

**PROPUESTA DE TRATAMIENTO PARA EL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
GENERADA POR PROCESOS DE CROMADO MEDIANTE
ELECTROCOAGULACIÓN**

ALEXANDRA PATRICIA MURILLO BARRAZA

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ
2016**

**PROPUESTA DE TRATAMIENTO PARA EL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL
GENERADA POR PROCESOS DE CROMADO MEDIANTE
ELECTROCOAGULACIÓN**

ALEXANDRA PATRICIA MURILLO BARRAZA

**Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ
2016**

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá D.C. _____ de 2016

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos.

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Secretario General

Dr. Juan Carlos Posada García- Peña

Decano Facultad de Ingeniería

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director Programa Ingeniería Química

Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

A mis padres, por su amor, su esfuerzo y por el apoyo incondicional que me brindaron a lo largo de mi carrera profesional y en especial en este proyecto, ya que sin ellos, nada de esto habría sido posible.

A mi hermano, mis abuelos y mis tíos, por su cariño, su comprensión y por enseñarme a ser constante y perseverante para alcanzar cada una de mis metas.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi agradecimiento a todas las personas que de una u otra forma hicieron parte de este proceso, especialmente a mi asesor, el ingeniero y docente William Javier Espitia, quien con sus conocimientos, orientación, esfuerzo y dedicación, me permitió llevar a feliz término este proyecto.

A la empresa Recubrimientos Galvánicos de Colombia, por abrirme sus puertas para la realización del proyecto investigativo, y a sus colaboradores, por guiarme, ayudarme y brindarme su apoyo en cada etapa del proceso.

A la Fundación Universidad de América por darme la oportunidad de formarme como profesional integral en pro de la sociedad.

Al cuerpo docente, amigos y compañeros de estudio que estuvieron a lo largo de mi carrera, por sus consejos y enseñanzas, que contribuyeron con mi formación tanto personal como intelectual.

A todos, muchas gracias.

Alexandra Murillo Barraza

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	17
OBJETIVOS	18
1.MARCO TEÓRICO	19
1.1 GENERALIDADES	19
1.1 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN GALVÁNICO	21
1.2 VARIABLES QUE AFECTAN LA ELECTROCOAGULACIÓN	22
1.2.1 Densidad de corriente	23
1.2.2 Potencial hidrógeno (pH)	23
1.2.3 Temperatura	24
1.2.4 Conductividad	24
1.2.5 Tiempo	24
1.2.6 Material de los electrodos	25
2. DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL	26
2.1 GENERALIDADES	26
2.2 PROCESO DE DESENGRASE	27
2.3 PROCESO DE DECAPADO	28
2.4 PROCESO DE COBRIZADO Y NIQUELADO	29
2.5 PROCESO DE CROMADO	30
2.6 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL	31
3. ELECTROCOAGULACIÓN	32
3.1 GENERALIDADES	32
3.2 REACCIONES EN EL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN	33
3.3 REACTORES PARA PROCESOS DE ELECTROCOAGULACIÓN	35

3.3.1 Reactor tipo Batch	36
3.3.1.1 Electrodo mono-polares	36
3.3.1.2 Electrodo bipolares	38
3.3.2 Otros tipos de reactores	38
3.3.2.1 Reactores de flujo	39
3.3.2.2 Reactor filtro prensa	40
3.3.2.3 Reactor de electrodo cilíndrico rotativo	40
3.3.2.4 Reactor de lecho fluidizado	41
3.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN	42
3.4.1 Celda de electrocoagulación	42
3.4.2 Geometría de los electrodos	43
3.4.3 Material de los electrodos	44
3.4.5 Número de electrodos	45
3.4.6 Fuente regulable de voltaje	46
3.4.7 Equipos complementarios	46
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	47
4.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL	47
4.1.1 Metodología	47
4.1.2 Variables y método	47
4.1.3 Resultados	48
4.2 ANÁLISIS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN	48
4.2.1 Metodología	48
4.2.2 Resultados	49
4.2.2.1 pH	49
4.2.2.2 Temperatura	50
4.2.2.3 Intensidad de corriente	51
4.2.2.4 Conductividad	52
4.2.2.5 Concentración de Cromo Total	53

