

190



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA LA  
INDUSTRIA PAPELERA POR EL MÉTODO DE  
ELECTROFLOCULACIÓN

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERO QUÍMICO**  
P R E S E N T A  
**GABINO RUIZ CRUZ**



MEXICO, D.F.



AÑO 2002

EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUÍMICA



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente	Prof.	SALOMA TERRAZAS MIGUEL
Vocal	Prof.	DURÁN DOMÍNGUEZ MA. DEL CARMEN
Secretario	Prof.	FARRERA GAMBOA LUIS F.
1er. Suplente	Prof.	AGUILAR MARTÍNEZ MARTHA
2º. Suplente	Prof.	CARRANCO PÉREZ ANA ISABEL

Sitio donde se desarrolló el tema:

Laboratorio 110 de Electroquímica de la Unidad de Posgrado del edificio "B" de la Facultad de Química.

Nombre completo y firma del asesor del tema:

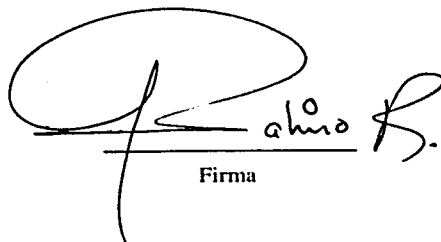
Dr. Miguel Saloma Terrazas



Firma

Nombre completo y firma del sustentante:

Gabino Rufz Cruz



Firma

## **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

Le agradezco por haberme dado la oportunidad de desarrollar el don del saber, del pensar y las herramientas necesarias para relacionarme y desenvolverme en la vida profesional.

### **A MIS MAESTROS**

Dr. Miguel Saloma Terrazas, Dra. Ma. del Carmen Durán Domínguez de Bazúa, I. Q. Luis F. Ferrara Gamboa y a la Dra. Martha Aguilar Martínez, quienes me brindaron su tiempo, su atención y por ayudarme en los momentos más difíciles para la culminación de esta meta, abriéndome paso hacia el campo profesional.

### **A MIS PADRES**

Manuel Ruiz Leyva y Angela Cruz Bravo, a los que nunca olvidaré siendo ellos los que sembraron y cultivaron las primeras semillas del bien que existe en mí.

### **A MI HIJO**

Niquel Ruiz Jiménez ya que es lo más hermoso que tengo en la vida y que con el apoyo de tus padres, desean que tus sueños se hagan realidad sin encontrar ningún obstáculo que limite tus metas a seguir.

### **A MI ESPOSA**

Blanca Judith Jiménez Mondragón que me alentó y me ayudó para la culminación de esta meta, a quién ahora le pido que por el amor que le tengo siga siendo la compañera de vida y que juntos disfrutemos la hermosa familia que hemos formado.

### **A MIS HERMANOS**

Margarita , José Luis , Bertha , Ricardo , y José Manuel Ruiz Cruz, ya que nos une la sangre y la comprensión, además de los muchos momentos en los que nos hemos apoyado mutuamente.

### **A MIS AMIGOS**

Ing. Juan Jorge Díaz González Alcocer, Ing. Ramón Ortega García, M. en C., José Antonio Bautista Martínez, y al Ing. Javier Rosas Luna, quienes me brindaron su apoyo en los momentos más difíciles de mi vida y que constantemente valoro su amistad.

## Í N D I C E

		Página
<b>Glosario</b>		4
<b>RESUMEN</b>		8
<b>CAPÍTULO 1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	10
1.1	Objetivo	12
1.2	Metas	13
<b>CAPÍTULO 2.</b>	<b>ANTECEDENTES TEÓRICOS</b>	14
2.1	Características generales de las aguas residuales	14
2.1.1	Panorama general	14
2.1.2	Origen y características de las aguas residuales	15
2.1.3	Objetivo del tratamiento de las aguas residuales	16
2.1.4	Tecnología de tratamiento de aguas residuales industriales	16
2.2	Métodos de tratamiento	17
2.2.1	Procesos físicos o tratamiento primario	17
2.2.2	Procesos biológicos o tratamiento secundario	18
2.2.3	Procesos químicos o tratamiento terciario	18
2.3	Características físicas, químicas, biológicas y radiológicas de las aguas residuales	18
2.4	Tratamiento electroquímico	19
2.5	Electrocoagulación - electrofloculación	22
2.5.1	Electrofloculación	22
2.5.2	Desestabilización de las partículas coloidales por electrofloculación	23
2.5.3	Electrólisis del agua	24
2.5.4	Electroflotación	25
<b>CAPÍTULO 3.</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	27
3.1	Metodología experimental	27
3.1.1	Dimensiones y tipo de electrodos	27
3.1.2	Celda electrolítica y aparatos	27
3.2	Experimentos realizados	29
3.3	Características fisicoquímicas de las aguas residuales a tratar	30
<b>CAPÍTULO 4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	34
4.1	Datos obtenidos por el método de la electrofloculación del agua residual usada por la industria papelera	34

Dirección General de Bibliotecas de la  
 difundir en formato electrónico e impreso el  
 de mi trabajo excepcional.

NOMBRE: Gabino Ruiz Cruz  
5 DIL-02  
 FECHA:                       
 LUGAR:                     

FECHA:

LUGAR:

4.2	Datos obtenidos de las aguas residuales de la industria química aplicando el método alternativo de electrofloculación y electrooxidación usando electrodos de $Ti/SnO_2$ y $Ti/PbO_2$ como ánodo	34
4.3	Cálculos para determinar la cantidad de aluminio desprendida del ánodo que forma una suspensión con los contaminantes	40
4.4	Determinación del costo por consumo de energía en pesos por metro cúbico de agua cruda en tratamiento ( $\$/m^3$ )	41
4.5	Determinación del costo por consumo de energía en pesos por kilogramo de materia orgánica contaminante medida como DQO ( $\$/kg$ )	42
<b>CAPÍTULO 5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>44</b>
5.1	Conclusiones	44
5.2	Recomendaciones	45
<b>ANEXO I.</b>	<b>Metodología para determinar sólidos totales fijos</b>	<b>48</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		<b>50</b>

### Índice de tablas y figuras

Figura 1.1. Diagrama de flujo para tratar aguas negras	11
Figura 3.1. Dimensiones de los electrodos utilizados	28
Figura 3.2. Esquema de los equipos utilizados en el proceso de electrofloculación	29
Figura 3.3.a. Descripción de la toma de muestras de aguas residuales identificadas como C-1 y C-2	31
Figura 3.3.b. Descripción de la toma de muestras de aguas residuales identificadas como C-3	32
Figura 3.3.c. Descripción de la toma de muestras de aguas residuales identificadas como C-4	32
Figura 3.3.d. Descripción de la toma de muestras de aguas residuales identificadas como C-5	32
Tabla 1.1. Caracterización del agua residual tomada después del tratamiento biológico y antes del tratamiento químico, con base en la norma NOM-002-ECOL-1996	12
Tabla 2.1. Tipos de materiales de electrodo utilizados en el proceso de electroflotación (Nagendran and Hruday 1980; en Solís-Téllez, 1992)	26
Tabla 4.1. Datos experimentales obtenidos por electrofloculación de aguas "negras" tratadas por electrofloculación	36
Tabla 4.2. Datos experimentales obtenidos del tratamiento por electrofloculación de la corriente C-1 de la industria química	38
Tabla 4.3. Datos experimentales obtenidos del tratamiento por electrooxidación de la corriente C-1 de la industria química	38

Tabla 4.4. Datos experimentales obtenidos del tratamiento por electrofloculación de la corriente C-2 de la industria química	39
Tabla 4.5. Datos experimentales obtenidos del tratamiento por electrooxidación de la corriente C-2 de la industria química	40
Tabla 4.4. Datos experimentales obtenidos del tratamiento por electrofloculación de la corriente C-4 de la industria química	40
Tabla 4.7. Datos experimentales obtenidos del tratamiento por electrooxidación de la corriente C-4 de la industria química	40
Tabla 4.8. Datos experimentales obtenidos del tratamiento por electrofloculación de la corriente C-5 de la industria química	41

### Glosario de términos

$\psi_0$	Potencial de la carga eléctrica de la partícula
Ampere (A)	Se define el ampere como la intensidad invariable de la corriente total que fluye por un conductor y una solución acuosa, dividida por el área de su sección recta. En la actualidad se define el ampere en unidades absolutas como la intensidad de una corriente eléctrica que al circular por dos conductores rectos, paralelos, de longitud infinita y de sección recta despreciable separados por una distancia de un metro en el vacío, se ejerce entre dichos conductores una fuerza de $2 \times 10^{-7}$ Newton por cada metro de longitud
$A_T$	Área total de los electrodos
Cantidad de electricidad (Q)	Se define como la electricidad presente en una carga eléctrica o la electricidad que circula por un circuito que se asienta de una corriente, durante un tiempo determinado. Su unidad es el coulomb (C). En la actualidad, el coulomb es la cantidad de electricidad transportada en un segundo a través de cualquier sección de un circuito por una corriente de un ampere de intensidad
Celda electroquímica	Una celda electroquímica es un dispositivo que puede producir trabajo eléctrico en el entorno, y en el interior de la celda tiene lugar una reacción química: "La reacción de la celda". La celda electroquímica muestra, tanto la forma oxidada y reducida de la sustancia electroactiva, como cualquier otra especie que puede estar involucrada en la reacción de electrodo
Conducción iónica	Las notables propiedades de las soluciones de electrólitos pueden comprenderse al suponer que el soluto está presente en forma de partículas cargadas, esto es, iones. Cuando a un líquido que contiene iones se le aplica un campo eléctrico, los iones positivos se moverán hacia el electrodo de carga negativa, los negativos hacia el de carga positiva. Este movimiento de carga constituye una corriente eléctrica

Conducción metálica	Desde los tiempos del descubrimiento del electrón se sabe que una corriente eléctrica en un metal es un flujo de electrones. En un metal, los electrones internos de cada átomo permanecen con sus respectivos núcleos, pero uno o más electrones externos de cada átomo están deslocalizados y son compartidos por todos ellos, y estos electrones de conducción pueden moverse libremente bajo la influencia de un campo eléctrico. Cada electrón que sale del metal en un extremo es reemplazado por un electrón idéntico que entra en el otro extremo. A este tipo de conducción se le llama conducción electrónica o metálica, y puede continuar indefinidamente sin producir ningún cambio observable en el metal
Conductancia eléctrica de las disoluciones	En toda pila industrial en la que hay electrólisis, es evidente que existen resistencias óhmicas en varias partes del sistema, con la consiguiente pérdida de energía y desprendimiento de calor. Evidentemente, el electrolito es un conductor, en modo alguno perfecto, el cual tiene cierta resistencia óhmica. Sin embargo, difiere de los conductores metálicos en que el paso de la corriente, por él determina efectos químicos en los electrodos, que son los puntos o secciones de contacto del circuito
Densidad de corriente eléctrica (i)	Se define como el cociente entre la intensidad de la corriente que circula por un conductor y la sección recta de dicho conductor. La unidad cgs será o la unidad electromagnética de intensidad por centímetro cuadrado o la electrostática de intensidad por centímetro cuadrado
Dina	Se define como la fuerza que aplicada a una masa de un gramo le comunica una aceleración de un centímetro por segundo.
Disociación electrolítica	Si se disuelve sal en agua, las partículas más pequeñas de este cuerpo, o sean las moléculas, se disuelven uniformemente en el agua. Las moléculas en sí, son eléctricamente neutras. La carga eléctrica de los iones puede ser tanto positiva como negativa. Los iones con carga positiva son denominados cationes, y aquellos cargados negativamente aniones.
Electrodos	Los electrodos consisten en dos conductores metálicos que tienen por misión introducir la fuente y el receptor de los electrones en la disolución. Para clasificar las reacciones que se producen como resultado de la carga que existe en los electrodos, es conveniente distinguir entre electrodos inertes normalmente formados por un conductor de platino, que sólo sirven para transferir electrones a la disolución, o tomarlos de la misma, y los electrodos reactivos, que intervienen químicamente en la reacción. El más sencillo de los electrodos reactivos es un metal que puede contribuir a formar iones



	metálicos o aceptar iones que se descargan, procedentes de la disolución. El electrodo donde tiene lugar la oxidación se denomina ánodo; el electrodo donde tiene lugar la reducción se denomina cátodo
Electrólisis y procesos en los electrodos	Cuando se introducen dos electrodos en la disolución de un electrólito y se aplica un voltaje externo al par de electrodos, se ve que fluye muy poca corriente hasta que se llega a un voltaje crítico, llamado voltaje de descomposición. A voltaje más alto, la corriente aumenta rápidamente y se producen procesos de oxidación y reducción en el ánodo y en el cátodo, respectivamente
Electroquímica	La electroquímica se define clásicamente como la ciencia que trata de los cambios químicos producidos por la corriente eléctrica, y de la producción de electricidad mediante la energía de reacciones químicas. Esta interconversión de energía se lleva a cabo en celdas electroquímicas, que a su vez, están constituidas básicamente por electrodos y soluciones electrolíticas
Erg	El erg es la unidad de trabajo y se define como el trabajo realizado por una fuerza de una dina al mover su punto de aplicación un centímetro en su propia dirección y sentido
$i$	Densidad de corriente, $A/cm^2$
Intensidad de una corriente eléctrica (I)	Se define como la cantidad de electricidad que circula por un conductor en la unidad de tiempo. Su unidad es el amperio (A)
Newton (N)	Se define como la fuerza que aplicada a una masa de un kilogramo le comunica una aceleración de un metro por segundo por segundo
Polarización	Los potenciales de electrodos deducidos termodinámicamente son aplicables a pilas en condiciones de reversibilidad y por tanto, solamente valdrán para corrientes débiles. Cuando a través de la separación entre un electrodo y una disolución circula una corriente intensa, la diferencia de potencial entre una y otra difiere del valor de equilibrio y a la diferencia entre estos dos valores se le da el nombre de <<polarización>>
Potencial de electrodo	Al sumergir un metal en una solución electrolítica, se establece un equilibrio electroquímico entre el metal y los iones. La región interfacial entre el metal y la disolución presenta gran interés, pues en dicha interfase se establecen diferencias de potencial
Potencial eléctrico	El potencial eléctrico en cualquier punto es el trabajo requerido para mover una carga positiva unitaria desde una distancia infinita hasta el punto en cuestión. Cuando se aplica una diferencia de potencial a través de dos electrodos sumergidos en una disolución iónica se produce un movimiento neto de los iones hacia uno u otro de los electrodos y hay una corriente eléctrica

