizó la variación durante el tiempo de tratamiento de los parámetros de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Aceites y Grasas (AyG), Sólidos Sedimentables (SS), Sólidos Suspendidos Tota-

les (SST), pH, temperatura y turbidez, de modo que pudieran establecerse la densidad de corriente y el tiempo de operación que favorecían en mayor medida los niveles de remoción. Estos resultados fueron comparados en un momento posterior con la remoción alcanzada a través de la aplicación de coagulantes químicos al mismo efluente, y, hacia el final del estudio, esta base experimental se utilizó para estimar los costos de operación de la planta piloto de electrocoagulación y compararlos con los costos reportados teóricamente por una planta de coagulación química sometida a iguales condiciones.

Palabras clave– Electrocoagulación, planta a escala piloto, porcentaje de remoción, tratamiento de aguas residuales.

138

Introducción

La electrocoagulación es un proceso electroquímico que consiste en la inducción de una corriente eléctrica a través de placas metálicas paralelas que están en contacto con un efluente para proporcionar una fuerza electromotriz capaz de provocar reacciones químicas de desestabilización que permitan separar los contaminantes mediante la formación de partículas sólidas insolubles.

Los primeros estudios sobre esta técnica fueron realizados por Webster en el siglo XIX, quien utilizó ánodos de hierro soluble en 1888 y fomentó la investigación del proceso en Inglaterra. Más tarde, en 1896, se empleó este mismo experimento para coagular agua cenagosa del río Ohio con ánodos de hierro y aluminio, que alcanzaron una reducción del 40% de los contaminantes en 1908 y del

70-80% en 1947, debido al perfeccionamiento del método [1]. En la actualidad, este tratamiento de aguas residuales ha encontrado una marcada renovación, ya que la acelerada degradación de los recursos hídricos ha puesto en relieve la imperante necesidad de emprender proyectos orientados a encontrar alternativas que permitan hacer un uso digno y equitativo del agua, de tal modo que las tecnologías existentes sean viables en un sentido ecológico, humano y económico.

En atención a este problema, la investigación tuvo como principal objetivo estudiar los niveles de remoción de la electrocoagulación a escala de laboratorio y utilizar los resultados del trabajo experimental para evaluar la viabilidad técnica y económica a escala piloto y las ventajas que este método ofrece respecto a otros tratamientos tradicionales; por lo que en los siguientes apartados se describen los factores que fueron incluidos en el estudio y que, según los autores relacionados con la temática, presentan un mayor nivel de incidencia sobre el proceso de la electrocoagulación:

A. Electroodos

Los materiales más utilizados en la construcción de los electrodos son el aluminio, hierro, molibdeno y acero inoxidable [2]. El tipo de material rige la tasa de remoción y la eficiencia del proceso, y su selección está sujeta a las características del efluente [3].

B. Densidad de corriente

Se refiere a la corriente que se hace pasar por cada electrodo dividida entre su área activa [4]. De manera general se ha encontrado que, a ma-

yores intensidades, la eficiencia de remoción se incrementa hasta encontrar un punto donde se genera sobrecarga en el sistema, provocando una disminución en la eficiencia del proceso [5-8].

C. Conductividad del efluente

Un incremento en la conductividad eléctrica del efluente es directamente proporcional al incremento de la densidad de corriente [3], debido a que la presencia de iones mejora el flujo eléctrico.

D. Temperatura

Actúa como acelerador o inhibidor de la velocidad de reacción dependiendo del rango de operación del proceso [3], ya que la solubilidad de las sales generadas está en función de la temperatura del efluente.

E. Potencial de hidrógeno (pH)

Afecta la selección del material del electrodo debido a la solubilidad de los metales de acuerdo con el medio en el que se encuentra. Se han encontrado mejores eficiencias de remoción si el electrodo es de aluminio en medios ácidos, y de hierro en medios básicos [7].

F. Tiempo de tratamiento

Una tendencia general consiste en que a mayor tiempo de tratamiento se obtienen mejores niveles de remoción, debido al aumento de iones hidróxidos formados. Aunque esto se basa en la Ley de Faraday, tiempos prolongados de tratamiento pueden generar daños en las características de los flocúlos formados, lo cual deviene en la disminución de la eficiencia del proceso [9].

Conviene mencionar, además, que el proceso de electrocoagulación generalmente presenta ventajas sobre los tratamientos tradicionales de aguas residuales debido a la disminución de los costos operativos, la reducción de la huella de los equipos, la eliminación de los requerimientos de almacenamiento de productos químicos, las mejores características de los flocúlos formados, los altos niveles de remoción y la inclusión de sistemas más fáciles para separar los contaminantes retenidos en las distintas fases formadas en el efluente tratado. Sin embargo, las desventajas del proceso consisten en la utilización de electrodos de sacrificio, la variación de los costos asociados al consumo de energía eléctrica y la tendencia de los metales a oxidarse, lo que produce una interferencia en el proceso e intensifica las operaciones de mantenimiento [1].

En el caso de esta investigación, donde se intentó arraigar los fundamentos de este método a las condiciones, demandas y características específicas de una industria alimenticia salvadoreña, se seleccionó un efluente proveniente de una industria de embutidos para someterlo al tratamiento por electrocoagulación en un reactor a escala de laboratorio, de tal manera que pudiera determinarse la configuración óptima del sistema, con la finalidad de comparar la eficiencia de remoción con la eficiencia resultante de aplicar coagulación química con PAC y sentar una base empírica que permitiera pasar a una escala piloto, donde podría realizarse una comparación más profunda en función de los costos de operación de ambas técnicas.