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	56
4.3.1 Concentración de Hidróxido de Aluminio	56
4.3.2 Cinética de reacción	57
4.3.3 Isotherma de adsorción	61
4.4 CONDICIONES DE OPERACIÓN	66
5. ANÁLISIS ECONOMICO	68
5.1 COSTO DE OPERACIÓN	68
5.2 COSTO DE MATERIALES	70
5.3 COSTO TOTAL	70
6. CONCLUSIONES	71
7. RECOMENDACIONES	72
BIBLIOGRAFÍA	73

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Parámetros en vertimientos por revestimiento de metales	20
Tabla 2. Porcentaje de remoción proceso de electrocoagulación	22
Tabla 3. Condiciones iniciales del efluente	48
Tabla 4. Variación del pH con respecto al tiempo	49
Tabla 5. Variación de la temperatura con respecto al tiempo	50
Tabla 6. Variación de la intensidad de corriente con respecto al tiempo	51
Tabla 7. Variación de la conductividad con respecto al tiempo	52
Tabla 8. Variación de la concentración de cromo total con respecto al tiempo	53
Tabla 9. Porcentaje de remoción de cromo total	54
Tabla 10. Concentración de Al^{+3}	57
Tabla 11. Concentración de cromo en el FLOC y en la solución	61
Tabla 12. Datos para el modelo de Langmuir	63
Tabla 13. Datos para el modelo de Freundlich	64
Tabla 14. Costos de materiales	70

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Comportamiento del pH vs tiempo	49
Gráfica 2. Comportamiento de la temperatura vs tiempo	51
Gráfica 3. Comportamiento intensidad de corriente vs tiempo	52
Gráfica 4. Comportamiento de la conductividad vs tiempo	53
Gráfica 5. Comportamiento de la concentración de cromo vs tiempo	54
Gráfica 6. Comportamiento del pH vs la concentración de cromo	55
Gráfica 7. Comportamiento de la temperatura vs la concentración de cromo	55
Gráfica 8. Comportamiento de la conductividad vs la concentración de cromo	55
Gráfica 9. Comportamiento de la concentración de Al^{+3} vs tiempo	57
Gráfica 10. Cinética de reacción de primer orden	58
Gráfica 11. Cinética de reacción de segundo orden	59
Gráfica 12. Cinética de reacción de tercer orden	60
Gráfica 13. Comportamiento de [Cr] en el FLOC y en la solución	62
Gráfica 14. Isoterma de Langmuir	63
Gráfica 15. Isoterma de Freundlich	65

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diagrama del proceso de cromado	26
Figura 2. Diagrama del proceso de desengrase	27
Figura 3. Diagrama del proceso de decapado	28
Figura 4. Diagrama del proceso de cobrizado y niquelado	29
Figura 5. Diagrama del proceso de cromado	30
Figura 6. Diagrama del tratamiento de aguas residuales	31
Figura 7. Clasificación de reactores para procesos de electrocoagulación	35
Figura 8. Reactor tipo batch con electrodos mono-polares en serie	37
Figura 9. Reactor tipo batch con electrodos mono-polares en paralelo	37
Figura 10. Reactor tipo batch con electrodos bipolares	38
Figura 11. Reactor de flujo horizontal y flujo vertical	39
Figura 12. Reactor tipo filtro prensa	40
Figura 13. Reactor de electrodo cilíndrico rotativo	41
Figura 14. Reactor de lecho fluidizado	41
Figura 15. Dimensiones de la celda de electrocoagulación	43
Figura 16. Dimensiones de los electrodos	44
Figura 17. Configuración final del sistema de electrocoagulación	46

GLOSARIO

ADSORBATO: sustancia que es adherida en la superficie.

ADSORBENTE: superficie sobre la que sucede la adsorción.

AFLUENTE: agua residual u otro líquido que ingrese a algún tipo de tratamiento.

ANALITO: componente que interesa de una muestra: elemento, compuesto, ion.

ÁNODO DE SACRIFICIO O DE SACRIFICIO: metal con potencial de oxidación más electronegativo que el elemento a proteger y que al emitir corriente, es consumido.

CARGA CONTAMINANTE: producto de la concentración másica promedio de una sustancia por el caudal volumétrico promedio del líquido que la contiene, determinado en el mismo sitio. Expresado en kilogramos por día (kg/d), en un vertimiento.

CONTAMINACIÓN: alteración de medio ambiente con sustancias o formas que puestas en él, por actividad humana o de la naturaleza, en cantidades o concentraciones, pueden afectar el bienestar y/o salud de las personas, atentar contra la fauna y flora, degradar la calidad del ambiente o de los recursos.