Resistencia eléctrica (R)	La resistencia eléctrica es la cantidad, análoga al rozamiento, característica de un conductor, que determina la diferencia de potencial requerida para mantener, en dicho conductor, una corriente eléctrica de intensidad dada. La unidad es el ohm. En la actualidad se define el ohm como la resistencia eléctrica entre dos puntos de un conductor tal que al mantener entre ellos una diferencia de potencial de un volt
Sistemas electroquímicos	El objetivo de la electroquímica es el estudio de la interconversión entre la energía química y la energía eléctrica. Los sistemas electroquímicos se dividen en tres clases. La primera, constituida por los conductores metálicos o electrónicos, la segunda es la de los llamados conductores electrolíticos en donde el movimiento de la corriente va acompañado siempre de un movimiento de materia. En los conductores de la tercera clase la corriente circula parcialmente por conducción metálica y en parte por conducción electrolítica
Unidades eléctricas	La energía eléctrica es función de dos factores, a saber: la intensidad de la corriente, expresada de ordinario en ampere y la diferencia de potencial (tensión o voltaje) expresada por lo común en volt. La magnitud de los cambios que ocurren en la cantidad total de energía de un sistema queda determinada por estos dos factores
Volt (V)	En la actualidad, el volt es <<la diferencia de potencial eléctrica entre dos puntos o entre dos superficies equipotenciales>> de un conductor que transporta una corriente constante de un ampere.

## RESUMEN

Para realizar el tratamiento de las aguas residuales generadas por las actividades humanas existen en la actualidad dos formas de proceso: Los fisicoquímicos y los biológicos. Por razones técnicas y económicas, los primeros son aplicados en aguas con contaminantes inorgánicos o con materia orgánica no biodegradable, mientras que los segundos se utilizan cuando los principales componentes contaminantes son biodegradables. El proceso fisicoquímico de coagulación-floculación y sedimentación requiere de insumos que precipiten la materia suspendida y coloidal, pero sin modificar el contenido de la materia orgánica soluble. El resultado es un lodo particularmente problemático ya que fácilmente entra en descomposición. El sulfato de aluminio y/u otros compuestos de aluminio son muy usados como coagulantes para tratamientos convencionales de aguas residuales industriales. Las cantidades de desechos de sulfato de aluminio generados son muy grandes y el problema principal es el hidróxido de aluminio formado como precipitado, ya que éste es un gel y permanece en estado semifluido a condiciones normales a menos que se cambien sus características físicas, lo que crea múltiples problemas en los sitios donde son dispuestos estos residuos. En los últimos años ha sobresalido el uso de técnicas electroquímicas para remover contaminantes contenidos en aguas residuales industriales. Estas técnicas tienen como principales ventajas oxidaciones y reducciones directas e indirectas. El propósito de este estudio es evaluar la remoción de contaminantes sólidos finos y ultrafinos difíciles de sedimentar por acción natural de la gravedad que imparten color al agua. El método propuesto en esta investigación es la electrofloculación para la remoción del color del agua y que pudiera tener la posibilidad de competir en los mercados globalizados. Las pruebas de electrofloculación se efectuaron con electrodos de aluminio, tanto en el ánodo como en el cátodo y las pruebas de electrooxidación se efectuaron con electrodos de titanio recubiertos con dióxido de estaño ( $Ti/SnO_2$ ) y electrodos de titanio recubiertos con dióxido de plomo ( $Ti/PbO_2$ ) como ánodo, respectivamente. La toma de las muestras de agua residual provenientes de canales de aguas negras para ser usadas por una industria papelería una vez tratadas se hicieron después de un tratamiento biológico, una desinfección con  $Cl_2$  y un ajuste del pH con  $H_2SO_4$  con objeto de tener las condiciones óptimas de operación para su tratamiento químico. Adicionalmente, como pruebas comparativas, se tomaron algunas muestras de aguas residuales de la industria química. Estas aguas residuales provienen de diferentes partes de sus procesos. Estas cinco corrientes de aguas residuales de la industria química fueron tratadas experimentalmente con las siguientes condiciones de electrofloculación: En el vaso de precipitado (vidrio pyrex) con capacidad de 180 mL donde se alimenta el agua residual en estudio con un volumen de trabajo de 130 mL de agua residual. La densidad de corriente  $i$  varió de 0.075 a 0.097 (corridas 1 a 10). El tiempo de reacción varió de 3 min a 8 min. A diferencia de los experimentos con las aguas "negras" que emplea una empresa productora de papel, a estas aguas tratadas por electrofloculación se les adicionó

un tratamiento posterior de electro-oxidación, en el cual la variable original de densidad de corriente se mantuvo constante y lo que se varió fue el tiempo de reacción de 8 a 50 min. Se determinaron en todas ellas la remoción de materia orgánica e inorgánica, medida como demanda química de oxígeno total (DQO), antes y después del tratamiento de electrofloculación, siguiendo la metodología del manual de operación del equipo marca Hach modelo COD Reactor con un espectrofotómetro acoplado marca Hach Modelo DR/2000. Las muestras fueron tomadas en forma simple, sin duplicado. Solamente a una de ellas, la que mostró visualmente mejores características se le determinaron sólidos disueltos totales iniciales y finales, y conductividad eléctrica, medida con un conductímetro marca Hach. También se midieron para esas muestras la temperatura inicial y final, con un termómetro normal de laboratorio de vidrio con bulbo de mercurio. En las muestras de aguas de la industria papelera se determinó color, además de la demanda química de oxígeno total, usando un equipo sin marca de Platino-Cobalto, de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Las muestras para ambos casos fueron tomadas en forma simple, sin duplicado. También se midieron su turbidez usando un nefelómetro de laboratorio marca Hach, modelo 2100P, así como temperatura inicial y final, medida con un termómetro normal de laboratorio, y conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales, medidos con el mismo conductímetro Hach. Finalmente, para estas mismas muestras se midieron sólidos disueltos totales. Para evaluar el desgaste de los electrodos de aluminio al flocularse este metal con los contaminantes y precipitarse en las celdas, se hizo un cálculo preliminar de este rubro, empleando las leyes de Faraday y los equivalentes químicos. De acuerdo a su composición fisicoquímica, las aguas residuales aprovechadas por la industria papelera a través de su tratamiento convencional presentan inicialmente una coloración y una demanda química de oxígeno (DQO) que hacen necesario un postratamiento. Este tratamiento fue substituido por el método alternativo de electrofloculación en el cual se usaron electrodos de aluminio, tanto en el ánodo como en el cátodo. Este método demostró ser efectivo en la decoloración de aguas residuales ya que redujo su valor de 113 a 30 unidades de Pt-Co (del 73.5 %) y, aunque la remoción de demanda química de oxígeno total (DQO) no fue tan exitosa, dio un valor suficientemente bueno (de 58 a 31 mg/L, o sea, del 46.6%). En este proceso a escala de laboratorio, se producen 0.031 g en 125 mL o sean 0.248 kg de hidróxido de aluminio por metro cúbico de agua cruda a tratar. La cantidad de aluminio separada del electrodo fue de 0.011 g que formaron 0.031 g de hidróxido de aluminio que separaron el equivalente de sustancias contaminantes, medidas como DQO, de 3.375 mg (0.003375 g) en un tiempo de 3 minutos y 20 segundos. Por lo tanto, se puede concluir que el método alternativo de la electrooxidación puede ser una **tecnología más limpia, efectiva y económica**, que presenta varias ventajas con respecto a los métodos convencionales utilizados actualmente en el tratamiento de las aguas residuales industriales.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los procesos industriales y, principalmente, la industria papelera consumen grandes cantidades de agua para cada una de sus operaciones unitarias. Sin embargo, con estas actividades se está impactando a la naturaleza, derivando en un desequilibrio que se muestra hoy en día irreversible. A consecuencia de ello este sector industrial ha emprendido diversas actividades tecnológicas para el tratamiento de otras aguas residuales antes de su evacuación y garantizar su reúso adecuado y eficiente en la propia industria papelera para contribuir así a mantener el equilibrio ecológico.

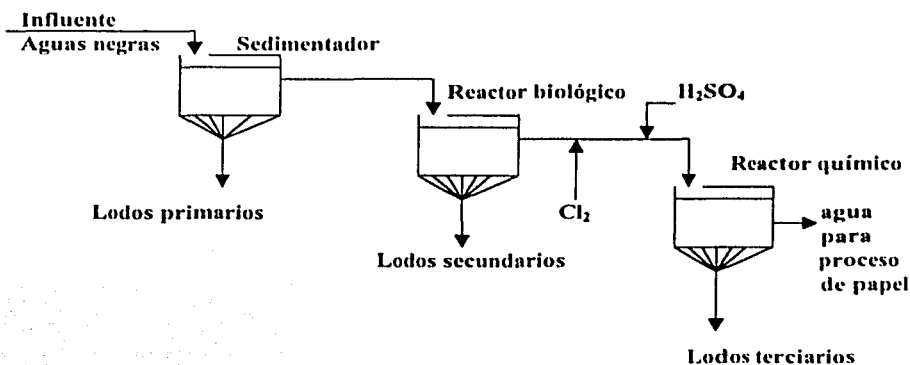
Para realizar el tratamiento de estas aguas residuales existen en la actualidad dos formas de proceso: Los fisicoquímicos y los biológicos. Por razones técnicas y económicas, los primeros son aplicados en aguas con contaminantes inorgánicos o con materia orgánica no biodegradable, mientras que los segundos se utilizan cuando los principales componentes contaminantes son biodegradables. El proceso fisicoquímico de coagulación-floculación y sedimentación requiere de insumos que precipiten la materia suspendida y coloidal, pero sin modificar el contenido de la materia orgánica soluble. El resultado es un lodo particularmente problemático ya que fácilmente entra en descomposición. El sulfato de aluminio y/u otros compuestos de aluminio son muy usados como coagulantes para tratamientos convencionales de aguas residuales industriales. Las cantidades de desechos de sulfato de aluminio generados son muy grandes y el problema principal es el hidróxido de aluminio formado como precipitado, ya que éste es un gel y permanece en estado semifluido a condiciones normales a menos que se cambien sus características físicas, lo que crea múltiples problemas en los sitios donde son dispuestos estos residuos. Además, se cree que ese aluminio es biodisponible, lo que plantearía mayores problemas.

En los últimos años ha sobresalido el uso de técnicas electroquímicas para remover contaminantes contenidos en aguas residuales industriales. Estas técnicas tienen como principales ventajas oxidaciones y reducciones directas e indirectas. Frecuentemente no hay necesidad de agregar ningún aditivo extra y tienen una alta selectividad que ayuda a prevenir la generación de productos secundarios indeseados y, por ello, resulta de un gran interés el estudio de un tratamiento electroquímico que demuestre estas ventajas (Bockris y Reddy-Amulya, 1978).

Uno de los elementos más importantes en un tratamiento electroquímico es sin duda alguna la selección de los electrodos que se utilizan, debido a que es necesario que los electrodos permitan descomponer los contaminantes orgánicos que vienen con el agua residual sin causar la descomposición del disolvente agua. Por lo tanto, el presente trabajo de investigación propone un método alternativo llamado electrofloculación usando electrodos de aluminio,

cuyas dimensiones se describen en capítulos posteriores. La principal finalidad de esta investigación es la remoción del color presente en aguas residuales. En los próximos capítulos se definirá el origen de estas aguas residuales, el tratamiento al que inicialmente son sujetas (métodos físicos, biológicos y químicos) y el uso que se les da como agua de proceso para ser utilizada en la producción del papel en una planta industrial.

De acuerdo con ese tratamiento convencional, el principal problema que se tiene es el del color del agua después del tratamiento biológico y antes del tratamiento químico, como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 1.1.



**Figura 1.1. DIAGRAMA DE FLUJO PARA TRATAR AGUAS NEGRAS**

En este diagrama de flujo se representan los diferentes procesos de tratamiento de las aguas residuales, en donde se toma la muestra de agua después del tratamiento biológico y antes del tratamiento químico, que es desinfectada con  $\text{Cl}_2$  y cuyo valor de pH es ajustado con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  para que se lleve a cabo, tanto la floculación química como la electrofloculación, en forma adecuada. Esta agua, que inicialmente es tratada con los métodos de tratamientos antes mencionados, presenta las características fisicoquímicas que, a continuación, se describen en la Tabla 1.1. Para tener un parámetro de comparación se presentan los datos del agua potable, de acuerdo con la norma correspondiente (NOM-001-ECOL-1996)

El tratamiento alternativo de electrofloculación propuesto, a nivel de laboratorio, es para tratar la muestra de agua descrita arriba, con la finalidad de remover el color que presenta el agua "negra" (residual) y obtener una mejor calidad de agua y un producto final de papel de mejor calidad y que cumpla con las especificaciones correspondientes.