Por consiguiente, los apartados de este artículo tratarán las etapas establecidas para determinar la configuración óptima, comparar la efectividad de la electrocoagulación con la coagulación química y estimar sus costos de operación, detallando la metodología utilizada para su desarrollo, cuyos resultados responden a las condiciones en las que se efectuó el experimento y podrían presentar variaciones si se utiliza un efluente con características diferentes.

Materiales y métodos

La investigación se realizó en cinco etapas principales, que consistieron en la determinación de la configuración óptima del sistema, el estudio del tiempo óptimo de tratamiento, la comparación del método con uno de los tratamientos utilizados tradicionalmente, el diseño preliminar de un sistema de electrocoagulación a escala piloto y el cálculo de los costos de operación.

La tabla 1 indica los parámetros considerados para caracterizar el agua residual seleccionada y su variación durante el tiempo de tratamiento, la metodología empleada en su determinación [10-12] y los valores máximos permitidos por la Norma Salvadoreña de Agua y Aguas Residuales descargadas en un Cuerpo Receptor [10] que se utilizaron para delimitar aún más la efectividad de la electrocoagulación, destacando que para la medición de turbidez se ocupó un turbidímetro LaMotte modelo 202we.

Tabla 1
Parámetros considerados, metodología aplicada y límites máximos permisibles

Parámetro	Metodología	Valor máximo permitido
Temperatura	ASTM número 2550, con sensor de temperatura de conductivímetro portátil OAKTON modelo Cond 6+.	20-35 °C
pH	Método electrométrico de la ASTM número 4500, con pHmetro portátil OAKTON modelo pH 5.	5.5-9.0
Conductividad	Método electrométrico de la ASTM número 2510, con conductivímetro portátil OAKTON modelo Cond 6+.	-
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	Método de la ASTM número 5210 A, empleando un sensor de oxígeno disuelto marca Hach, modelo SesION 8.	150 mg/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Método de reflujo cerrado ASTM número 5220.	400 mg/L
Sólidos Sedimentables (SS)	Metodología de la APHA 2540.	15 mL/L
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	Método 2540 D de la APHA.	150 mg/L.
Aceites y Grasas (AyG)	En el laboratorio de la UCA, el método gravimétrico ASTM 5520 CC; en el laboratorio externo, el método de extracción Soxhlet de la APHA 2520 D.	45 mg/L

Para tratar el agua se utilizó un reactor a escala de laboratorio cuyo diseño partió de la clasificación de los componentes principales de electrocoagulación en subgrupos, lo que permitió establecer un nivel de control del cual se partiría para el diseño de la planta a escala piloto. Luego, se procedió a delimitar sus alcances, buscando suplir las necesidades básicas para el análisis del efluente y definir los factores que se deseaban controlar y todos los componentes que se incluirían en cada subsistema, donde el tiempo de tratamiento y la densidad de corriente son los factores más incidentes [13], como se indica a continuación:

A. Sistema de manejo y distribución del efluente.

El sistema de manejo y distribución del efluente consistió en un reactor batch conformado por seis reactores batch independientes de 2 L, a los cuales se les agregaba agua residual recolectada durante el mismo día de muestreo que había sido sometida a una etapa de homogeneización. Esta configuración permitía que cada uno de los recipientes de reacción representara un tiempo de residencia diferente y que en el último se alcanzara el tiempo máximo de tratamiento.

Los reactores batch tenían dimensiones de 16x15x10 cm y fueron construidos de acrílico para evitar el surgimiento de reacciones secundarias o contaminación del medio reactante, y contaron con dos posibles salidas para los lodos y el líquido. Después de cada tiempo de tratamiento, el agua se extraía de los recipientes y se hacía pasar por un filtro Whatman 0 para eliminar las partículas sólidas arrastradas a la salida de los reactores.

B. Sistema de desagüe.

Para el sistema de desagüe se consideró que, dado que la mayoría de los autores mencionan la presencia de flotación y sedimentación en el proceso global de electrocoagulación [14], afectada en mayor o en menor medida por las características del efluente utilizado [15], el reactor debía contar con un diseño integrado que permitiera remover la materia flotante y sedimentable sin afectar el flujo ni las muestras tomadas de la fase líquida, por lo que se dispuso que el reactor quedara expuesto a la atmósfera y que hubiera una puertilla en el borde superior para permitir el uso de una barredora manual en la remoción de la materia flotante [1], y, a la vez, que cada recipiente contara con dos salidas que podían ser utilizadas tanto para extraer el agua tratada como para evacuar los sólidos.

C. Sistema eléctrico.

El sistema eléctrico de cada reactor independiente estuvo formado por ocho electrodos de hierro chapa 1/8 de pulgada en conexión monopolar [16], que contaban con un área de 9x15 cm y un área activa de 9x10 cm. La demanda de energía eléctrica fue suplida por una fuente de corriente directa con voltaje regulable de 0-12 V y el control de intensidad de corriente se hizo mediante la variación del voltaje de la fuente y la separación entre los electrodos, para lo que se colocaron dos peinetas en el fondo de cada reactor independiente que permitían hacer saltos de 0.5 cm entre los electrodos. Sin embargo, para los fines de esta investigación, se optó por mantener fija la separación de las placas de hierro y se estableció una distancia de 1 cm entre cada una.