DENSIDAD DE CORRIENTE: corriente por área unitaria, expresada en miliamperios por metro cuadrado (mA/m²) o miliamperios por pie cuadrado (mA/pie²).

EFLUENTE: líquido que sale de un proceso de tratamiento.

ELECTROCOAGULACIÓN: técnica utilizada para el tratamiento de las aguas residuales. Los contaminantes son removidos aplicando la técnica de coagulación, pero en vez de emplear un coagulante químico, es empleada la corriente eléctrica aplicada al medio líquido contaminado, para desempeñar la misma función.

FLOC: resultante de la unión de las partículas coloides, las partículas suspendidas y el coagulante.

FLOCULO: aglomeración de materia visible, formada luego de la coagulación.

PASIVACIÓN: formación de capas superficiales sobre un metal, el cual queda protegido de los agentes químicos agresivos. Generalmente, la capa está constituida por los óxidos del metal protegido.

TÉCNICA ANALÍTICA: principio científico adaptado a uno o varios instrumentos, útil y necesario para obtener información relacionada con la composición de una muestra.

VERTIMIENTO: descarga final a un cuerpo de agua, al alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido.

RESUMEN

Los sistemas de electrocoagulación como una alternativa para la remoción de agentes contaminantes, permiten la disolución de ellos, debido a la aplicación de un diferencial de potencial, que produce a su vez los iones que favorecen la aglomeración de las partículas para su posterior remoción.

El presente estudio describe la aplicación de la técnica de electrocoagulación como tratamiento para el agua residual de origen galvánico, llevado a cabo con un prototipo diseñado para tratar el efluente de un proceso de cromado específicamente en la empresa Recubrimientos Galvánicos de Colombia.

Para la consecución del estudio, fue construida una celda electrolítica que actúa como reactor tipo Batch, en el que de acuerdo al diseño experimental fueron llevados a cabo tres ensayos aplicando 10, 20 y 30V, obteniendo un porcentaje de remoción medido en función de la concentración de cromo total, de 60, 80 y 99% respectivamente, al cabo de 35 minutos de tratamiento. Además, fueron empleadas tres placas de aluminio y tres de hierro que actúan como electrodos, ubicados a una distancia de 1 cm, una temperatura inicial de 18°C, un pH inicial de 3,0 y una conductividad inicial de 2 mS/cm.

La electrocoagulación es consolidada entonces, como un proceso de tipo electroquímico que puede tener resultados favorables cuando es aplicado en el tratamiento de aguas residuales provenientes de procesos galvánicos, facilitando la remoción de contaminantes como cromo total, de manera efectiva en función del volumen a tratar.

Palabras clave: Electrocoagulación, metales pesados, cromo, aguas residuales galvánicas, celda electrolítica.

INTRODUCCIÓN

La presencia de concentraciones elevadas de metales pesados en aguas residuales producidas por procesos industriales, ha tenido desde siempre un alto impacto en el medio ambiente, evidenciado en el deterioro de cuerpos hídricos que son fundamentales en diversos ecosistemas. Entre las industrias que más contaminantes generan, está la galvanoplástica cuyos residuos están constituidos en mayor proporción por metales pesados como cromo, cobre, zinc, níquel, plata, cadmio, entre otros.

Es por ello que en los últimos años, han sido implementadas alternativas a través de las cuales los residuos líquidos son sometidos a un tratamiento previo a su vertimiento, debido a que dichos contaminantes son considerados como inhibidores de los procesos biológicos y causantes de daños en la salud de los seres humanos. Entre dichas alternativas, surge la electrocoagulación como uno de los métodos fisicoquímicos más empleados para aguas residuales contaminadas con metales pesados, debido a su alta eficiencia y en donde el agente floculante es generado mediante las reacciones que ocurren en la superficie del electrodo y no en presencia de un agente químico, reduciendo de forma considerable la cantidad de lodos que deben eliminarse.

Con base en lo anterior, el propósito del presente estudio es la implementación de un sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales aplicado a un efluente proveniente del proceso de cromado, con el fin de evaluar su eficiencia medida en función del porcentaje de remoción de cromo total.