**Tabla 1.1. Caracterización del agua residual tomada después del tratamiento biológico y antes del tratamiento químico, con base en la norma NOM-002-ECOL-1996**

Parámetro (mg/L, excepto cuando se especifique)	Métodos de prueba	Valores obtenidos	Promedio diario NOM-002	Instantáneo NOM-002
Sólidos sedimentables (ml/L)	NMX-AA-04	-	7.5	10.0
Grasas y aceites	NMX-AA-5	-	7.5	100
Temperatura (°C)	NMX-AA-7	-	N.A.	40.0
pH (unidades de pH)	NMX-AA-8	7.9	5.5 a 10	5.5 a 10
Demanda química de oxígeno (DQO)	NMX-AA-30	58	N.A.	N.A.
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	NMX-AA-28	-	150	NP
Conductividad, mS/cm	N.A.	2.1	N.A.	N.A.
Sólidos Disueltos Totales, SDT, ng/dm <sup>3</sup>	N.A.	1.06	N.A.	N.A.
Turbidez, unidades nefelométricas de turbiedad, UNT	N.A.	2.42	N.A.	N.A.
Coloración, unidades de Pt - Co	N.A.	113	N.A.	N.A.

N.A., no aplicable  
- no se determinó

El tratamiento electroquímico es un método alternativo a los sistemas convencionales para el saneamiento de efluentes y está basado en el principio de la electrólisis, por lo que se mencionarán algunas definiciones electroquímicas con el fin de familiarizarse con los conceptos fundamentales necesarios para la realización de este método electroquímico para el tratamiento de las aguas negras como residuales que se encuentran en el anexo al final de esta investigación (Mantell, 1980). Asimismo, se presentan el objetivo principal y las metas que se esperan alcanzar con esta investigación.

## 1.1 OBJETIVO

El propósito de este estudio es evaluar la remoción de contaminantes sólidos finos y ultrafinos difíciles de sedimentar por acción natural de la gravedad que imparten color al agua. El tratamiento químico clásico requiere de la adición de un agente coagulante químico que favorezca la aglomeración de sólidos y facilite la sedimentación y el método propuesto en esta investigación es la electrofloculación para la remoción del color del agua, cuyas características fueron descritas anteriormente y que pudiera tener la posibilidad de competir en los mercados globalizados. La meta final estriba en la reducción de los costos de operación, administración, manejo, aprovechamiento y recuperación del agua dentro de la planta que no serán objeto de esta investigación.

## **1.2 METAS**

Las metas a alcanzar son:

- 1. Eliminación del color en más de un 70%**
- 2. Obtención de una remoción de materia orgánica e inorgánica de las aguas negras de más de un 50%**
- 3. Evaluación de la generación de lodos que contienen aluminio que se obtienen por electrofloculación y que serán arrojados a rellenos sanitarios.**



## CAPÍTULO 2

### ANTECEDENTES TEÓRICOS

Dentro del marco de diseño y operación de plantas industriales, ha sido una práctica común dedicar una cuidadosa atención al tratamiento del abastecimiento de agua para adaptarla a los diferentes usos que ésta tendrá dentro de la instalación, ya que es fácilmente perceptible el impacto nocivo o indeseado de algunos componentes sobre los equipos de proceso o sobre el producto mismo.

Los sistemas de tratamiento basado en la coagulación, sedimentación y filtración para clarificar aguas crudas, así como los de ablandamiento y de ionización empleados en alimentación de calderas o bien, los de cloración, filtración para potabilizar el agua destinada a consumo humano, son algunos de los sistemas más usados.

Por otra parte, razones económicas o de escasez, han obligado también a estudiar e incorporar sistemas internos de recuperación de agua. Pueden citarse como típicos, el retorno de condensados y la recirculación de aguas de enfriamiento.

Hasta las dos últimas décadas, no fue necesario prestar atención especial al tratamiento o recuperación de los efluentes industriales, principalmente debido a que la abundancia de agua en los cuerpos receptores permitía una descarga libre y sin problemas, salvo en casos muy especiales. Esta situación ha cambiado como resultado del incremento que se ha observado en la contaminación de los recursos acuáticos disponibles, obligando a las autoridades de muchos países del mundo a establecer medidas legislativas que prevén el control de las descargas líquidas industriales y municipales. Así, estos procedimientos establecen por una parte, los límites máximos permisibles en los cuerpos receptores de acuerdo con los fines de utilización a que se destinan y su capacidad asimilativa.

## 2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS AGUAS RESIDUALES

### 2.1.1. PANORAMA GENERAL

Toda comunidad produce residuos tanto líquidos como sólidos. La parte líquida aguas residuales procede esencialmente del agua suministrada a la comunidad después de haber sido contaminada por los diversos usos a que ha sido sometida. Desde el punto de vista de las fuentes de generación, las aguas residuales pueden definirse como una combinación de líquidos o aguas portadoras de residuos procedentes de residencias, instalaciones públicas, así

como de centros comerciales e industriales, a las que eventualmente pueden agregarse aguas subterráneas, superficiales y pluviales.

Los desechos industriales afectan de muchas y muy diferentes formas el curso natural de las fuentes de agua. Cuando estos efectos son lo suficientemente grandes como para considerar que esta fuente es inaceptable para ser "usada", se dice que está contaminada.

El agua es un elemento vital para los organismos que pueblan el planeta. No solamente se encuentra sobre la superficie sino que parte de ella se infiltra al subsuelo y forma los acuíferos. De estos, el agua puede brotar en forma natural por diferencia de presión (manantiales o por pozos artesianos) o a través de bombeo artificial.

Entre los diferentes usos del agua están los de escala doméstica (bebida, riego, etc.), los naturales (base para la vida de la flora, la fauna y vida acuática), los recreativos (natación, remo, etc.) y los industriales (medio de enfriamiento o calentamiento, limpieza, materia prima, etc.).

Las fuentes acuíferas (superficiales o subterráneas) pueden asimilar una cierta cantidad de desechos antes de llegar al llamado "estado contaminado". Estos desechos pueden estar presentes en forma suspendida, disuelta o en forma coloidal. Pueden incluso estar en forma de energía a temperaturas varios grados mayores que las del cuerpo y que afectan a la flora y fauna presentes.

En la naturaleza, cuando la mano del hombre no ha creado compuestos xenobióticos o tóxicos, esta separación de materiales contaminantes se realiza por los propios ecosistemas.

Por ejemplo, los materiales disueltos que son útiles para algunos seres vivos y pueden ser empleados como alimentos, son adsorbidos por las bacterias y otros microorganismos (consumidores primarios) que los usan como nutrientes haciendo que estos se reproduzcan quedando en forma suspendida y formando una nueva fuente de alimento para otras especies (consumidores secundarios).

Por tanto, para decir que un acuífero o fuente de agua están contaminados, éste debe tener un exceso de agentes contaminantes, esto es que los ciclos ecológicos naturales no pueden restablecer el equilibrio ya sea porque los contaminantes no son biodegradables o por que la cantidad de ellos que está siendo arrojada con respecto al tiempo, excede la rapidez de asimilación del ecosistema (Durán-Domínguez-de-Bazúa, 1994).

### **2.1.2. ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES**

En la industria el agua se utiliza como materia prima, medio de producción (agua de proceso) y para propósitos de enfriamiento. El agua de desecho proveniente de los procesos de producción se denomina agua residual industrial.

Generalmente, las aguas residuales industriales se caracterizan por tener un caudal y composición variables en el día y durante los meses del año, alta concentración de contaminantes, agresividad, color, presencia de contaminantes persistentes y tóxicos.

Sin embargo, los valores y la diversidad de contaminantes fluctúan considerablemente, dependiendo de muchos factores, tales como los tipos de proceso de fabricación y las materias primas e insumos utilizados, el tamaño de la planta, el método de operación, las actividades temporales, el modo de suministro de energía, las condiciones locales, el uso de sistemas de recirculación dentro de la planta y la variación de la producción.

Cualquier componente de la materia prima, de las sustancias químicas utilizadas en los procesos de fabricación de los subproductos finales, puede aparecer como contaminante en los efluentes de las plantas industriales. La caracterización fisicoquímica de las aguas residuales consiste en determinar la concentración de los elementos o compuestos contaminantes presentes.

Para caracterizar las aguas residuales industriales se usan los mismos parámetros, de caracterización física, química y biológica de las aguas residuales domésticas adicionando la determinación de algunos elementos o compuestos químicos cuando se supone su presencia (tóxicos orgánicos, cianuros, mercaptanos, fenoles, sulfuros, etc.)

### **2.1.3. OBJETIVO DEL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES**

La evacuación de las aguas residuales industriales del territorio de las plantas se puede realizar por diferentes métodos: Descarga a cuerpos receptores superficiales, descarga al alcantarillado, infiltración, utilización agrícola. El agua puede ser también utilizada en la misma industria. Para llevar a cabo cualquiera de las alternativas anteriores, el agua descargada o reutilizada debe cumplir con restricciones, determinadas con base a los criterios de calidad del agua en los cuerpos naturales, los criterios de calidad del agua para uso agrícola y el requerimiento de asegurar la protección del sistema del alcantarillado y el funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales. En el caso de reutilización interna, el agua reciclada a un determinado proceso debe cumplir con los requisitos de calidad del agua según la tecnología de producción. El procesamiento de los efluentes industriales para cumplir con las restricciones de descarga o reutilización es el objetivo del tratamiento de las aguas residuales industriales (CNA, 2001).

### **2.1.4. TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES**

Según lo expuesto en lo anterior, es evidente que el agua natural y las aguas residuales por lo regular tienen composiciones altamente complejas y que normalmente se necesita modificar su composición para ajustarlas a un uso particular. En consecuencia, se requiere una variedad

de procesos de tratamiento para separar los diversos contaminantes que con seguridad se encontrarán. Los contaminantes pueden estar presentes como:

1. Sólidos:

- En suspensión, flotantes o grandes en el agua natural como hojas, ramas, etc.
- En el agua residual como papel, trapos, arenas, etc.

2. Sólidos suspendidos pequeños y coloidales :

- En el agua natural como partículas de arcilla y limo, microorganismos, etc.
- En el agua residual como moléculas orgánicas grandes, partículas de suelo y microorganismos, etc.

3. Sólidos disueltos:

- En el agua natural como sustancias inorgánicas mensurables como alcalinidad, dureza, ácidos orgánicos; etc.
- En el agua residual como compuestos orgánicos, sales, etc.

4. Gases disueltos:

- En el agua natural como bióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, etc.
- En el agua residual como sulfuro de hidrógeno, metano, etc.

5. Líquidos no mezclables: Grasas y aceites.

El tamaño de cada partícula determina el cambio de un grupo a otro; este cambio depende de sus características físicas tales como el peso específico del material y la división entre grupos es de cualquier manera indistinta. En ciertos casos puede ser necesario agregar sustancias para mejorar las características del agua, por ejemplo, cloro para desinfectar el agua, oxígeno para estabilizar biológicamente la materia orgánica (Tebbutt, 1995).

## 2.2 MÉTODOS DE TRATAMIENTO

A continuación se describen algunos de los métodos de tratamiento de aguas más usados en el ámbito industrial y municipal.

### 2.2.1. PROCESOS FÍSICOS O TRATAMIENTO PRIMARIO

Dependen esencialmente de las propiedades físicas de la impureza, como tamaño de la partícula, peso específico, viscosidad, etc. Ejemplos comunes de este tipo de procesos son: cribado, sedimentación, filtrado, transferencia de gases. Por tanto, este tratamiento tiene por objetivo preparar el agua residual para el tratamiento posterior y proteger la planta de tratamiento de cargas repentinas de aguas residuales tóxicas o de materiales que dañen bombas, tuberías y otros equipos o accesorios.

### **2.2.2. PROCESOS BIOLÓGICOS O TRATAMIENTO SECUNDARIO**

Utiliza reacciones bioquímicas para quitar impurezas solubles o coloidales, normalmente sustancias orgánicas. Esto se puede lograr utilizando métodos de tratamiento aerobios en sistemas aerobios o anaerobios de reactores mezclados o de reactores de flujo pistón como lodos activados o lagunas aeradas, o reactores de biodiscos o reactores anaerobios que son capaces de remover contaminantes primarios y sustancias biodegradables. Algunos procesos de oxidación anaerobia se usan para la estabilización de lodos orgánicos y desechos orgánicos de alta concentración también biodegradables.

### **2.2.3. PROCESOS QUÍMICOS O TRATAMIENTO TERCARIO**

Tienen por objetivo remover los contaminantes provocado por la adición de productos químicos o por otras reacciones químicas. La precipitación, transferencia de gases, adsorción y la desinfección son los ejemplos de los procesos mayoritariamente utilizados en el tratamiento del agua residual. En la precipitación química, el tratamiento es llevado a cabo mediante la producción de un precipitado químico que se elimina por sedimentación.

En algunas situaciones, un solo proceso de tratamiento puede dar el cambio deseado en la composición, pero en la mayoría de los casos, es necesario utilizar una combinación de varios procesos. Por ejemplo, la sedimentación de partículas, la adición de un coagulante químico causará la aglomeración de partículas coloidales mismas que se pueden remover en gran parte por sedimentación. La mayoría de los sólidos no sedimentables que quedan, se pueden quitar mediante filtración en un lecho de arena. La adición de un desinfectante sirve para matar los microorganismos dañinos que hayan sobrevivido a los niveles de tratamiento precedentes (Tebbutt, 1995).