D. Sistema de control y protecciones.

El sistema de control estuvo conformado por un clámper marca Fluke, modelo 336, que sirvió para monitorear la intensidad de la corriente de salida de la fuente y regular la exactitud de las tres corrientes diferentes utilizadas para tratar el agua en cada celda, desconectando y readaptando la corriente luego de cada remoción de muestra.

Un esquema general del reactor utilizado puede observarse en la figura 1, en la cual se destacan el reactor batch completo, los reactores batch independientes, la disposición de las placas y la peinetas colocada en la parte inferior para facilitar su instalación, atendiendo las dimensiones especificadas con anterioridad.

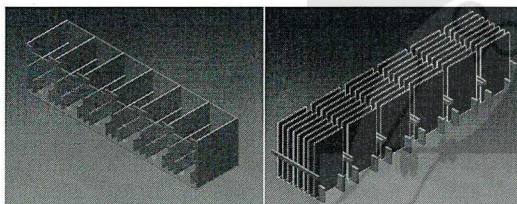


Fig. 1 Sistema estructural y sistema eléctrico del reactor a escala de laboratorio.

Luego, se utilizó la metodología que se describe en los siguientes apartados para desarrollar las etapas que compusieron la investigación:

A. Determinación de la configuración óptima del sistema.

Para determinar la configuración óptima del sistema a escala de laboratorio se estudiaron los factores que afectan la electrocoagulación, abor-

dando la variación de los siguientes parámetros durante el tratamiento:

1. *pH*: Se hicieron mediciones del pH del agua en diferentes tiempos de tratamiento para comparar cómo cambiaba este parámetro respecto al valor inicial de la muestra.
2. *Electrodos*: En el caso de este estudio, donde el efluente poseía un pH básico, el material más favorable fue el hierro, ya que la insolubilidad del metal en medios básicos aumentaba el tiempo de vida media de los electrodos.
3. *Tiempo de tratamiento*: El tiempo de tratamiento se refiere a aquél que permite observar la formación de dos fases invariables en las celdas de reacción, por tanto, se realizó una primera corrida del sistema con monitoreo continuo para identificar el punto final [13]. Luego, se seleccionaron cinco intervalos fijos igualmente espaciados dentro del rango delimitado, que correspondían a cinco muestras sometidas a 10 minutos de tratamiento adicionales a cada una, sumando un total 10 minutos para la primera y de 50 minutos para la última.
4. *Densidad de corriente*: La selección de la densidad de corriente óptima se realizó mediante pruebas con tres valores de corriente diferentes, que ascendían a 0.5, 1.5 y 2.5 A que se hacían pasar por placas de hierro de 9x10 cm. Así, la selección de la configuración óptima requirió la obtención de la eficiencia de remoción de turbidez y carga bacteriana e incremento de pH, dados por las siguientes ecuaciones donde $R\%$ es el porcentaje de

remoción, %I es el porcentaje de incremento, V_o es el valor inicial del parámetro analizado y V es el valor alcanzado después del tratamiento.

$$\%R = \frac{V_o - V}{V_o}$$

$$\%I = \frac{V - V_o}{V_o}$$

B. Determinación del tiempo óptimo de operación

Después de encontrar la densidad de corriente óptima, se realizaron curvas de remoción de DBO_5 , DQO y AyG en el tiempo, lo cual permitió delimitar un tiempo óptimo de operación, definido como aquél donde se alcanza el mayor porcentaje de remoción de los contaminantes.

C. Comparación de la eficiencia de remoción de la electrocoagulación con la coagulación química

Para evaluar la efectividad de la electrocoagulación, se trataron dos muestras de aguas residuales del mismo día de recolección por electrocoagulación y por coagulación química, utilizando PAC y polímero como coagulante. No obstante, para identificar con rapidez la concentración óptima de coagulante se seleccionó la turbidez como parámetro de medición inmediata. Luego, el efluente tratado con la concentración óptima fue llevado al laboratorio externo para determinar los valores finales de la DQO, SST, SS y AyG, realizando la DBO_5 en el laboratorio de la universidad.

D. Diseño preliminar del sistema de electrocoagulación a escala piloto

En el paso de los datos experimentales de la escala de laboratorio a la escala piloto se estableció

que en la planta piloto se manejarían únicamente aquellas variables que la escala de laboratorio incluyó. Por esta razón, para tener un esquema global de las etapas necesarias en el tratamiento, se realizó primero un diagrama del proceso de electrocoagulación, que permitió establecer los equipos necesarios para controlar todas las variables estudiadas.

Después, el proceso global fue dividido en tres diferentes subprocesos de diseño (el diseño estructural, hidráulico y eléctrico) al que ingresaría un caudal de efluente industrial de $3 \text{ m}^3/\text{h}$ seleccionado arbitrariamente que sería almacenado en un tanque de homogeneización y que sería tratado utilizando electrodos de hierro, densidad de corriente similar a la densidad de corriente óptima fijada a nivel experimental y tiempo óptimo de remoción. Para el diseño estructural se determinaron las dimensiones de cada elemento [17], mientras que en el diseño hidráulico se propuso un diámetro de tubería tal que permitiera trasladar un volumen considerable de agua en poco tiempo y se determinaron las pérdidas por fricción en tuberías y en cada uno de los equipos, cuyo resultado sirvió para hacer el dimensionamiento de las bombas que permitirían suplir esa necesidad de presión.