Para el desarrollo del estudio fue necesaria la caracterización inicial del agua residual para determinar la concentración de cromo total antes del tratamiento; luego, a partir de una revisión bibliográfica, fue determinada la configuración para la celda electrolítica, teniendo en cuenta factores como la geometría y tamaño de la celda, material y disposición de los electrodos, entre otros aspectos; a continuación fueron establecidas las condiciones de operación del sistema con base en referencias bibliográficas; y finalmente, fue realizado un análisis de costos de implementación y operación del sistema de electrocoagulación propuesto.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta para el tratamiento del agua residual industrial generada por procesos de cromado mediante electrocoagulación.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diagnosticar las condiciones del proceso y el estado actual del agua residual generada por procesos de cromado.
2. Seleccionar la celda más apropiada a emplear en el sistema de electrocoagulación para el tratamiento del agua residual industrial.
3. Determinar las condiciones de operación del sistema de electrocoagulación.
4. Determinar los costos del tratamiento para el agua residual mediante electrocoagulación propuesto.

1. MARCO TEÓRICO

Este capítulo describe la actividad que desarrolla la empresa, los procesos que lleva a cabo, la problemática ambiental que afronta el sector del que hace parte, y los parámetros que contempla la legislación colombiana en materia de vertimientos. Además, incluye los tratamientos que pueden aplicarse al agua residual de origen galvánico y las variables que deben considerarse para la implementación de un proceso de electrocoagulación.

1.1 GENERALIDADES

Recubrimientos Galvánicos de Colombia. María Cristina Sussmann P. y Compañía Sociedad en Comandita, es una empresa colombiana con más de quince años de experiencia y trayectoria, dedicada a la prestación de servicios de recubrimientos electrolíticos y químicos sobre piezas tanto metálicas como plásticas; que realiza procesos de cromado, plateado, niquelado, cincado, irisado, estañado, fosfatado, cobrizado, pavonado;¹ y que está ubicada en la ciudad de Bogotá D.C. en la localidad de Puente Aranda en la Calle 11ª No. 32 – 35.

Es una compañía que hace parte de la industria galvánica, en la que deben emplearse grandes volúmenes de agua en operaciones de enjuague al cabo de cada una de las etapas que constituyen el proceso, generando a su vez, una proporción equivalente de agua residual con una alta carga contaminante que dada su naturaleza tóxica y corrosiva, resulta nociva tanto para el ser humano como para el medio ambiente.²

En vista de ello, y con el fin de controlar una problemática medioambiental de tal importancia y mejorar la calidad del agua del país; el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible presenta la Resolución 0631 de 2015, que determina los parámetros y valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público en la ciudad de

¹ RECUBRIMIENTOS GALVÁNICOS DE COLOMBIA. Procesos certificados. [En línea]. < <http://regalco.net/empresa.html> > [citado 4 de marzo de 2016]

² CHÁVEZ, Álvaro, *et al.* Una alternativa limpia para el tratamiento de las aguas residuales galvánicas: Revisión bibliográfica. EN: Revista Ingenierías Universidad de Medellín. Enero, 2009. Vol. 8 no 14, p. 41.

Bogotá, y que contempla los parámetros a monitorear en los vertimientos generados por el tratamiento y revestimiento de metales,³ que son evidenciados en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros en vertimientos por tratamiento y revestimiento de metales

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR MÁXIMO
Generales		
pH	pH	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	250,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	100,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	50,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mg/L	2,00
Grasas y aceites	mg/L	10,00
Fenoles	mg/L	0,20
Hidrocarburos		
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10,00
Iones		
Cianuro Total (CN ⁻)	mg/L	0,10
Metales y Metaloides		
Aluminio (Al)	mg/L	3,00
Arsénico (As)	mg/L	0,10
Bario (Ba)	mg/L	1,00
Cadmio (Cd)	mg/L	0,05
Cinc (Zn)	mg/L	3,00
Cobre (Cu)	mg/L	1,00
Cromo (Cr)	mg/L	0,50
Estaño (Sn)	mg/L	2,00
Hierro (Fe)	mg/L	3,00
Mercurio (Hg)	mg/L	0,01
Níquel (Ni)	mg/L	0,50
Plata (Ag)	mg/L	0,20
Plomo (Pb)	mg/L	0,20

Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

³ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631 (17 de marzo de 2015). Por la que se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Bogotá, 2015 p. 30

1.2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN GALVÁNICO

Las empresas del sector galvánico a raíz de los controles a los que son sometidas por parte de las autoridades ambientales, y con el objetivo de garantizar que los efluentes que generan sus procesos no sean de naturaleza tóxica, han decidido implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales con metodologías que incluyen fenómenos biotecnológicos, de adsorción, de intercambio iónico, de ultrafiltración, osmosis inversa, precipitación química, entre otros.⁴