## **2.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS, BIOLÓGICAS Y RADIOLÓGICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES**

Aunque normalmente se considera que el agua es pura (como  $H_2O$ ), todas las aguas naturales contienen cantidades variables de otras sustancias en concentraciones que fluctúan de unos cuantos miligramos por litro en agua de lluvia a cerca de 35,000 mg/L en agua de mar. Por lo general, las aguas residuales contienen la mayoría de los constituyentes del agua suministrada más las impurezas adicionales provenientes del proceso productor de desechos. El agua residual cruda promedio contiene alrededor de 100 mg/L de sólidos en solución y suspensión, o sea que cerca de 99.9% es agua pura. Claro que medir simplemente el contenido total de sólidos de una muestra es insuficiente para especificar su condición ya que el agua subterránea, clara y brillante, puede tener el mismo contenido total de sólidos que el agua residual cruda. Para obtener una imagen verdadera de la naturaleza de una muestra en particular, es necesario cuantificar diferentes propiedades mediante un análisis que determine sus características físicas, químicas, biológicas y radiológica (Metcalf y Eddy, 1994).

Estas características son importantes ya que de ellas depende el tipo de tratamiento que debe darse al agua para depurarla. Estas características son:

1. Físicas: (Temperatura, color, olor, turbiedad, conductividad, resistividad, formación de espuma y materia en suspensión).
2. Químicas: (Presencia de compuestos orgánicos e inorgánicos).
3. Biológicas: (La presencia de organismos patógenos que transmiten enfermedades y falta de oxígeno disuelto necesario que provoca ausencia de animales y plantas aerobios).
4. Alteraciones radiológicas: (Factores de contacto del agua con sustancias radioactivas) (McCallion y Kemmer, 1979).

En el transcurso de los años, se han ido desarrollando una serie de ensayos para determinar el contenido orgánico de las aguas residuales. Los métodos de laboratorio más utilizados hoy día son el de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), carbono orgánico total (COT) y demanda total de oxígeno (DTO). Complementando estos ensayos de laboratorio se cuenta también con la llamada demanda teórica de oxígeno (DTeO). A continuación se describe la metodología que será usada en esta investigación:

La **demanda química de oxígeno** (conocida como DQO o COD, por sus siglas en inglés), es una medida de toda la materia presente en disolución y/o suspendida que puede ser químicamente oxidada en un medio ácido por un fuerte oxidante como el permanganato o el dicromato y se mide como miligramos de oxígeno equivalentes a la fracción orgánica disuelta y/o suspendida por litro de disolución (agua residual).

## 2.4 TRATAMIENTO ELECTROQUÍMICO

Durante las últimas décadas, la humanidad se ha encontrado con que los resultados de un indiscriminado desecho de residuos tóxicos, puede volverse en su contra y la del ambiente.

Particularmente en México, los problemas se han agravado ante la falta de una concientización acerca de los problemas resultantes de la contaminación. Afortunadamente, en nuestro país se han impuesto restricciones legales a la cantidad y tipo de compuestos químicos que pueden ser desechados al ambiente. Esto ha incrementado substancialmente el estudio de tecnologías a fin de recuperar o eliminar dichos compuestos químicos y es de esperarse que en

el futuro, este tipo de tecnologías se incrementa ante la creciente preocupación por la conservación de nuestro ambiente.

Con respecto al tratamiento de aguas residuales en nuestro país se conocen los métodos convencionales para el tratamiento de efluentes tales como los separadores de aceite API y de placas, los tratamientos químicos, los sistemas biológicos aerobios y anaerobios, entre otros. Estos sistemas presentan algunas desventajas entre las que se encuentran la necesidad de romper las emulsiones (aceite - agua) de los efluentes antes de pasarlos por los separadores de aceite, la generación excesiva de lodos provenientes de los sistemas químicos y biológicos, la necesidad de grandes áreas para la instalación de los sistemas de tratamiento, los altos tiempos de residencia requeridos durante el tratamiento y, finalmente, los costos (González-Martínez, 1995).

Un tratamiento de efluentes alternativo a los métodos convencionales que potencialmente puede superar algunas de las principales desventajas citadas anteriormente es el tratamiento electroлитico de efluentes que ya es utilizado en otros países como la Unión Soviética, Estados Unidos, Canadá, Alemania y otros.

Debido a que muchos de los compuestos que conforman las aguas de desecho son **ELECTROACTIVOS**, estos pueden eventualmente ser tratados a través de algún proceso electroquímico.

Las tecnologías electroquímicas se basan en electrones que pueden ser agregados o extraídos de las especies químicas, con la cual se puede llevar a cabo un cambio químico.

Una de las principales ventajas de los métodos electroquímicos que pueden considerarla como una tecnología más "LIMPIA" es la posibilidad de recuperar sustancias químicas para ser reutilizadas y extraer metales en su forma más valiosa. Las industrias de electrorrecubrimientos, minas, fotográficas, baterías, de circuitos impresos y, en general, todas aquéllas que en alguna parte de un proceso usen soluciones de algún ion metálico, pueden usar métodos electroquímicos a fin de extraer los iones metálicos, antes de que la solución sea desechada al drenaje. Sin embargo muchas veces es necesario un tratamiento previo a la electrólisis a fin de acondicionar las soluciones. Esto implica:

1. El incremento de la conductividad
2. Remoción de sólidos y compuestos agresivos y
3. Ajuste del valor de pH.

Los métodos electroquímicos ofrecen ciertas ventajas respecto a los métodos químicos en algunas áreas. Es de esperarse que, en los próximos años se propaguen nuevos desarrollos en la tecnología electroquímica para el tratamiento de aguas residuales, aire, áreas de tierra contaminada y así como síntesis orgánica e inorgánica. Por tanto, se ha considerado que los procesos electroquímicos pueden ser altamente selectivos.

Los procesos electroquímicos ofrecen varios enfoques prometedores para la prevención y resolución de problemas de contaminación, entre las principales características están:

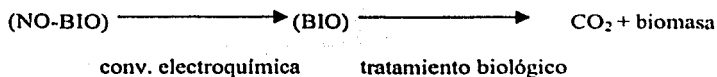
- a) Versatilidad
- b) Eficiencia de energía
- c) Facilidad de automatizarse
- d) Compatibilidad ambiental
- e) Efectividad

A continuación se da una descripción de estas características

- **Versatilidad.** Oxidaciones y reducciones directas e indirectas, separaciones de fase, concentraciones o disoluciones y funciones biocidas, etc.
- **Eficiencia de energía.** Generalmente los procesos electroquímicos tienen requerimientos más bajos de temperatura, que sus contrapartes no-electroquímicos equivalentes (como la incineración). Se puede controlar las diferencias en potencial eléctrico, los electrodos y celdas pueden ser diseñados para minimizar pérdidas de la corriente, caídas en voltaje y reacciones colaterales.
- **Factibilidad de automatizarse.** Las variables utilizadas en los procesos electroquímicos son: corriente (I) y voltaje (E) lo que los hace apropiados para facilitar la adquisición de datos, el proceso de automatización y el control.
- **Compatibilidad con el ambiente.** El principal "reactivo es el electrón", el cual es un reactivo limpio y, frecuentemente, no hay necesidad de agregar ningún aditivo extra. La alta selectividad de estos procesos ayuda a prevenir la generación de productos secundarios indeseados.
- **Efectividad en costos.** El equipo requerido y sus operaciones son simples y con un diseño apropiado; también son muy económicas (Garduño-Miranda, 1997).

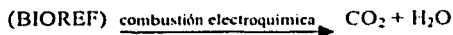
Hay dos principales aplicaciones para el tratamiento electroquímico:

- 1) El método de "conversión electroquímica", en el cual los compuestos orgánicos "no biodegradables" (NO-BIO) son transformados a compuestos orgánicos biodegradables (BIO) antes del tratamiento biológico.

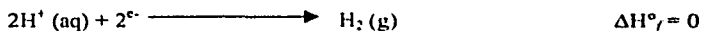
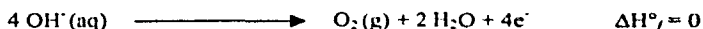




- 2) El método de "combustión electroquímica" u oxidación es donde los compuestos orgánicos son completamente oxidados a  $\text{CO}_2$ . En este caso, el material del electrodo debe tener una alta actividad electrocatalítica hacia la combustión electroquímica de los compuestos orgánicos a  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ .



La oxidación electroquímica (conversión y/o combustión) de todos los compuestos orgánicos es teóricamente posible antes de la generación de oxígeno (debido a la descarga de  $\text{H}_2\text{O}$ ), pero en la práctica, la oxidación es lenta, como consecuencia de la cinética más que de las limitaciones termodinámicas (energía mínima requerida) (Garduño-Miranda, 1997):



## 2.5 ELECTROCOAGULACIÓN Y ELECTROFLOCULACIÓN

### 2.5.1 ELECTROFLOCULACIÓN

Los procesos químicos de floculación y coagulación para el tratamiento de aguas residuales industriales garantizan un alto efecto de purificación y una buena decoloración. La principal desventaja de este método se debe al hecho de que los reactivos son introducidos en cantidades considerables y los sulfatos y los cloruros exceden los límites permisibles. Además, los lodos producidos son muy voluminosos, especialmente los producidos por aguas residuales consideradas como de difícil tratamiento, como es el caso de las provenientes de industrias químicas con varios procesos acoplados que originan variaciones de la concentración total del efluente. Ejemplos de estos son los de la industria textil y la de otros tipos de industria que posean una cantidad considerable de agentes tensoactivos; puesto que se hace necesaria la combinación de varios agentes: Capturadores de sólidos, clarificadores, coagulantes, floculantes, adsorbentes, etc.

Entendiendo la diferencia que existe entre coagulación y floculación, se puede considerar a la coagulación, como la etapa de desestabilización del equilibrio de la dispersión coloidal, hasta

la formación de grumos pequeños, aunque también recibe este nombre la desestabilización coloidal producida por sales metálicas. La floculación es, por el contrario, la etapa de aglomeración de esos pequeños grumos, para formar grandes floculos; también recibe este nombre la desestabilización producida por agentes polielectrólitos floculantes.

Es pertinente hacer estas aclaraciones dado que, aunque los especialistas en el tema, hacen una clara distinción entre estos procesos, en la mayoría de la literatura de años anteriores y en la que no es especializada al proceso de desestabilización de las aguas residuales para su separación, se le conoce con el nombre generalizado de floculación; incluyendo dentro de este tema algunas veces como sinónimo la palabra coagulación o, aunque en la mayoría de la literatura actual, se hace hincapié en la diferencia: ésta se hace dentro del tema de floculación. De allí el título de esta investigación. Como la desestabilización electroquímica se realiza con compuestos metálicos; los investigadores la han definido como electrocoagulación, término que se empleará en el resto del trabajo.

El proceso de electrocoagulación se lleva a cabo en dos etapas simultáneas: Una etapa que consiste en una electrocoagulación propiamente dicha, en la cual, el agente coagulante es introducido como resultado de una reacción del electrodo y este proceso, permite un control cuidadoso de la cantidad de reactivo añadido al efluente. La otra etapa consiste en una electroflotación, en la que, debido a la electrólisis del agua, se producen oxígeno e hidrógeno gaseosos cuya función en este proceso es la de transportar a la superficie del líquido, los floculos producidos por electrocoagulación.

El acoplamiento de los dos procesos electroquímicos, convierte a este tipo de tratamiento de aguas residuales en una técnica altamente eficiente. Dicha eficiencia es función del material de los electrodos, su arreglo, la construcción de los electrocoaguladores y las condiciones de operación del proceso (Solis-Téllez, 1992).

## 2.5.2 DESESTABILIZACIÓN DE LAS PARTÍCULAS COLOIDALES POR ELECTROFLOCULACIÓN

El propósito de los incisos anteriores fue el de sentar las bases, primero de la estructura de las interfases para comprender las características de las aguas residuales y segundo, para comprender como con la adición de ciertos agentes químicos (coagulantes/floculantes), se rompe el equilibrio de las dispersiones coloidales lográndose de esta manera la separación de las fases sólida y líquida.

Todo parece indicar que la desestabilización de las partículas coloidales por electrocoagulación, procede de acuerdo con el mecanismo de adsorción iónica específica, puesto que la disolución parcial anódica, origina la presencia de cationes libres en la disolución, los que de inmediato son enlazados químicamente a la superficie de las partículas para la formación de hidróxido dibásicos y tribásicos, positivamente cargados que se adsorben sobre éstas, neutralizando su carga. Con ello, el valor de  $\psi_0$  (potencial de la carga eléctrica de

la partícula) es reducido, originando una compresión de la región de la carga difusa de Gouy-Chapman. Las partículas ya no se repelen unas con otras y las condiciones para la aglomeración son las óptimas (Solís-Téllez, 1992).

### 2.5.3 ELECTRÓLISIS DEL AGUA

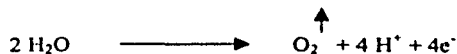
La electrólisis del agua, fenómeno necesario en los procesos de electroflotación y de electrocoagulación es un ejemplo de reacción electroquímica.

Todo parece indicar que el simple paso de una corriente eléctrica a través de un conductor electrolítico va siempre acompañado de reacciones en los electrodos (el desprendimiento de gases es la más común aunque no la única de estas reacciones). Las reacciones que toman lugar en los electrodos en disoluciones ácidas, son las siguientes:

**Reacción catódica**

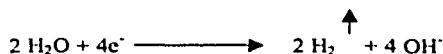


**Reacción anódica**



Las reacciones que ocurren en medios alcalinos son las siguientes:

**Reacción catódica**



**Reacción anódica**



En la electrólisis del agua no hay reacciones secundarias que conduzcan a productos indeseados (Solís-Téllez, 1992).