Los caudales, por su parte, fueron calculados en base a un tiempo máximo que se dispondría para que el sistema trabajara de forma continua, mientras que, para el diseño eléctrico, se definieron los números de electrodos sobre la longitud permisible por diseño estructural y un espaciado mínimo de 1 cm [1], validado por la necesidad de mantener una relación entre el área efectiva de los electro-

dos y el volumen de efluente a tratar similar a la obtenida en la escala de laboratorio, lo que permitió realizar un cálculo estimado de la corriente de operación.

D. Comparación entre los costos de operación de la coagulación química y la electrocoagulación

La estimación de los costos del proceso de electrocoagulación partió de los aspectos incluidos en la planta a escala piloto, donde, para evaluar los costos operativos totales, debieron adicionarse costos hidráulicos, costos eléctricos y costos por consumo de electrodos. Los costos operativos de la coagulación química, por otro lado, se obtuvieron a nivel teórico, incluyendo el precio de los reactivos, la energía consumida por la mezcla o preparación de la disolución coagulante y el bombeo y la agitación en las etapas de coagulación y flotación [18].

En un sentido más amplio, se consideró que los costos del reactivo estaban afectados por el arancel de importación del 5% y el 13% del IVA [19], y que los costos asociados a la energía eléctrica estarían sujetos al pliego tarifario vigente hasta la fecha [20]. Finalmente, partiendo de esta determinación, se compararon los costos por metro cúbico de efluente tratado en ambos procesos.

Resultados y discusión

Los siguientes apartados muestran los resultados del estudio experimental que se utilizaron como base para elaborar el diseño preliminar de la planta a escala piloto y determinar los costos económicos relacionados con su operación:

A. Determinación de la configuración óptima del sistema

La determinación de la configuración óptima del sistema partió de la identificación del tiempo máximo que debía durar el tratamiento. Esto se realizó midiendo las alturas de la fase sólida formada sobre el líquido 2 durante el funcionamiento del reactor con el efluente, como se indica en la tabla 2 y en la gráfica de la figura 2.

Tabla 2
Variación del Espesor de la Capa Sólida en las Celdas

Tiempo (min)	Altura (mm)						Promedio (mm)	Desviación estándar (± mm)
	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4	Corrida 5	Corrida 6		
0	0	0	0	0	0	0	0	
10	3	3	5	5	7	4	5	
20	6	8	11	14	13	13	11	
30	14	12	18	17	19	16	16	
40	18	17	24	24	25	18	21	
50	19	18	25	24	26	20	22	

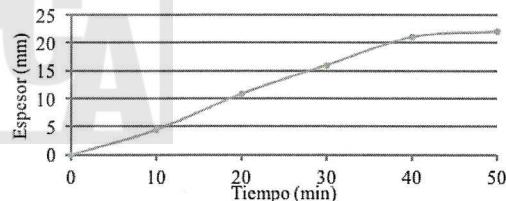


Fig. 2 Variación del espesor de la capa sólida.

Al observar la tendencia y las variaciones de las distintas corridas, los tiempos máximos de tratamiento oscilaron entre los 40 y 50 minutos, debido a que el aumento en la dimensiones de la zona flotante presentó un valor de 1 mm en ese periodo. Por esta razón, se fijó un tiempo máximo de análisis de 50 min, donde ya se ha iniciado la estabilización y se seleccionaron cinco momentos para recolectar muestras tratadas por 10, 20, 30, 40 y 50 minutos en cinco reactor batch independientes de los seis que disponía el reactor batch completo.

Luego, se analizaron las características específicas referidas a los parámetros de DBO₅, DQO, AyG, SS, SST, pH y turbidez afectados por corrientes de 0.5, 1.5 y 2.5 A para un total de 8 electrodos por celda con un área efectiva de 9x10 cm, y a continuación se procedió a realizar una evaluación preliminar de los niveles de remoción de turbidez y de incremento de pH provocados por cada corriente, lo que sirvió para delimitar el rango de operación y planteó la necesidad de hacer un análisis de Recuento Total de Bacterias (RTB) para identificar la corriente más efectiva, como se destaca en los siguientes apartados:

1) *Turbidez:* Para estudiar la variación de turbidez se realizaron dos ensayos, que presentaron su valor mínimo a los 50 minutos de tratamiento, con una turbidez de 6.44, 1.22 y 2.66 NTU y de 1.86, 0.48 y 0.16 NTU, respectivamente, para corrientes de 0.5, 1.5 y 2.5 A, lo que permite adjudicar una mayor efectividad en la reducción de turbidez en las últimas dos condiciones de operación, como se observa en el promedio de los dos ensayos de la figura 3.

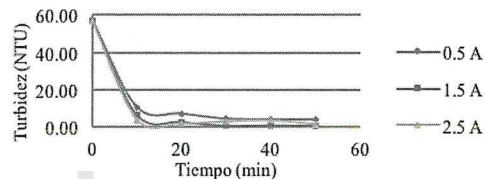


Fig. 3 Promedio de la variación de la turbidez en el tiempo de los dos ensayos.

De la figura 3 puede observarse que la curva de un amperaje de 0.5 A presenta una tendencia decreciente en todo el tiempo, sin embargo, su desventaja es que posee los valores mayores de turbidez posterior al tratamiento. Por su parte, la curva con una amperaje de 2.5 A, posee dos momentos de tendencias diferentes, mostrando un comportamiento decreciente que aumenta en el final, debido a la sobreproducción de iones Fe³⁺ y Fe²⁺, en su mayoría Fe³⁺, como se determina por el color verde de la solución y por el rango de pH de trabajo. La tendencia más estable y con menores variaciones en el tiempo se dio con un amperaje de 1.5 A, donde después de los 30 minutos de operación la variación de la turbidez disminuyó y se estabilizó con rangos muy bajos de variación, arrojando diferencias menores a los 0.5 NTU. No obstante, para fortalecer el análisis se calculó el porcentaje de remoción de turbidez, incluyendo los resultados en la figura 4.