Sin embargo, algunos de dichos tratamientos presentan limitaciones para su aplicación, como la dificultad para retirar los metales de los lodos resultantes en procesos industriales, la poca viabilidad por los altos costos de operación en procesos como la micro-filtración, la ultrafiltración o la osmosis inversa, y la dificultad para el reemplazo de resinas en el intercambio iónico.⁵

Es allí donde surgen los tratamientos basados en los principios de la electroquímica como la electro flotación, la electro decantación y la electrocoagulación,⁶ definida como un proceso en el que son desestabilizadas las partículas contaminantes suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, por medio de la inducción de corriente eléctrica a través de una serie de placas metálicas paralelas, y que representa una alternativa potencial dada su alta eficiencia determinada en función del porcentaje de remoción de los agentes contaminantes propios de la industria.⁷

Con el fin de establecer los rangos dentro de los que la electrocoagulación puede ser aplicada para el tratamiento de aguas residuales de origen galvánico, es necesario conocer las características de los efluentes similares que han sido obtenidos y analizados en diversas referencias bibliográficas, que corresponden a los valores evidenciados en la Tabla 2, que incluye la concentración inicial y final de los iones metálicos presentes, así como porcentaje de remoción de los mismos.

⁴ ACOSTA, Gema, *et al.* La electrocoagulación como un tratamiento para la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales. EN: Revista Facultad de Ciencias Básicas. Noviembre, 2013. Vol. 9 no. 2, p. 308.

⁵ *Ibídem.*

⁶ MORALES, Nelly. Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas. . EN: Ciencia e ingeniería Neogranadina. Junio, 2010. Vol. 20 no. 1, p. 36.

⁷ RESTREPO, Ana, *et al.* La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. EN: Producción + Limpia. Diciembre, 2006. Vol. 1 no. 2, p. 62.

Tabla 2. Porcentaje de remoción proceso de electrocoagulación

PARÁMETRO	UNIDADES	AKBAL (2012) ⁸	ABRIL (2009) ⁹	CHARRY (2002) ¹⁰	BAUTISTA (2011) ¹¹	MORALES (2010) ¹²
Voltaje	V	9,25	18,70	25,00	28,70	31,80
Intensidad de corriente	A	2,0	3,7	2,2	2,9	2,4
Concentración inicial						
Cromo Cr (III)	mg/L	-	-	493	-	-
Cromo Cr (VI)	mg/L	-	346	490	37,21	0,02
Cromo total	mg/L	193	-	-	-	1,82
Níquel (Ni)	mg/L	526	403	105,15	-	3,87
Concentración final						
Cromo Cr (III)	mg/L	-	-	0,19	-	-
Cromo Cr (VI)	mg/L	-	0	0,02	2,74	0,01
Cromo total	mg/L	0	-	-	-	0,88
Níquel (Ni)	mg/L	0	0,3	0,27	-	3,17
Porcentaje de remoción						
Cromo Cr (III)	%	-	-	99,96	-	-
Cromo Cr (VI)	%	-	100	99,99	92,64	50
Cromo total	%	100	-	-	-	51,65
Níquel (Ni)	%	100	99,94	99,74	-	18,09

1.3 VARIABLES QUE AFECTAN LA ELECTROCOAGULACIÓN

La electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de origen galvánico, es un proceso en el que intervienen variables como el pH, la temperatura, la densidad de corriente, la conductividad, entre otros; y que pueden afectar la efectividad del proceso y cuya influencia es descrita a continuación.

⁸ AKBAL, Feryal y CAMCI, Selva. Treatment of Metal Plating Wastewater by: Electrocoagulation. EN: Environmental Progress & Sustainable Energy. Octubre, 2012. Vol. 31, no 3, p. 348.

⁹ ABRIL, Dibar y LÓPEZ, Alexander. Ingeniería básica de una planta a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales en la empresa QUIMAPLIC LTDA. Mediante el método de electrocoagulación. Tesis Ingeniero Químico. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Departamento de Ingeniería Química, 2009. 130 p.

¹⁰ CHARRY, Julián y MOLANO, Diego. Diseño de la planta de tratamiento de agua residual proveniente del proceso electrolítico de la planta de cromado de GRICOL S.A. Tesis Ingeniero Mecánico. Tesis Ingeniero Mecánico. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Departamento de Ingeniería Mecánica, 2002. 259 p.