### 2.5.4 ELECTROFLOTACIÓN

Cronológicamente, el proceso de electroflotación (para el tratamiento de aguas residuales industriales), se desarrolló antes que la electrocoagulación; es más, la electrocoagulación surgió como un complemento necesario en algunas aplicaciones de la electroflotación.

La flotación electrolítica, como el nombre puede sugerir, es un método de separación por flotación, la cual utiliza la electrólisis para efectuar el proceso.

El requisito necesario para una operación de electroflotación intermitente es la generación de gas oxígeno en el ánodo y de hidrógeno gaseoso en el cátodo. Puesto que son estas moléculas gaseosas, las únicas responsables de acarrear los flocúlos formados por coagulación y floculación a la superficie del líquido, el paso de corriente entre los electrodos, puede promover por sí sola la neutralización de las partículas cargadas en la disolución, promoviendo de esta manera la coagulación de las gotas emulsionadas.

Hay muchos materiales de electrodo que pueden ser utilizados. Puede, además, utilizarse un material distinto para la construcción del ánodo y del cátodo. Dependiendo de la electronegatividad del metal usado para el ánodo, la disolución de los metales varía durante la electrólisis del agua.

El tipo de ánodo es importante para calcular la frecuencia con que éste debe ser reemplazado además de los consecuentes costos de mantenimiento. Los investigadores han experimentado con numerosos materiales de electrodo como se muestra en la Tabla 2-1 (Solis-Téllez, 1992).

Tabla 2.1. Tipos de materiales de electrodo utilizados en el proceso de electroflotación (Nagendran and Hruvey 1980; en Solis-Téllez, 1992)

1. HIERRO
2. ALUMINIO
3. ACERO INOXIDABLE
4. PLATINO
5. CARBONO (GRAFITO)
6. DIÓXIDO DE PLOMO
7. MANGANESO Y RUTENIO DEPOSITADO SOBRE TITANIO
8. PLOMO CUBIERTO CON TITANIO
9. ACERO INOXIDABLE CÁTODO, ORO ÁNODO

La mayor ventaja aparente de la flotación electrolítica sobre otros procesos de eliminación por flotación, reside en su habilidad de eliminar en algunas circunstancias aceites emulsionados.

Las ventajas del proceso de electroflotación son las siguientes (Solís-Téllez, 1992):

1. El proceso forma flóculos superficiales de fácil desnatado.
2. El flóculo superficial contiene menor cantidad de agua que el flóculo convencional.
3. La combinación de los métodos químicos y electroquímicos, abarata drásticamente los costos para el tratamiento de aguas residuales, debido al efecto sinérgico que se presenta.
4. El proceso puede manejar aguas residuales ligeras y pesadas sin requerir un cambio de secuencia.
5. El sobre costo de proceso es bajo.
6. Los efluentes acuosos frecuentemente experimentan una reducción de más del 90% de las demandas química y bioquímicas de oxígeno, sólidos suspendidos y contenido de aceites y grasas.
7. Las rejillas de los electrodos pueden arreglarse de manera tal que provean buena cobertura del área superficial del tanque de flotación, para que se efectúe un mezclado homogéneo entre el efluente y las burbujas de gas.
8. Se forman una gran cantidad de burbujas de gas muy pequeñas con mínima turbulencia.
9. El gradiente de campo eléctrico entre los electrodos ayuda a la floculación de los sólidos existentes.
10. La producción de gases y el tiempo de residencia son fácilmente controlables.

Con base en estos fundamentos, a continuación, en el siguiente capítulo se presenta la metodología experimental que sirvió para alcanzar el objetivo planteado.

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA

#### 3.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se describen en primer lugar las características principales del equipo y del agua negra después del tratamiento biológico y antes del tratamiento químico con la cual se contó para llevar a cabo experimentalmente la decoloración y depuración del agua negra por el método de la electrofloculación. Se describen también las dimensiones y tipo de electrodos, una representación esquemática de los equipos utilizados para la técnica antes mencionada, un diagrama de flujo para tratar el agua negra de la industria papelera, objeto de esta investigación. Se tomaron como referencia de la bondad de esta metodología, algunas muestras de aguas residuales de la industria química. Finalmente, se describe la metodología empleada para determinar las características físico-químicas iniciales y finales del agua a tratar, como son la concentración de materia orgánica presente en ella, medida como demanda química de oxígeno total y como coloración y la cantidad de sólidos totales, estas dos últimas para las aguas de la industria papelera solamente. Se describen también las técnicas de análisis usadas para cuantificar estos parámetros y llevar a cabo el seguimiento de las reacciones de la electrofloculación, en el cual el agente coagulante es introducido como resultado de una reacción del electrodo.

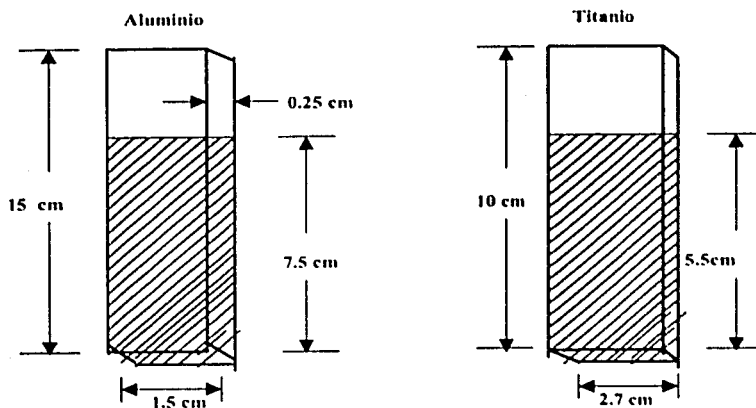
##### 3.1.1 DIMENSIONES Y TIPO DE ELECTRODOS

Para los experimentos que se llevaron a cabo aplicando el método de electrofloculación y, a la vez, la electrooxidación para el tratamiento de las aguas residuales de la industria papelera se usaron exclusivamente electrodos de aluminio tanto en el ánodo como en el cátodo y, para el tratamiento de las aguas residuales de la industria química se usaron dos tipos de electrodos de alto potencial de oxidación de titanio recubiertos con dióxido de estaño como ánodo ( $\text{Ti/SnO}_2$ ) y de titanio recubierto con dióxido de plomo como ánodo respectivamente ( $\text{Ti/PbO}_2$ ) con las dimensiones que se muestran en la Figura 3.1. La parte sombreada corresponde a la zona sumergida de los electrodos en la solución acuosa.

##### 3.1.2 CELDA ELECTROLÍTICA Y APARATOS

En el método para llevar a cabo la electrofloculación se utilizó una celda electrolítica de placas paralelas de aluminio a régimen intermitente (batch, por su nombre en inglés) y con agitación constante (Figura 3.2). La agitación se hizo a través de un agitador

electromagnético. Se tiene una fuente de poder de 20 Amperes y 30 Volts, para aplicar el potencial que da el gradiente correspondiente. Se tiene un vaso de precipitado (vidrio pyrex) con capacidad de 180 mL donde se alimenta el agua residual en estudio con un volumen de trabajo de 125 mL de agua residual. La densidad de corriente  $i$  varió de 0.016 a 0.020 y de 0.020 a 0.024. El tiempo de reacción varió de 3 min 30 s a 2 min 56 s y de 3 min 5 s a 2 min 45 s.



Altura: 7.5 cm

Ancho: 1.5 cm

Espesor: 0.25 cm

$A_T = 26.625 \text{ cm}^2$  ánodo

$A_T = 53.25 \text{ cm}^2$  cátodo

$A_T = 79.875 \text{ cm}^2$  sistema

$A_T = 14.85 \text{ cm}^2$  ánodo

$A_T = 14.85 \text{ cm}^2$  cátodo

$A_T = 29.7 \text{ cm}^2$  sistema



Área en contacto con la solución.

Fig. 3.1. Dimensiones de los electrodos utilizados

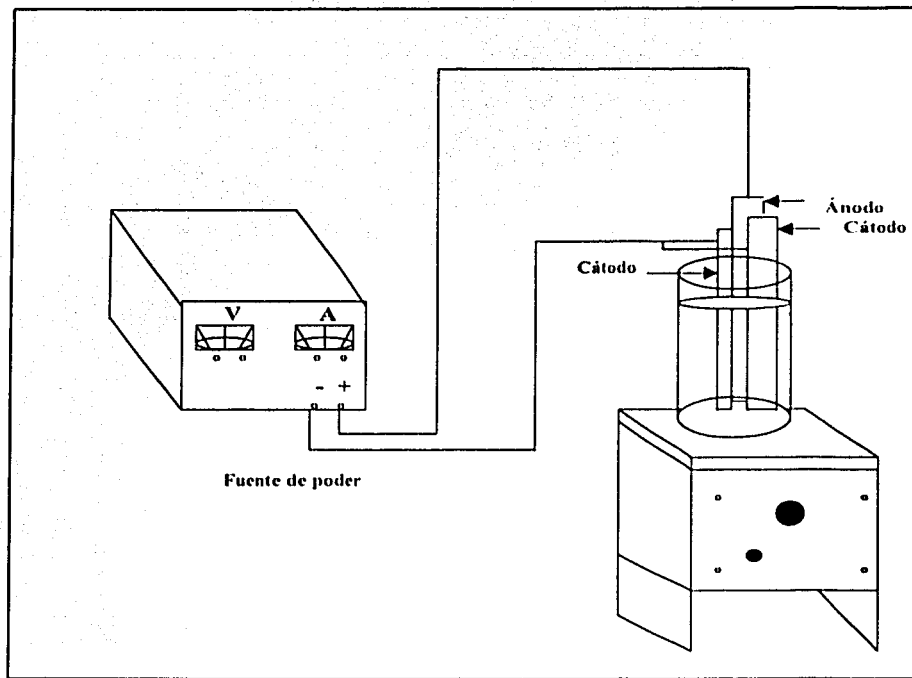


Fig. 3.2. Esquema de los equipos utilizados en el proceso de electrocoagulación

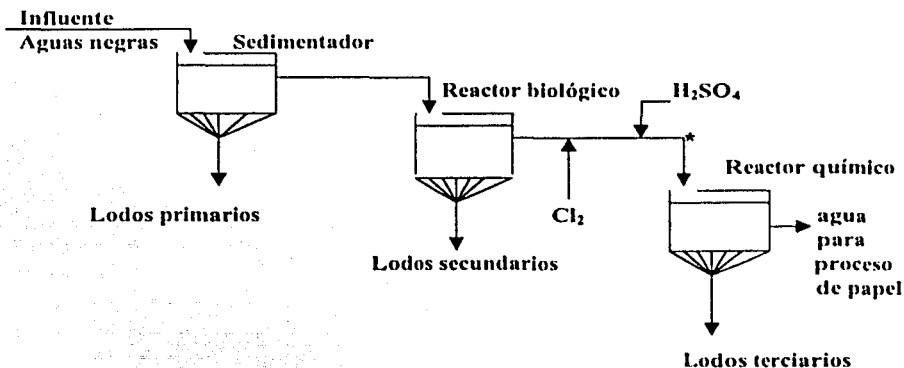
### 3.2 EXPERIMENTOS REALIZADOS

Las pruebas de electrocoagulación se efectuaron con electrodos de aluminio, tanto en el ánodo como en el cátodo, las cuales tienen las mismas dimensiones mencionadas en el esquema de la Figura 3.1 y las pruebas de electrooxidación se efectuaron con electrodos de titanio recubiertos con dióxido de estaño ( $Ti/SnO_2$ ) y electrodos de titanio recubiertos con dióxido de plomo  $Ti/PbO_2$  como ánodo, respectivamente.



### 3.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL AGUA RESIDUAL A TRATAR

En el diagrama de flujo presentado en el primer capítulo se mostraban los diferentes procesos de tratamiento del agua negra usada en estos experimentos. La toma de las muestras de agua se hicieron después del tratamiento biológico, la desinfección con  $\text{Cl}_2$  y el ajuste del pH con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  con objeto de tener las condiciones óptimas de operación para su tratamiento alternativo electroquímico (justo antes del tratamiento químico). Las características fisicoquímicas iniciales de esta agua residual se mostraron en la Tabla 1.1.



(\*) Sitio de muestreo

Figura 1.1. DIAGRAMA DE FLUJO PARA TRATAR AGUAS NEGRAS

Adicionalmente, como pruebas comparativas, se tomaron algunas muestras de aguas residuales de la industria química. Estas aguas residuales provienen de diferentes partes de sus procesos. La Figura 3.3 presenta en forma esquemática las características de cada una de las cinco corrientes muestreadas.

Las empresas producen diferentes materiales por lo que las aguas residuales son muy variadas. La primera, con la clave C-1, contiene agentes tensoactivos, dispersiones

poliméricas, pigmentos y disoluciones orgánicas y es tratada con sulfato de aluminio y neutralizada con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , siendo utilizada para riego o limpieza en la propia empresa o vertida al drenaje. A esta última se le dio la clave C-2.