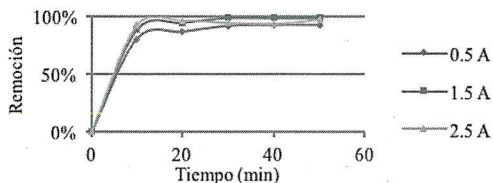


Fig. 4 Promedio de la remoción de la turbidez en el tiempo de los dos ensayos.

En los tres casos la remoción de turbidez fue mayor al 80%. De igual manera, a menores amperajes, la estabilización ocurrió cerca de los 30 minutos de operación, pero las características del efluente fueron más estables y los floculos formados poseían mayor resistencia en la corriente de 1.5 A, mientras que a un amperaje de 2.5 A el floculo se debilitaba a medida transcurría el tiempo por efecto de las fuerzas mecánicas.

pH: Al igual que en el caso anterior, se realizaron dos ensayos para determinar la variación del pH en el tiempo, mostrando los porcentajes de incremento en las figuras 5 y 6.

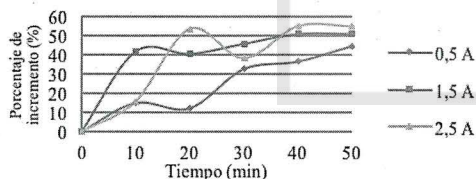


Fig. 5 Variación del pH en el tiempo para el primer ensayo.

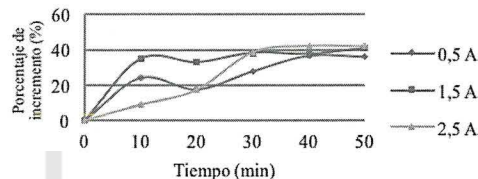


Fig. 6 Variación del pH en el tiempo para el segundo ensayo.

Las figuras 5 y 6 permiten identificar que a menor corriente eléctrica, menor es el incremento de pH y, viceversa, a mayor corriente, mayor es el incremento. Esto se debe a la ecuación de Faraday, que está en función de la intensidad de corriente y define la producción de iones de hierro liberados, es decir, la cantidad de hidróxido de hierro producido. Considerando que la corriente de 1.5 A logró un porcentaje de remoción de turbidez mayor que la corriente de 0.5 A, con un nivel superior al 95% en ambos ensayos, y que su grado de incidencia en el valor del pH del líquido se categorizó en una posición intermedia, se seleccionó esta corriente como el valor óptimo para estudiar los demás ámbitos de la investigación. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, fue necesario hacer un RTB para delimitar aún más el criterio de selección entre las corrientes de 1.5 y 2.5 A.

Remoción de carga bacteriana: La remoción de la carga bacteriana fue determinada para muestras tratadas durante 50 minutos en el reactor de electrocoagulación con corrientes de 1.5 y 2.5 A. El resultado de los valores finales, junto a las condiciones iniciales del efluente, se indica en la

tabla 3, cuya determinación se realizó por medio del Número Más Probable (NMP) por cada 100 mL de muestra, incluyendo, además, el límite máximo permitido en la Norma Salvadoreña Obligatoria de Agua y Aguas Residuales descargadas en un Cuerpo Receptor [10].

Tabla 3
Remoción de carga bacteriana

Tipo de agua	NMP/100 mL	NMP/100 mL establecidos en la NSO
Cruda	>30000	1000
Tratada con 1.5 A	733	
Tratada con 2.5 A	13400	

Como puede observarse, la corriente de 1.5 A tuvo una mayor reducción de la carga bacteriana inicial, encontrándose por debajo del límite establecido en la Norma Salvadoreña Obligatoria [10], lo que corroboró su selección como configuración óptima.

B. Determinación del tiempo óptimo de tratamiento

En cuanto al tiempo óptimo de tratamiento cabe destacar que se analizaron muestras sometidas a diferentes tiempos de tratamiento en el reactor de electrocoagulación con la corriente óptima de 1.5 A, determinando la DBO₅ en el laboratorio de la UCA y los parámetros de DQO, SS, SST y AyG en un laboratorio externo, como se expone en los siguientes apartados.

1) *Parámetros medidos en la UCA:* La medición de DBO₅ se realizó en tres ensayos con agua tratada en el reactor de electrocoagulación bajo la

acción de la corriente óptima y diferentes tiempos de tratamiento.

Los resultados, tanto los valores puntuales de cada muestra como los niveles de remoción, se indican en la tabla 4, de donde puede constarse que las condiciones iniciales del efluente en el segundo ensayo superaban los 150 mg/L permitidos en la Norma [10], y que, después de 10 minutos de tratamiento en el reactor, se logró una reducción a 55.2 mg/L, equivalentes al 64% de remoción. No obstante, debido a que en el tercer ensayo la carga fue menor, se dificultó la remoción de los contaminantes, ya que estaban más dispersos y era más difícil formar los flocúlos, obteniendo resultados menores en la remoción de DBO₅.