¹¹ BAUTISTA, Deissy y NIETO, Duvan. Desarrollo de la propuesta para el tratamiento de las aguas residuales de la empresa extrucciones SCHULLER Ltda. Tesis Ingeniero Químico. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. Departamento de Ingeniería Química, 2011. 185 p.

¹² MORALES, Nelly y ACOSTA, Gema. Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas. EN: Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Junio, 2010. Vol. 20, no 1, p. 40.

1.3.1 Densidad de corriente. Es una de las variables que más influye en la eficiencia del proceso debido a su asociación a factores económicos. A medida que la densidad de corriente aumenta, aumenta el consumo de energía y de la misma manera aumenta la eficiencia en la remoción de contaminantes. Sin embargo, altos consumos de energía representan pérdidas por la transformación de energía eléctrica en energía calórica, desencadenando un aumento en la temperatura del medio.¹³

La densidad de corriente aplicada al sistema de electrocoagulación es fundamental ya que determina la cantidad de iones que son liberados al medio por los electrodos. Sin embargo, para la selección de la densidad de corriente es necesario tener en cuenta otros parámetros como el pH y la temperatura.¹⁴

Por otra parte, la energía eléctrica aplicada a la celda electroquímica puede ser de corriente alterna (CA) o de corriente directa (CD). Las características de cada una de las corrientes producen diferentes respuestas electroquímicas entre las placas y el medio. Sin embargo, cuando la energía suministrada es de corriente directa, produce la impermeabilización en el cátodo que disminuye la eficiencia de la remoción.¹⁵

1.3.2 Potencial hidrógeno (pH). El efecto del pH está representado sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal, para la formación del hidróxido.

A medida que avanza el proceso de electrocoagulación, el pH puede variar en función del material de los electrodos y el pH inicial de la solución a tratar. Sin embargo, el pH puede irse incrementando en los efluentes ácidos debido a la formación de hidrógeno molecular en el cátodo; y disminuir en el caso de los efluentes alcalinos dependiendo de la naturaleza del contaminante.¹⁶

¹³ RESTREPO, Ana, *et al.* La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. EN: Producción + Limpia. Diciembre, 2006. Vol. 1 no. 2, p. 71.

¹⁴ *Ibíd.*

¹⁵ AGUILAR, Edward. Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. Tesis Magíster en Ciencias Ambientales con Mención en Control de la Contaminación y Ordenamiento Ambiental. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, 2015. 102 p.

¹⁶ RESTREPO, Ana, *et al.* La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. EN: Producción + Limpia. Diciembre, 2006. Vol. 1 no. 2, p. 71.

Pese a que la mayor eficiencia de remoción de agentes contaminantes se da en un rango específico de pH que puede ser amplio, los estudios similares de diversas fuentes bibliográficas refieren que a valores de pH cercanos a 7 han obtenido mejores resultados en dicha remoción.¹⁷

1.3.3 Temperatura. El efecto de la temperatura está asociado con el aumento de la eficiencia debido a que un incremento en dicha propiedad representa una mayor destrucción de la película de óxido formada en la superficie del electrodo a partir de la cual los iones son liberados al medio.

Por otra parte y pese a que el efecto de la temperatura en procesos de electrocoagulación no ha sido objeto de numerosos estudios, algunos de ellos encontraron que la eficiencia aumenta hasta llegar a los 60°C donde alcanza el valor máximo.¹⁸

1.3.4 Conductividad. El aumento de la conductividad eléctrica del sistema produce un incremento en la densidad de corriente. Agregar electrolitos como cloruro de sodio (NaCl) o cloruro de calcio (CaCl₂), favorecen aún más el aumento en la conductividad del agua residual.¹⁹

Además, los iones cloruro pueden reducir los efectos adversos producidos por iones como HCO₃⁻ y SO₄²⁻, que pueden facilitar la precipitación de Ca⁺², Mg⁺², propiciando la formación de una capa de óxido insoluble en la superficie de los electrodos que aumenta el potencial entre ellos y disminuye de forma significativa la eficiencia de la corriente en el proceso. Sin embargo, referencias bibliográficas infieren que es recomendable mantener una cantidad de iones cloruro (Cl⁻) cercanos al 20% para que el proceso de electrocoagulación sea normal.²⁰

1.3.5 Tiempo. Algunos de los estudios contemplados en diversas referencias bibliográficas, indican que a mayor tiempo de residencia, mayor es la cantidad de

¹⁷ AGUILAR, Edward. Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. Tesis Magíster en Ciencias Ambientales con Mención en Control de la Contaminación y Ordenamiento Ambiental. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, 2015. 102 p.