Tabla 1.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL AGUA NEGRA DESPUÉS DEL TRATAMIENTO BIOLÓGICO Y ANTES DEL TRATAMIENTO QUÍMICO

Características	Valor
Valor de pH, unidades de pH	7.9
Conductividad, mS/cm	2.1
Sólidos Disueltos Totales, SDT, $\text{mg/dm}^3$	1.06
Demanda química de oxígeno, mg DQO /L	58
Turbidez, unidades nefelométricas de turbiedad, UNT	2.42
Coloración, unidades de Pt-Co	113

La tercera corriente, C-3, contiene compuestos tipo azo (pigmentos azoicos, sustancias ayudafiltrantes, aminas primarias y ácidos sin especificar el tipo). La cuarta corriente, C-4, contiene agentes tensoactivos y trazas de nonilfenol. La quinta corriente, C-5, contiene poliestireno, dispersiones vinílicas y colorantes.

#### Corriente 1

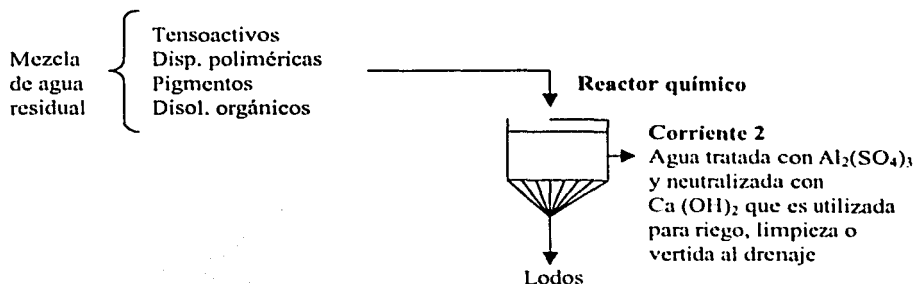
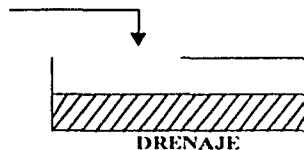


Figura 3.3.a. Descripción de la toma de muestras de aguas residuales identificadas como C-1 y C-2

**Corriente 3**

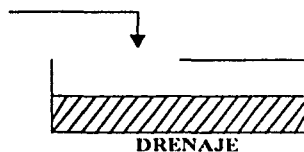
Corriente de Azocompuestos {  
 Pigmentos azoicos  
 Ayudafiltros  
 Aminas primarias  
 Acidos



**Figura 3.3.b. Descripción de la toma de muestras de aguas residuales identificadas como C-3**

**Corriente 4**

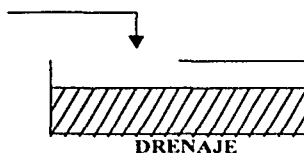
Corriente TH {  
 Tensoactivos  
 Trazas de nonilfenol



**Figura 3.3.c. Descripción de la toma de muestras de aguas residuales identificadas como C-4**

**Corriente 5**

Corriente BP {  
 Poliestireno  
 Dispersiones vinilicas  
 Colorantes



**Figura 3.3.d. Descripción de la toma de muestras de aguas residuales identificadas como C-5**

Estas cinco corrientes de aguas residuales de la industria química fueron tratadas experimentalmente con las siguientes condiciones de electrofloculación: En un vaso de precipitado (vidrio pyrex) con capacidad de 180 mL se alimenta el agua residual en estudio con un volumen de trabajo de 130 mL de agua residual. La densidad de corriente  $i$  varió de 0.075 a 0.097 (corridas 1 a 10). El tiempo de reacción varió de 3 min a 8 min.

A diferencia de los experimentos con las aguas "negras" tratadas por la empresa productora de papel, en estas aguas tratadas por electrofloculación se les adicionó un tratamiento posterior de electro-oxidación, en el cual la variable original de densidad de corriente se mantuvo constante y lo que se varió fue el tiempo de reacción de 8 a 50 min.

Se determinaron en todas ellas remoción de materia orgánica e inorgánica, medida como demanda química de oxígeno total (DQO), antes y después del tratamiento de electrofloculación, siguiendo la metodología del manual de operación del equipo marca Hach modelo COD Reactor con un espectrofotómetro acoplado marca Hach Modelo DR/2000. Las muestras fueron tomadas en forma simple, sin duplicado. Solamente a una de ellas, la que mostró visualmente mejores características se le determinaron sólidos disueltos totales iniciales y finales, y conductividad eléctrica, medida con un conductímetro marca Hach. También se midieron para esas muestras la temperatura inicial y final, con un termómetro normal de laboratorio de vidrio con bulbo de mercurio.

En las muestras de aguas de la industria papelera se determinó color, además de la demanda química de oxígeno total, usando un equipo sin marca de Platino-Cobalto, de acuerdo con las instrucciones del fabricante. También se midieron su turbidez usando un nefelómetro de laboratorio marca Hach, modelo 2100P, así como temperatura inicial y final, medida con un termómetro normal de laboratorio, y conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales, medidos con el mismo conductímetro Hach. Las muestras para ambos casos fueron tomadas en forma simple, sin duplicado. Finalmente, para estas mismas muestras se midieron sólidos fijos totales, siguiendo la metodología descrita en el Anexo 1.

Para evaluar el desgaste de los electrodos de aluminio al flocularse este metal con los contaminantes y precipitarse en las celdas, se hizo un cálculo preliminar de este rubro, empleando las leyes de Faraday y los equivalentes químicos.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. DATOS OBTENIDOS POR EL MÉTODO DE LA ELECTROFLOCULACIÓN DEL AGUA RESIDUAL USADA POR LA INDUSTRIA PAPELERA

De las corridas experimentales realizadas, en las que se variaron la densidad de corriente y el tiempo, se obtuvieron los resultados que aparecen en la Tabla 4.1. Como se puede ver, aplicando el método de electrofloculación con electrodos de aluminio la corrida número 15, con una densidad de corriente de  $0.024 \text{ A/cm}^2$  y un tiempo de  $3'20''$ , se presentó una mejor eficiencia en la remoción de color del 73.5% con respecto al agua "negra" (30 unidades) y una eficiencia de remoción de materia orgánica e inorgánica medida como demanda química de oxígeno total del 46.6% (de 58 a 31 mg DQO/L). Estos resultados muestran que el objetivo principal de esta investigación, que es la remoción del color en el agua residual de esta industria papelería de 70%, se alcanzó y que el contenido de material orgánico e inorgánico medido como DQO mayor del 50% también se alcanzó.

#### 4.2 DATOS OBTENIDOS DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA QUÍMICA APLICANDO EL MÉTODO ALTERNATIVO DE ELECTROFLOCULACIÓN Y ELECTROOXIDACIÓN USANDO ELECTRODOS DE $\text{Ti/SnO}_2$ Y $\text{Ti/PbO}_2$ COMO ÁNODO

##### Corriente C-1

La Tabla 4.2 presenta los datos experimentales obtenidos. Como puede observarse en la corrida 10, cuando se tiene una densidad de corriente de  $0.097 \text{ A/cm}^2$  y un tiempo de 8 minutos, se observó una remoción de materia orgánica e inorgánica visual, obteniendo una mejor calidad de agua (con un cambio de color que inicialmente era de color guinda opaco y finalmente anaranjado transparente). El volumen final de líquido fue de 87 mL y el resto era el material orgánico e inorgánico precipitado. Por ello, es que se planteó la realización de una prueba adicional de electrooxidación usando electrodos de titanio,  $\text{Ti/SnO}_2$  como ánodo manteniendo la densidad de corriente constante y variando el tiempo, como se puede ver en la Tabla 4.3.

Tabla 4.1. Datos experimentales obtenidos por electrofloculación de aguas "negras" tratadas por electrofloculación

No. de corrida	Volumen (mL)	Densidad de corriente (A/cm <sup>2</sup> )	Intensidad de corriente (A)	Voltaje (V)	Tiempo de reacción (min. s)	Valor de pH Inicial	Valor de pH Final	Conduct. inicial (mS/cm)	Conduct. final (mS/cm)	SDT inicial (mg/L)	SDT final (mg/L)	Temp. Inicial (°C)	Temp. Final (°C)	Turbidez (NTU)	Color (Unidades de Pt-Co)
1	125	0.020	0.53	3.5	3'30"	7.1	7.2	3.0	2.9	1.5	1.4	17.5	21.7	11.5	52
2	125	0.021	0.55	3.5	3'21"	7.1	7.2	3.0	2.9	1.5	1.4	17.5	21.7	13.3	50
3	125	0.022	0.58	4	3'12"	7.1	7.2	3.0	2.9	1.5	1.4	17.5	21.7	7.8	40
4	125	0.023	0.61	4	3'3"	7.1	7.2	3.0	2.9	1.5	1.4	17.5	21.7	8.8	48
5	125	0.024	0.63	4	2'56"	7.1	7.2	3.0	2.9	1.5	1.4	17.5	21.7	6.4	45
6	125	0.016	0.42	3.1	3'5"	8.1	8.1	2.0	2.1	1.03	1.07	17.5	21.7	0.76	45
7	125	0.017	0.45	3.1	3'	8.1	8.1	2.0	2.06	1.03	1.03	17.5	21.7	0.66	40
8	125	0.018	0.47	3.5	2'55"	8.1	8.2	2.0	2.05	1.03	1.03	17.5	21.7	0.35	38
9	125	0.019	0.50	3.7	2'50"	8.1	8.2	2.0	2.04	1.03	1.02	17.5	21.7	0.84	37
10	125	0.020	0.53	3.9	2'45"	8.1	8.2	2.0	2.07	1.03	1.03	17.5	21.7	1.04	39

Tabla 4.1. Datos experimentales obtenidos por electrofloculación de aguas "negras" tratadas por electrofloculación  
(Continuación)

No. de corrida	Volumen (mL)	Densidad de corriente (Amp/cm <sup>2</sup> )	Intensidad de corriente (Amp)	Voltaje (V)	Tiempo de reacción (Seg)	Valor de pH inicial	Valor de pH Final	Conduct. inicial (mS/cm)	Conduct. final (mS/cm)	SDT inicial	SDT final	DQOt final	Temp. Inicial (°C)	Temp. Final (°C)	Turbidez (NTU)	Color (Unidades de Pt-Co)
11	125	0.020	0.53	6.5	4'	7.8	8.1	2.11	2.04	1.06	1.02	39	17.9	22.3	1.57	42
12	125	0.021	0.55	6.5	3'49''	7.8	7.8	2.11	2.00	1.06	1.00	72	17.9	22.0	1.67	32
13	125	0.022	0.58	6.5	3'39''	7.8	7.8	2.11	2.00	1.06	1.00	38	17.9	22.1	1.22	36
14	125	0.023	0.61	6.5	3'29''	7.8	7.9	2.11	2.02	1.06	1.01	49	17.9	22.2	1.25	32
15	125	0.024	0.63	6.5	3'20''	7.8	7.9	2.11	2.01	1.06	1.01	31	17.9	21.8	1.08	30

Como puede verse de la corrida 15, con una densidad de corriente constante de  $0.025 \text{ A/cm}^2$  y un tiempo de 50 minutos, se obtuvo visualmente una mejor calidad del agua residual dejándola completamente transparente. No se realizaron análisis químicos que corroboren la calidad del agua por lo que, en trabajos posteriores, se estudiarán las mejores condiciones de operación para obtener parámetros dentro de normas.

**Tabla 4.2. Datos experimentales obtenidos del tratamiento por electrofloculación de la corriente C-1 de la industria química**

No. de Corrida	Volumen (mL.)	Densidad de corriente ( $\text{A/cm}^2$ )	Intensidad de corriente (A)	Voltaje (V)	Tiempo de reacción (min)	Valor de pH inicial	Valor de pH final
1	130	0.075	2	5.5	3	2.0	4.0
2	130	0.078	2.1	6.0	4	2.0	4.0
3	130	0.082	2.2	6.8	4	2.0	4.0
4	130	0.086	2.3	7.2	5	2.0	4.0
5	130	0.093	2.5	7.5	5	2.0	4.0
6	130	0.086	2.3	6.3	7	2.0	4.0
7	130	0.090	2.4	12.1	8	2.0	4.0
8	130	0.093	2.5	10.5	10	2.0	4.0
9	130	0.090	2.4	7.2	5	2.0	4.0
10	130	0.097	2.6	7.5	8	2.0	4.0

**Tabla 4.3. Datos experimentales obtenidos del tratamiento por electrooxidación de la corriente C-1 de la industria química**

No. De Corrida	Volumen (mL.)	Densidad de corriente ( $\text{A/cm}^2$ )	Intensidad de corriente (A)	Voltaje (V)	Tiempo de reacción (min)	Valor de pH inicial	Valor de pH final
11	87	0.025	0.37	4.9	8	2.0	5.0
12	87	0.025	0.37	4.9	12	2.0	5.0
13	87	0.025	0.37	4.9	15	2.0	5.0
14	87	0.025	0.37	4.9	30	2.0	5.0
15	87	0.025	0.37	4.9	50	2.0	5.0

### Corriente C-2

La Tabla 4.4 presenta los dos experimentos realizados. El color inicial del agua residual de la corriente C-2 es rosa claro turbio. Después de la aplicación del método alternativo de electrofloculación con una densidad de corriente de  $0.026 \text{ A/cm}^2$  y un tiempo de 5 minutos cambió la tonalidad del agua obteniendo un color café transparente, con un volumen final de 116 mL. Esta disminución de volumen es debida también a la remoción de materia orgánica e inorgánica como "lodos" acompañados con agua. Se tomó el volumen de 116 mL de la corrida 2 para la aplicación de la electrooxidación usando los electrodos de  $\text{Ti/SnO}_2$  como ánodo. Los resultados se presentan en la Tabla 4.5. A esta agua tratada si se le realizaron análisis de



demanda química de oxígeno total, de conductividad eléctrica, de sólidos totales fijos iniciales y finales y de temperatura inicial y final.