Tabla 4
Valores Puntuales y Porcentajes de Remoción de DBO₅ De muestras Tratadas a Diferentes Tiempos

Tiempo (min)	DBO5 (mg/L)					
	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
0	153.2	0.0%	153.2	0.0%	118.3	0.0%
10	55.2	64.0%	55.6	63.7%	87.4	26.1%
20	26.1	83.0%	35.9	76.6%	48.6	58.9%
30	20.9	86.4%	35.8	76.6%	43.5	63.2%
40	12.6	91.8%	14.4	90.6%	20.5	82.7%
50	12.9	91.6%	19.8	87.1%	25.1	78.8%

De la tabla 4 puede aseverarse que se observaron tendencias similares en todos los casos, obteniendo las menores cargas en un tiempo de 40 minutos de operación con valores de 91.8, 90.6 y

82.7 %, como se exhibe en la figura 7, donde se ha graficado la remoción de DBO_5 en el tiempo y se constata que después de ese período la eficiencia tuvo un leve decaimiento, y se redujo a 91.6, 87.1 y 78.8%, lo que responde a la desestabilización de los flocúlos inducida por la acción prolongada de la corriente.

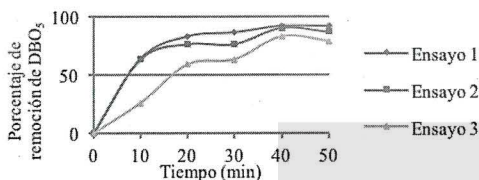


Fig. 7 Remoción de DBO_5 en el tiempo.

Parámetros medidos en un laboratorio externo: Al igual que en el caso anterior, se tomaron muestras para estudiar la variación en el tiempo de los parámetros de DQO, SS, SST y AyG en dos ensayos que fueron analizados en un laboratorio externo. El promedio de los resultados obtenidos se incluye en la tabla 5, a excepción de los SS, ya que presentaron un valor no detectable por la metodología después de los primeros 10 minutos de tratamiento.

Tabla 5
Variación de la DQO, SST y AyG en el Tiempo

Tiempo (min)	DQO (mg/L)		SST (mg/L)		AyG (mg/L)	
	Valor promedio	% remoción	Valor promedio	% remoción	Valor promedio	% remoción
	304	0.0	100	0.0	97	0.0
10	64	78.9	29	71.0	72	25.8
20	65.6	78.4	14.33	85.7	14	85.6
30	48	84.2	<10.80	90.0	45	53.6
40	152	50.0	17.99	82.0	41	57.7
50	164.8	45.8	<10.80	90.0	17	82.5

La tendencia global de cada parámetro se exhibe en la figura 8, de la cual puede decirse que, en el caso de la DQO y los SST, el mayor nivel de remoción se obtuvo a los 30 minutos, mientras que para los AyG este pico se observó a los 20 minutos.

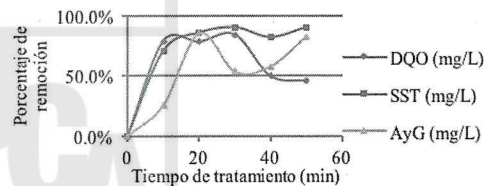


Fig. 8 Variación en el tiempo de la remoción de DQO, SST y AyG.

Contraponiendo los resultados generales de estos parámetros, se encontró una mayor variación en cuanto a los tiempos que reportaron los mayores niveles de remoción. Sin embargo, considerando los resultados de la DBO_5 , pudo apuntarse un

rango óptimo de tiempo de trabajo que debía oscilar entre los 30 y 40 minutos.

C. Comparación entre las eficiencias de remoción de la electrocoagulación y la coagulación química

Los ensayos de coagulación química se realizaron aplicando diferentes cantidades de PAC y polímero a un litro de muestra para establecer la concentración óptima de coagulante que favorecía los mayores niveles de remoción después de 50 minutos con agitación, correspondiente al tiempo máximo de tratamiento donde se observó mayor estabilidad, sin embargo, debido a las características del efluente, el único que logró la formación de dos fases fue el PAC. En este sentido, para una turbidez inicial de 65.16 NTU, se agregaron diferentes masas de este reactivo hasta un valor máximo de 0.5 g por litro de muestra, en el cual se alcanzó el 91.52% de remoción. Luego, esta muestra fue comparada con otra de igual volumen que había sido tratada por 50 minutos en el reactor de electrocoagulación, y se obtuvieron los resultados que se indican en la tabla 6.

Tabla 6
Comparación entre la electrocoagulación (EC) y la Coagulación Química con PAC

Parámetro	Condición inicial	Condiciones finales		% de remoción	
		EC	PAC	EC	PAC
DQO (mg/L)	1176.00	368.00	536.00	68.71	54.42
DBO5 (mg/L)	895.00	142.50	190.67	84.08	78.70
SS (ml/L)	0.30	ND	ND	ND	ND
SST (mg/L)	104.00	<10.80	14.44	89.62	86.12
AyG (mg/L)	296.00	20.00	20.00	93.24	93.24

De la tabla 6 se encuentra que, en todos los casos, la electrocoagulación presentó un mayor nivel de remoción que el PAC, igualándose únicamente en los AyG, donde ambos alcanzaron valores de 20 mg/L, equivalentes al 93.24% de remoción. En cuanto a la contraposición con los límites establecidos en la Norma Salvadoreña Obligatoria de Agua y Aguas Residuales descargadas en un Cuerpo Receptor [10], cabe destacar que el PAC no fue capaz de reducir los niveles de DQO y DBO₅ hasta los mínimos permisibles, que ascienden a 400 y 150 mg/L para cada parámetro, dado que, después de los 50 minutos de tratamiento, los valores alcanzados fueron de 536 y 190.67 mg/L, mientras que la electrocoagulación redujo la carga inicial a 368 y 142.5 mg/L, a pesar de presentar un incremento de pH.