¹⁸ RESTREPO, Ana, *et al.* La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. EN: Producción + Limpia. Diciembre, 2006. Vol. 1 no. 2, p. 71.

¹⁹ PRIETO, Francisco, *et al.* Electrocoagulación: una alternativa para depuración de lacto-suero residual. EN: Revista ADIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica. Diciembre, 2012. Vol. 5 no. 3, p. 51-77.

²⁰ *Ibidem.*

sólidos formados ya que el tiempo favorece los procesos que ocurren en los electrodos como la floculación y la precipitación de dichos sólidos. Además, un tiempo mayor, produce una mayor cantidad de gas que cuando asciende, traslada las partículas de óxido en forma de espuma a la superficie, lo que facilita la formación de flóculos y su precipitación posterior.²¹

De la misma forma, los estudios reflejan que los cambios de tiempo producidos, representan una influencia en la cantidad de los sólidos obtenidos. Sin embargo, dichos cambios de tiempo son estadísticamente menos significativos que las variaciones de pH.²²

1.3.6 Material de los electrodos. La selección del material de los electrodos es un factor determinante en la eficiencia de remoción de los agentes contaminantes, ya que dependiendo del material del que estén constituidos, serán producidas las reacciones de oxidación y reducción.

De acuerdo a los resultados presentados en las referencias bibliográficas, los materiales que mejores resultados obtuvieron, corresponden al aluminio como cátodo y el hierro como ánodo.²³

Por otro lado, es fundamental la limpieza que debe hacerse a la superficie de los electrodos con el fin de eliminar la capa de óxido habitualmente formada en la superficie ya que puede disminuir de forma significativa la eficiencia del tratamiento.²⁴

²¹ AGUILAR, Edward. Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. Tesis Magíster en Ciencias Ambientales. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ingeniería Geológica y Geográfica, 2015. 102 p.

²² *Ibíd.*

²³ PANTOJA, Evelyn. Aplicación de la electrocoagulación y floculación sobre el tratamiento del drenaje ácido de minas de carbón. Tesis Ingeniería Química. Santiago de Cali: Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería Química, 2012. 41 p.

²⁴ ARBOLEDA, Juan y HERRERA, Paula. Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo Batch para la remoción de cromo hexavalente (Cr+6) con electrodos de aluminio-aluminio y de hierro-aluminio en condiciones de laboratorio. Tesis Ingeniero Ambiental. Bogotá: Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería Ambiental, 2015. 107 p.

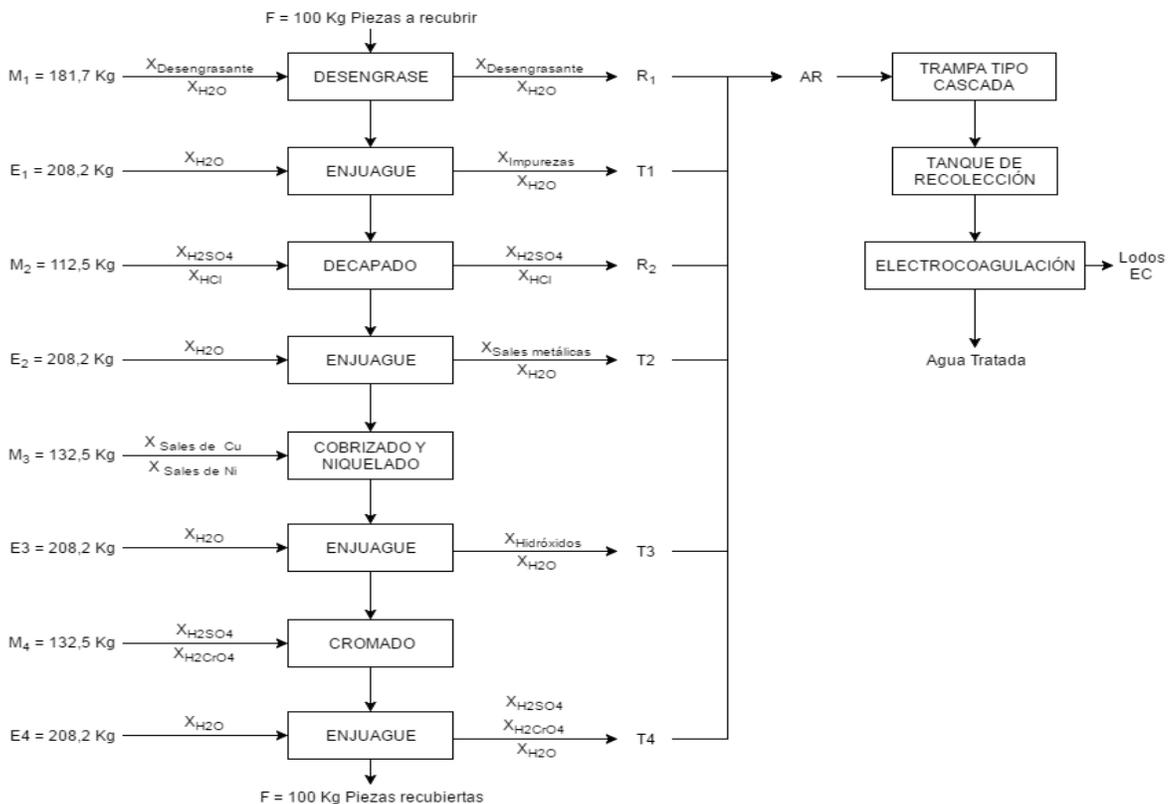
2. DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