La corriente C-2, presenta inicialmente una demanda química de oxígeno de 3250 partes por millón (mg DQO/L). Aplicando la electrooxidación, como puede verse en la corrida número 3, con una densidad de corriente de  $0.026 \text{ A/cm}^2$  y un tiempo de 45 minutos, se obtuvo una remoción de materia orgánica del 99.7%, por lo tanto el agua es totalmente transparente, lo que indica que los resultados obtenidos son excelentes.

**Tabla 4.4. Datos experimentales obtenidos del tratamiento por electrofloculación de la corriente C-2 de la industria química**

No. de corrida	Volumen (mL)	Densidad de corriente ( $\text{A/cm}^2$ )	Intensidad de corriente (A)	Voltaje (V)	Tiempo de reacción (min)	Valor de pH inicial	Valor de pH final
1	130	0.026	0.4	6.5	30	6	7
2	130	0.026	0.4	2.1	5	7	6

### Corriente C-3

A esta corriente de agua residual se le aplicó el método alternativo de electrofloculación y, posteriormente, el de electrooxidación usando los electrodos antes mencionados. Dado que esta agua residual presenta compuestos orgánicos de tipo azo que son difíciles de degradar y de intensa coloración no se obtuvieron buenos resultados (Kuppasamy, 1995). Por esta razón, no se presentan los datos experimentales obtenidos de las pruebas realizadas.

### Corriente C-4

La Tabla 4.6 presenta los resultados obtenidos de estos experimentos. La corrida 3 muestra que la aplicación de la electrofloculación la convierte de inicialmente turbia de color blanco a una agua casi transparente con trazas de color amarillo pálido y obteniendo un volumen final de 90 mL a consecuencia de la remoción de exceso de materia orgánica e inorgánica en forma de "lodos". Aplicando posteriormente la electrooxidación con electrodos de  $\text{Ti/SnO}_2$  y  $\text{Ti/PbO}_2$  como ánodos se obtuvieron los datos presentados en la Tabla 4-7. Como puede observarse de las corridas 7 y 8 utilizando electrodos de  $\text{Ti/SnO}_2$  como ánodo, se obtuvo una coloración blanca turbia transparente, por lo que se puede decir que en esta electrooxidación con estos electrodos no fue removida la materia contaminante al 100%. En la corrida 9 se utilizaron los electrodos de  $\text{Ti/PbO}_2$  como ánodo dejando una calidad de agua totalmente transparente, por lo que se puede decir que estos electrodos remueven u oxidan la materia orgánica altamente contaminante al 100%. Naturalmente, esta información es solamente

cualitativa, ya que no se hicieron análisis para corroborar que, en efecto, se elimina la materia contaminante. Estos experimentos son parte de otro trabajo posterior.

**Tabla 4.5. Datos experimentales obtenidos del tratamiento por electrooxidación de la corriente C-2 de la industria química**

No. de corrida	Volumen (mL)	Densidad de corriente ( $A/cm^2$ ) <sup>1</sup>	Intensidad de corriente (A)	Voltaje (V)	Tiempo de reacción (min)	Valor de pH inicial	Valor de pH final
3	116	0.026	0.4	5.4	45	7	6

Conduct. Inicial (mS/cm)	Conduct. Final (mS/cm)	SDT inicial (mg/L)	SDT final (mg/L)	DQOt final (mg/L)	Temp. Inicial (°C)	Temp. Final (°C)
14.7	13.2	7.4	6.6	68	22	23

**Tabla 4.6. Datos experimentales obtenidos del tratamiento por electrofloculación de la corriente C-4 de la industria química**

No. de Corrida	Volumen (ml)	Densidad de corriente ( $Amp/cm^2$ ) <sup>1</sup>	Intensidad de corriente (Amp)	Voltaje (volts)	Tiempo de reacción (min)	Valor de pH inicial	Valor de pH final
1	130	0.082	2.2	5.3	5	5	4
2	130	0.094	2.5	14.5	5	5	5
3	130	0.015	0.4	15.8	10	5	6.5
4	130	0.090	2.4	14.0	5	5	5
5	130	0.060	1.5	15.7	5	5	6
6	130	0.067	1.8	15.7	10	5	6.5

**Tabla 4.7. Datos experimentales obtenidos del tratamiento por electrooxidación de la corriente C-4 de la industria química**

No. de Corrida	Volumen (ml)	Densidad de corriente ( $Amp/cm^2$ ) <sup>1</sup>	Intensidad de corriente (Amp)	Voltaje (volts)	Tiempo de reacción (min)	Valor de pH inicial	Valor de pH final
7.	90	0.026	0.4	15.8	15	5	5.5
8	90	0.013	0.2	15.8	20	5	6
9	90	0.033	0.5	9.3	20	5	6

### Corriente C-5

En la Tabla 4.8 se ven los datos experimentales de las corridas usando agua residual de la corriente C-5. Aplicando el método de electrofloculación, para la corrida 4 con una densidad de corriente de  $0.067 A/cm^2$  y un tiempo de reacción de 5 minutos, el agua cambió de color verde militar a un color con trazas de color verde claro, por lo que, cualitativamente, se puede

decir que la calidad de agua mejoró. Una vez que se realicen análisis químicos se definirá la pertinencia o no de aplicar la electrooxidación con los electrodos antes mencionados.

**Tabla 4.8. Datos experimentales obtenidos del tratamiento por electrofloculación de la corriente C-5 de la industria química**

No. de Corrida	Volumen (mL)	Densidad de corriente ( $A/cm^2$ )	Intensidad de corriente (A)	Voltaje (V)	Tiempo de reacción (min)	Valor de pH inicial	Valor de pH final
1	130	0.015	0.4	4	5	7.8	7.3
2	130	0.038	1.0	6.5	5	7.8	7.3
3	130	0.049	1.3	10	5	7.8	7.3
4	130	0.067	1.8	14.3	5	7.8	7.3

#### 4.3 CÁLCULOS PARA DETERMINAR LA CANTIDAD DE ALUMINIO DESPRENDIDA DEL ÁNODO QUE FORMA UNA SUSPENSIÓN CON LOS CONTAMINANTES

En la electrofloculación de la solución se usaron como ánodos y cátodos placas de aluminio. Al pasar la corriente se disuelve parcialmente la placa anódica en forma de catión libre en la disolución, los que de inmediato son enlazados químicamente a la superficie de las partículas para depositarse en forma de hidróxido de aluminio como sedimento.

Para llevar a cabo la electrofloculación se presentan dos tipos de reacciones electroquímicas que son:

##### Reacción No. 1



$$3e = 3F$$

Los datos obtenidos experimentalmente por el método de la electrofloculación de la corrida 15 de las aguas residuales de la industria papelera fueron:

$I = 0.63 \text{ Amp}$	$i = 0.024 \text{ Amp/cm}^2$	$A_T = 26.62 \text{ cm}^2$ del ánodo
------------------------	------------------------------	--------------------------------------

Para evaluar la cantidad de energía aplicada a las placas se estableció una relación simple: Para un segundo la energía era de 0.63 Coulombs, por lo que, para 3 min 20 s, será de 126 Coulombs.

Para calcular los gramos de aluminio se consideraron la masa molecular y la masa atómica del aluminio y la conversión de Coulombs a Faradays:

$$\begin{aligned} \text{Gramos de Aluminio} &= (\text{Masa atómica del Al}) (\text{Energía aplicada en Faradays}) / (\text{Núm. Electrones}) \\ &= (27) (126 \text{ C}) (1 \text{ F}) / (96,500 \text{ C}) / 3 \text{ F} = 0.011 \text{ g de aluminio} \end{aligned}$$

### Reacción No. 2



Datos	Fórmula	Sustitución	g hidróxido de aluminio
M. M. $\text{Al}(\text{OH})_3 = 78$	Masa molecular $(\text{Al}(\text{OH})_3 \times \text{g Al}^{+3}) / \text{Masa atómica del Al}$	$78 \times 0.011 / 27$	0.031

En esta fase de la investigación no se planteó la corroboración de estos dos valores (11 mg de aluminio y 31 miligramos de hidróxido de aluminio) a nivel experimental. En la siguiente fase se corroborarán midiendo el aluminio perdido en los electrodos y el que se encuentre en los sólidos precipitados en las celdas.

#### 4.4 DETERMINACIÓN DEL COSTO POR CONSUMO DE ENERGÍA EN PESOS POR METRO CÚBICO DE AGUA CRUDA EN TRATAMIENTO (\$ / m<sup>3</sup>)

De los valores obtenidos experimentalmente por el método alternativo de electrofloculación de la corrida 15 del agua residual de la industria papelera se tomaron los datos de densidad de corriente, voltaje, tiempo de reacción, volumen de la muestra y cantidad de contaminantes eliminada medida como DQO para determinar el consumo teórico de energía consumida por metro cúbico de agua tratada y su costo, con objeto de validar esta tecnología. Obviamente, estos son datos preliminares y será necesario realizar un estudio técnico-económico para corroborar la viabilidad de esta tecnología en estudios posteriores. Los datos son:

Densidad de corriente	0.024 Amp/cm <sup>2</sup>
Voltaje	6.5 volts
Tiempo de reacción	3'20"
Volumen de la muestra	125 mL
DQO agua cruda	58 ppm
DQO agua tratada	31 ppm

La cantidad de contaminantes removidos, medidos como mg de DQO es la siguiente:

Datos	Fórmula	Sustitución	Resultados
Volumen inicial = 125 mL	$(DQO_i - DQO_f) \times Vol_i = \text{PPM removido}$	$(58 - 31) \times 0.125$	3.375 mg
$DQO_i = 58 \text{ ppm}$			
$DQO_f = 31 \text{ ppm}$			

El cálculo de la energía consumida es:

Datos	Fórmula	Sustitución	Resultados
$A_T \text{ ánodo} = 26.62 \text{ cm}^2$	$I = i \times \text{Área}$	$I = 0.024 \times 26.62$	0.63 Amp
$i = 0.024 \text{ Amp} / \text{cm}^2$			
Voltaje = 6.5 Volts	$P = V \times I$	$P = 6.5 \times 0.63$	$4.1535 \times 10^{-1} \text{ kW}$
P = Potencia			

Datos	Fórmula	Sustitución	Resultados
T reacción = 0.056 hr.	Energía aplicada = T reacción x Potencia	$E_{ap} = (0.056) \times 4.15 \times 10^{-1}$	$2.3 \times 10^{-4} \text{ kW-h}$

Para calcular el costo del consumo de energía por kilogramo de contaminantes eliminados medidos como DQO se hizo lo siguiente (considerando que éstos estaban en 125 mL de agua residual cruda):

Datos	Fórmula	Sustitución	Resultados
$2.3 \times 10^{-4} \text{ kW-h}$ Vol. Inicial = $0.125 \times 10^{-3} \text{ m}^3$	Consumo = E aplicada / Vol. ( $\text{m}^3$ )	$\text{Cons} = 2.3 \times 10^{-4} / 0.125 \times 10^{-3}$	$1.84 \text{ kW-h} / \text{m}^3$

Datos	Fórmula	Costo por $\text{m}^3$ de agua cruda en tratamiento
Costo x $\text{M}^3 = 1.84 \text{ kW-h} / \text{m}^3$ Cargo por kW-h = \$ 1.3450	$1.84 \text{ kW-h} / \text{m}^3 \times 1.34 \text{ \$} / \text{kW-h}$	$2.5 \text{ \$} / \text{m}^3$

Este costo es competitivo con el costo que actualmente tiene la empresa con su sistema de tratamiento usando métodos convencionales, por lo que puede verse que es importante continuar con esta línea de investigación para corroborar estos resultados a mayor escala.