D. Diseño preliminar del sistema de electrocoagulación a escala piloto.

El diagrama de procesos mostrado en la figura 9 permitió establecer los equipos necesarios para una planta a escala piloto capaz de satisfacer el control de las variables incluidas en el estudio experimental, junto con sus dimensiones y materiales.

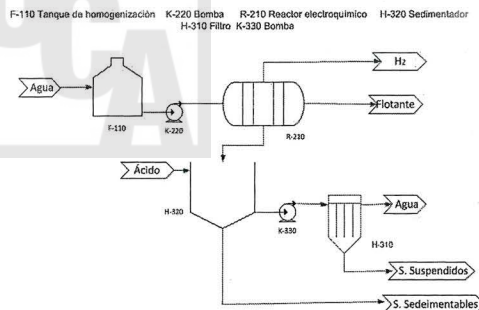


Fig. 9 Diagrama de procesos del sistema de electrocoagulación.

A partir de lo anterior, se estableció que el tanque de homogeneización debía estar, como mínimo, al 75% de su capacidad, lo que significaba que debía mantener al menos 3 m³ durante el periodo de operación. Para efectos de diseño, se asumió

una base de cálculo de 0.5 m³ cada 20 min como caudal de entrada, y un caudal de salida de 1 m³ cada 40 minutos que posteriormente sería alimentado al reactor y serviría para delimitar sus dimensiones, como se indica en la tabla 7.

Tabla 7
Especificaciones y Equipos de la Planta Piloto

Equipo	Dimensiones (m)		Material
Tanque de homogeneización	Altura	3.60	Fibra de vidrio
	Diámetro	1.20	
Reactor	Longitud	1.00	Fibra de vidrio
	Altura	1.50	
	Ancho	1.20	
Sedimentador	Diámetro	1.30	Fibra de vidrio
	Longitud del cono	0.65	
	Altura del cilindro	0.61	
Filtro de cartucho	Diámetro	1.00	Definido por el proveedor
	Altura	1.00	

150

El volumen del tanque estableció que el reactor no podía tratar más de 1 m³ de efluente y la altura y el ancho fueron restringidos por las dimensiones de las placas de hierro chapa 1/8 de pulgada distribuidas comercialmente, mientras que a su tiempo de operación se le asignó el valor experimental óptimo de 40 min. En operación continua, se tuvo un máximo de 36 m³/día en el reactor y un tiempo máximo de 120 min para su vaciado y llenado, por

tanto, según el diagrama de proceso, un sistema de bombeo fue colocado a la entrada del reactor y se le asignó 1/3 de ese tiempo para llenado y los 80 min restantes para el vaciado por gravedad.

El sedimentador, por otro lado, almacenaría el volumen de 1 m³ que saldría del reactor, de donde se obtuvieron las condiciones presentadas en la tabla 8, en la cual se enuncian las secciones de la planta.

Tabla 8
Detalle de las Secciones de la Planta

Tramo	Inicio	Final de sección	Tiempo (min)	Volumen (m ³)	Caudal (m ³ /h)
A	Tanque	Reactor	40.0	33.0	49.5
B	Reactor	Sedimentador	80.0	33.0	24.8
C	Sedimentador	Filtro	15.0	1.0	4.0

Para el cálculo de bombeo se definió que existirían bombas desde el tanque de homogenización hasta el reactor, luego, un vaciado por gravedad y

una bomba previa al filtro. Los resultados del cálculo de alturas manométricas a suplir por la bomba se indican en la tabla 9.

Tabla 9
Alturas Manométricas Requeridas por Sección

Sección	Altura manométrica (m.c.a.)
A	2.705
B	0.504
C	2.729

En el dimensionamiento eléctrico se partió de una densidad de corriente de 23.81 A/m² correspondiente al valor óptimo determinado experimentalmente para un área efectiva de 9x10 cm en

los electrodos, y se obtuvo lo presentado en la tabla 10, donde también se realiza una comparación entre ambas escalas.

TABLA 10
CONDICIONES DE ELECTRODOS PARA PLANTA PILOTO

Escala	Número de electrodos	Espaciado (mm)	Área efectiva (m ²)	Volumen tratado (m ³)	A/V (m ⁻¹)
Laboratorio	8	13.2	0.009	0.0015	42.00
Piloto	53	11.5	0.810	1.0000	42.12

Una representación esquemática de la planta piloto puede observarse en la figura 10, en la cual

se han colocado todas las partes constituyentes propuestas en el diseño preliminar.

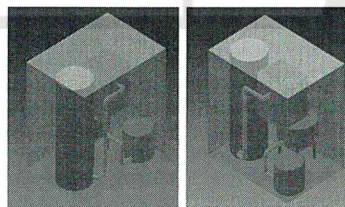


Fig. 10 Diseño de la planta piloto.

Comparación entre los costos de operación de la coagulación química y la electrocoagulación.

Los costos operativos de la coagulación química [18] y la electrocoagulación se indican en las tablas 11 y 12.

Tabla 11
Costos Operativos de la Coagulación Química

Precio (\$/kg)	Impuesto de importación	IVA (%)	Precio local (\$/kg)	Cantidad requerida de reactivo (kg/m ³)	Costo por reactivo (\$/m ³)	Costo por agitación (\$/m ³)	Costo total (\$/m ³)
0.55	5%	13	0.65	0.50	0.33	0.04	0.37

Tabla 12
Costos operativos de la electrocoagulación

Sección	Energía consumida (kWh/día)	Costo por energía (\$/m ³)	Costo de electrodos (\$/m ³)	\$/m ³
Bomba sección A	0.283	0.18	0.05	0.23
Bomba sección B	0.376			
Alimentación a electrodos	58			

El análisis proporcionó costos referenciales de 0.23 y 0.37 dólares por metro cúbico tratado para

la electrocoagulación y la coagulación química, respectivamente.

Conclusiones

La densidad de corriente de 23.81 A/m², provista por una corriente de 1.5 A, presentó los mejores niveles de remoción de contaminantes en el sistema a escala de laboratorio. En tal sentido, el tiempo de tratamiento óptimo ascendió a 40 minutos, que permiten al proceso alcanzar porcentajes de remoción máximos de 91.78%, para la DBO₅; 84.21%, para la DQO; 89.20%, para los SST; y 85.57%, para los AyG, con cantidades de SS inferiores al límite de detección.

La electrocoagulación presentó mayores porcentajes de remoción que el PAC al tratar un efluente de una industria alimenticia de embutidos, dando porcentajes de remoción correspondientes a cada tratamiento de 68.71 y 54.42%, para DQO; 84.08 y 78.70%, para DBO₅; 89.62 y 86.12%, para SST; y 93.24% para AyG.

La electrocoagulación tiene costos de operación significativamente menores que la coagulación química en el método de dimensionamiento abordado dentro de la investigación para una planta a escala piloto de 36 m³/día, con un total de \$0.23 y \$0.37 por metro cúbico de agua residual tratada para la electrocoagulación y la coagulación química, respectivamente, lo cual representaría que los costos de electrocoagulación son el 62.16% de los costos de la coagulación química.

Referencias

- [1] A. Restrepo, A. Arango y L. Garcés, "La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas," *Corporación Universitaria Lasallista*, pp.58-77, Jun. 2006.
- [2] M. Vepsäläinen, "Electrocoagulation in the treatment of industrial waters and wastewater", tesis de Doctorado en Ciencias, VTT Science 19, Mikkeli, Finlandia, Nov. 2012.
- [3] C. Comninellis y G. Chen, *Electrochemistry for the Environment*, Estados Unidos: Springer, 2010.
- [4] P. Holt, G. Barton y C. Mitchell, "Electrocoagulation as a wastewater treatment," *Australian Environmental Engineering Research Event*, pp. 23-26, Nov. 1999.
- [5] X. Chen, G. Chen y P. Yue, "Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation," *Separation and purification technology*, pp. 65-75, Oct. 2000.
- [6] M. Kobya, H. Hiz, E. Sentrurk, C. Aydiner y E. Dermirbas, "Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation," *Desalination* 190, pp. 201-2011, Abr. 2006.
- [7] M. Bayramoglu, M. Kobya, O. Taner y M. Sozbir, "Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater," *Separation and Purification Technology* 37, pp. 117-125, Jun. 2010.
- [8] G. Barboza, "Reducción de la carga contaminante de las aguas residuales de la planta de tratamiento de Totorá-Ayacucho empleando la técnica de electrocoagulación," tesis de Maestría en Ciencias con Mención en Química, Universidad Nacional de Ingeniería de Perú, Lima, Perú, 2011.
- [9] O. Abdelwahab, N. Amin y E. Ashtouky, "Electrochemical removal of phenol from oil refinery wastewater," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 163, pp. 711-716, Jul. 2008.
- [10] *Norma Salvadoreña Obligatoria de Agua y Aguas Residuales Descargadas en un Cuerpo Receptor*, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), 2009.
- [11] *Normas Técnicas*, American Society for Testing and Materials (ASTM), 1898.
- [12] *Standard Methods for the examination of water and wastewater*, American Public Health Association, 1999.
- [13] W. Reategui y R. Westres, "Remoción de metales pesados de un efluente industrial," *Industria Química M.A.*, pp. 62-67, Jun. 2013.
- [14] E. Butler, Y. Hung, R. Yu-Li y M. Suleiman, "Review of electrocoagulation in wastewater treatment," *Water* 3, pp. 495-525, Abr. 2011.
- [15] E. Mohammad y S. Muttucumar, "Review of pollutants by electrocoagulation an electrocoagulation/flotation processes," *Journal*

- of *Environmental Management* 90, pp. 1663-1679, En. 2009.
- [16] N. Balasubamanian, T. Kojima y C. Srinivasakanman, "Arsenic removal through electrocoagulation: kinetic and statistical model," *Chemical Engineering Journal*, pp. 76-82, Jun. 2009.
- [17] G. Ulrich, *Diseño y economía de los procesos de ingeniería química*, Ciudad de México, México: Nueva Editorial Interamericana, 2006.
- [18] F. Navarro, *Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional*, Ciudad Real, España: Universidad de la Mancha, 2008.
- [19] (2016) Ministerio de Hacienda. [En línea]. Disponible en: http://www.mh.gob.sv/portal/page/portal/PMH/Temas/Operaciones_Aduaneras/Proceso_Despacho/Proceso_Aduanero/Impuestos%20a%20pagar
- [20] (2016) Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones. [En línea]. Disponible en: <http://www.siget.gob.sv/temas/tema-n/documentos/tarifas>