#### 4.5 DETERMINACIÓN DEL COSTO POR CONSUMO DE ENERGÍA EN PESOS POR KILOGRAMO DE MATERIA ORGÁNICA CONTAMINANTE MEDIDA COMO DQO (\$ / kg)

Los valores obtenidos experimentalmente por el método alternativo de electrofloculación de la corrida 15 del agua residual de la industria papelera, que son los mismos que para el cálculo anterior, se emplearon para determinar el costo por consumo de energía en pesos por kilogramo de lodos residuales obtenidos y son:

El cálculo del consumo de energía, ahora por unidad de masa es:

Datos	Fórmula	Sustitución	Resultados kW-h / kg DQOrem
$2.3 \times 10^{-4}$ kW-h Remoción = $3.37 \times 10^{-6}$ kg	Consumo = E aplicada / Remoción kg	Cons = $2.3 \times 10^{-4} / 3.3 \times 10^{-6}$	69.6

El costo unitario por kilogramo de DQO total removida es de:

Datos	Fórmula	Resultado \$ / kg DQO rem
Costo x kg = 69.6 kW-h / kg Cargo = 1.3450 \$ / kW-h	$69.6 \text{ kW-h / kg} \times 1.3450 \text{ $ / kW-h}$	93.6

No se tienen datos para comparar este resultado con lo que actualmente está haciendo la empresa papelera para depurar las aguas negras y utilizarlas en su proceso, por lo que este dato queda para estudios posteriores.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

A partir de las observaciones experimentales hechas durante el desarrollo del presente trabajo pueden establecerse las siguientes conclusiones:

- 1) De acuerdo a su composición fisicoquímica, las aguas residuales aprovechadas por la industria papelera a través de su tratamiento convencional presentan inicialmente una coloración y una demanda química de oxígeno (DQO) que hacen necesario un postratamiento. Este tratamiento fue substituido por el método alternativo de electrofloculación en el cual se usaron electrodos de aluminio, tanto en el ánodo como en el cátodo. **Este método fue probado con éxito y eficiencia** en el tratamiento de estas aguas residuales pretratadas, usando como variables la conductividad eléctrica, la corriente aplicada y el valor de pH. Se demostró su efectividad en la decoloración de aguas residuales ya que redujo su valor de 113 a 30 unidades de Pt-Co (del 73.5%) y, aunque la remoción de demanda química de oxígeno total (DQO) no fue tan exitosa, dio un valor suficientemente bueno (de 58 a 31 mg/L, o sea, del 46.6%).
- 2) En los procesos convencionales para el tratamiento de aguas residuales industriales el empleo de  $Al_2(SO_4)_3$  o  $FeCl_3$  son muy usados. Debido a estos productos químicos, los lodos obtenidos durante el proceso de sedimentación se clasifican como lodos químicos peligrosos, en los que se pueden encontrar hidróxidos de aluminio o de hierro procedentes de los coagulantes aplicados. Por otro lado debido a la eficiencia del proceso en la remoción de sólidos, los lodos extraídos del sedimentador se producen en mayor cantidad comparados con el método electroquímico. En este proceso a escala de laboratorio, se producen 0.031 g en 125 mL o sean 0.248 kg de hidróxido de aluminio por metro cúbico de agua cruda a tratar.
- 3) En el proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales industriales el agente coagulante es introducido como resultado de una reacción en los electrodos, ya que al pasar una determinada cantidad de corriente a través de la celda electrolítica se **disuelve parcialmente la placa anódica de aluminio en forma de catión libre**. Este proceso permite un control cuidadoso de la cantidad de aluminio disuelto parcialmente como catión que, de inmediato, es enlazada químicamente a la superficie de las partículas de contaminantes para depositarse en forma de sedimento como hidróxidos de aluminio en muy poca cantidad y logrando, finalmente, que los electrodos tengan un tiempo mayor de vida útil. De hecho, la cantidad de aluminio separada del electrodo fue

de 0.011 g que formaron 0.031 g de hidróxido de aluminio que separaron el equivalente de sustancias contaminantes, medidas como DQO, de 3.375 mg (0.003375 g) en un tiempo de 3 minutos y 20 segundos.

- 4) Se puede decir que el método alternativo de la ELECTROOXIDACIÓN es una tecnología potencialmente muy eficiente para el tratamiento de las aguas residuales. Este mecanismo de reacciones de electrooxidación química consta de dos pasos, el primero es una reacción netamente electroquímica, esta se efectúa en la interfase formada por la superficie del electrodo y la solución, en esta se forman las especies electroactivas que pueden ser hidrógeno, oxígeno o algún radical libre formado a partir de los compuestos orgánicos presentes en la solución, estas especies electroactivas se difunden a través de la solución, dando lugar al segundo paso de la reacción, que consiste en una reacción puramente química, en este paso las especies electroactivas reaccionan con los compuestos orgánicos presentes en la solución, para oxidarlos totalmente a  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , siendo este el paso determinante de la reacción total.

Por lo tanto, se puede concluir que el método alternativo de la electrooxidación puede ser una tecnología más limpia, efectiva y económica, que presenta varias ventajas con respecto a los métodos convencionales utilizados actualmente en el tratamiento de las aguas residuales industriales. Dentro de ellas se destacan:

- a) Son versátiles.
- b) Presentan la factibilidad de ser automatizados.
- c) Pueden tener costos competitivos.

## 5.2 RECOMENDACIONES

A partir de estos experimentos preliminares pueden darse las siguientes recomendaciones:

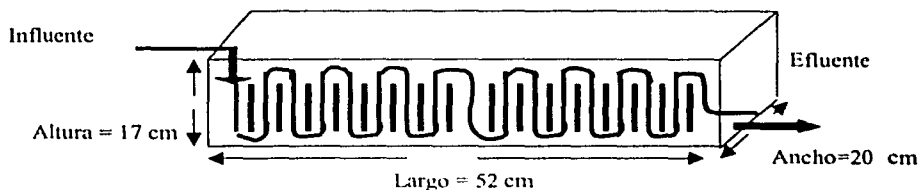
- a) El uso de técnicas electroquímicas para remover contaminantes contenidos en aguas residuales industriales tienen como principales ventajas oxidaciones y reducciones directas e indirectas. En estos experimentos, **no hubo necesidad de agregar ningún producto químico** como  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaOH}$  ó  $\text{Ca(OH)}_2$  (lechada) con el fin de ajustar el valor de pH para que se lleve a cabo la reacción de electrofloculación y, por lo tanto, este método alternativo de electrofloculación **tiene una alta selectividad que ayuda a prevenir la generación de productos secundarios indeseados dejando las aguas tratadas ácidas con características menos ácidas**. Será importante realizar experimentos controlados que permitan corroborar la bondad de la tecnología.



b) Para la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales se necesitan grandes áreas de terreno para la instalación de los equipos que se describen a continuación:

1. El cárcamo donde se lleva a cabo la neutralización del agua residual a tratar.
2. Tanque con productos químicos para neutralizar ( $H_2SO_4$ ,  $NaOH$ ) el pH.
3. Tanque de coagulación química con compuestos como el alumbre.
4. Tanque de sedimentación en el cual los sólidos suspendidos tienen un tiempo de residencia hidráulica suficiente para separar los sólidos del líquido tratado que, se espera, va a ser de menor capacidad para el sistema de electrofloculación (por generarse un volumen menor de lodos).
5. Equipo transportador de los lodos a los filtros en donde son prensados para la extracción de agua que es regresada al tanque de agua residual ya tratada que, se espera, va a ser de menor capacidad para el sistema de electrofloculación (por generarse un volumen menor de lodos).

En la actualidad mediante el desarrollo de arreglos integrales en las unidades que componen el proceso se obtienen sistemas cada vez más compactos como es en el caso del tratamiento de aguas residuales con nuevas técnicas electroquímicas, en donde la construcción de celdas electroquímicas no requerirán de áreas de terreno tan grandes. Un ejemplo se tiene en la construcción de una celda electroquímica para tratar el agua residual de una industria textil al norte de Taiwán. Las dimensiones de la celda electroquímica que emplearon se describen a continuación (Lin y Peng, 1996):



Ocho celdas de hierro de 19.5 cm x 2 cm como ánodo.  
 Ocho celdas de acero inoxidable de 19.5 cm x 2 cm como cátodo.  
 Velocidad de alimentación de agua residual a la celda electrolítica 1 L / min  
 Cárcamo 300 L de capacidad.  
 Corriente aplicada de 30 a 20 A.

La eficiencia es del 45% al 60% en la remoción de demanda química de oxígeno total (DQOt) y de la coloración. Esta variación depende de las condiciones de operación. El

flujo dentro de la celda electroquímica es constante. La corriente eléctrica aplicada a la pareja de electrodos ánodo y cátodo fue controlada por una fuente de poder. Con esto se puede comprobar que el área de terreno ocupada con este diseño de celda electroquímica es sumamente pequeña comparada con la instalación de una planta de tratamiento de aguas residuales antes mencionada. Los resultados que estos investigadores obtuvieron al comparar el proceso tradicionalmente usado por la empresa con el sistema electroquímico indicaron que el agua tratada cumplía con creces los límites de descarga establecidos por la normatividad y que el proceso electroquímico era 24% más económico.

Este resultado a escala piloto y los obtenidos a escala de laboratorio en esta investigación indican que resulta promisorio seguir realizando experimentos con aguas residuales industriales tendientes a convencer a los empresarios interesados en la bondad de esta tecnología.

- c) Se puede mejorar el método propuesto controlando con mejor precisión las variables tales como amperaje y el tiempo. Para mejorar este método alternativo de electrofloculación con aguas negras ó industriales las pruebas electroquímicas deben hacerse inmediatamente después de obtener las muestras del cárcamo, de lo contrario el agua entra en descomposición alterándose el pH y otras características fisicoquímicas como la conductividad, turbidez, la coloración, etc., que requerirían de mayor energía para su eliminación.
- d) Una de las recomendaciones más importantes en un tratamiento electroquímico es, sin duda alguna, el tipo de electrodos que se utilicen, debido a que es necesario utilizar electrodos que permitan la floculación inmediata de los contaminantes orgánicos que vienen en el agua residual sin causar la descomposición del disolvente agua.

## ANEXO 1

### DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES FIJOS (S T F)

#### 1. OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

La determinación del contenido de sólidos de un agua residual puede hacerse considerando sólidos totales, sólidos disueltos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos totales volátiles, sólidos suspendidos volátiles, sólidos disueltos volátiles. En esta investigación se midieron los sólidos totales fijos con la metodología que, a continuación, se describe.

#### 2. FUNDAMENTO

El método se basa en la evaporación y calcinación de la muestra, en donde los residuos de una y otra operación sirven de base para el cálculo del contenido de sólidos.

#### 3. APARATOS Y EQUIPO

- 1.- Balanza analítica, con sensibilidad de 0.0001 g
- 2.- Cápsula de porcelana, de 200 cm<sup>3</sup> de capacidad
- 3.- Mufla eléctrica capaz de mantener una temperatura de 823±25K (550±25°C)
- 4.- Equipo para evaporación previa (ya sea placa de calentamiento, baño maría, mantilla de calentamiento o cualquier otro medio de calentamiento adecuado)
- 5.- Desecador con deshidratante adecuado
- 6.- Disco de fibra de vidrio usado como filtro
- 7.- Crisoles de Gooch adecuados al tamaño de la muestra
- 8.- Bomba de vacío o eyector
- 9.- Matraz Kitasato con accesorios
- 10.- Equipo usual de laboratorio

#### 4. PROCEDIMIENTO

En función de la cantidad de sólidos probables, se tomaron muestras de 50 cm<sup>3</sup> que contenía como mínimo 25 mg de sólidos totales. Se transferían a la cápsula que previamente había sido puesta a masa constante, a 823K (550°C). Se secaron en la estufa a 376–378K (103–105°C) hasta peso constante. De allí se enviaron a la mufla para evaporar los compuestos volátiles y

dejar solamente los sólidos fijos. Se dejaron enfriar en desecador hasta temperatura ambiente y se determinó su masa ( $G_1$ ).

Nota: Con el objeto de abatir el tiempo de la prueba, se recomienda una pre-evaporación, reduciendo a la muestra a un volumen mínimo tal que se eviten proyecciones o pérdidas de la misma.

El contenido de sólidos totales, se calcula con la siguiente fórmula:

$$ST = \frac{G_1 - G}{V} \times 1000$$

en donde:

STF = Sólidos totales fijos, en mg / mL.

$G_1$  = Masa de la cápsula con el residuo, después de la evaporación y calcinación, en mg

G = Masa de la cápsula vacía, en mg

V = Volumen de la muestra, en  $\text{cm}^3$

Ejemplo:

1<sup>er</sup> Peso del crisol durante 1 h y 550°C =

G = Masa de la cápsula vacía a peso constante: 75.2148 mg

$G_1$  = Masa de la cápsula con el residuo después de la evaporación = 75.2853 mg

V = Volumen de la muestra = 50 mL

$$STF = \frac{75.2853 - 75.2148 \text{ mg}}{50 \text{ mL}} \times 1000 \text{ mL/1L} = 1.41 \text{ mg/L}$$

## BIBLIOGRAFÍA

APHA. "Standard methods for the examination of water and wastewater". 17a Ed. American Public Health Association. Washington D.C., EEUUA. 1992.

Bockris, J. O'M. y Reddy-Amulya, K.N. "Electroquímica moderna". Editorial Reverté, S.T. Vol. 1. Madrid, España. 1978.

CNA."Vertientes". Revistas de comunicación interna, Comisión Nacional del Agua. Consejo Editorial Galera. México, D.F. 2001.

Durán-Domínguez-de-Bazúa, M. C. "Tratamiento biológico de aguas residuales de la industria química y de proceso". Cuarta edición. Facultad de Química, UNAM D.F. México. 1994.

Garduño-Miranda, J.J. "Preparación de electrodos de alto sobrepotencial de oxígeno". Tesis profesional. Facultad de Química, UNAM. México, D.F. 1997.

González-Martínez, S. "Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales". Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F. Abril. 1995.

Kuppasammy, I. "Impacto ambiental de la industria textil en México: Avances en la biodegradación anaerobia y precipitación de colorantes tipo azo". En Memorias del Segundo Minisimposio Internacional sobre Remoción de Contaminantes de Aguas y Suelos". Pub. Instituto de Ingeniería, UNAM, México D.F., México. 1995.

Lin, Sh.H. y Peng, Ch.F. Continuous treatment of textile wastewater by combined coagulation, electrochemical oxidation, and activated sludge. Wat. Res., 30(3):587-592, 1996.

Mantell, C.I. "Ingeniería Electroquímica". Editorial Reverté, S.A. Madrid, España. 1980.

McCallion, J. y Kemmer, F.N. "Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones". Nalco Chemical Company. Mc Graw-Hill Book Co., Washington, EEUUA. 1979.

Metcalf & Eddy, Inc. "Tratamiento, evaluación y reutilización de aguas residuales". Segunda Edición. Revisada por George Tchobanoglous, Universidad de California, Davis. Editorial Labor, S.A. Bogotá, Colombia. 1994.

Solis-Téllez, A. "Electroflotación para el tratamiento de aguas residuales industriales". Tesis profesional. Facultad de Química, UNAM. México, D.F. 1992.

Tebbutt, T.H.Y. "Fundamentos de control de la calidad del agua" Limusa Noriega Editores. México, D.F. 1995.