Este capítulo describe el proceso de cromado propio de la empresa; contempla el análisis de cada una de las etapas que lo constituyen, incluyendo los agentes químicos involucrados y el balance general de masa y por componente. Además, contiene la descripción de la planta de tratamiento de agua residual con que cuenta la empresa y el papel que desempeña la electrocoagulación en el proceso.

2.1 GENERALIDADES

El proceso de cromado de la empresa Recubrimientos Galvánicos de Colombia, cuyo diagrama de proceso es evidenciado en la Figura 1, consta de ocho etapas y de una planta de tratamiento primario de agua residual ubicada al final de la línea de producción. Sin embargo, con el fin de dar cumplimiento a la normatividad vigente en materia de vertimientos, surge la electrocoagulación como una alternativa de tratamiento terciario y complementario para el efluente generado.

Figura 1. Diagrama del proceso de cromado

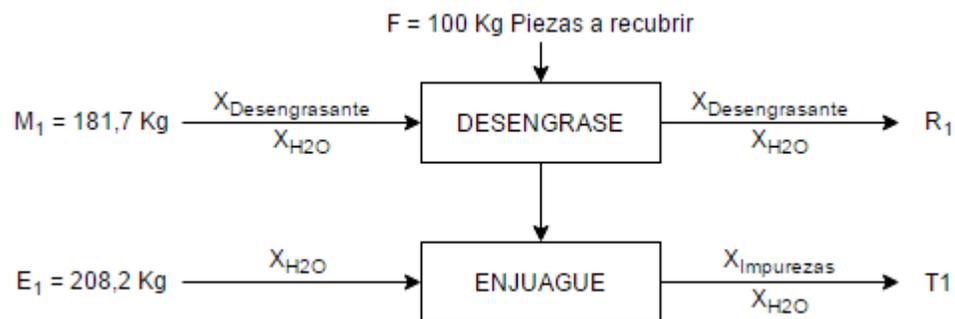


2.2 PROCESO DE DESENGRASE

El proceso de desengrase, cuyo balance de materia es descrito a partir de la Figura 2, consiste en introducir las piezas a recubrir (F), en una cuba con una solución de desengrasante ácido y agua (M_1), con el objetivo de eliminar las impurezas que contengan. Como consecuencia del proceso, surge una corriente de agua residual (R_1), obtenida del baño de desengrase agotado.

Después del desengrase, las piezas son sumergidas en una caneca plástica con agua (E_1), con el fin de eliminar cualquier contaminante que por arrastre puede contaminar la siguiente etapa del proceso. Como resultado, es producida una corriente de agua residual (T_1), compuesta por impurezas como aceites o grasas.

Figura 2. Diagrama del proceso de desengrase



Balance general:

Entrada – Salida = Acumulación

$$(M_1 + E_1) - (R_1 + T_1) = A \quad (1)$$

Balance por componente:

$$\text{Desengrasante} \rightarrow X_{\text{Desengrasante}} \cdot M_1 = X_{\text{Desengrasante}} \cdot R_1 \quad (2)$$

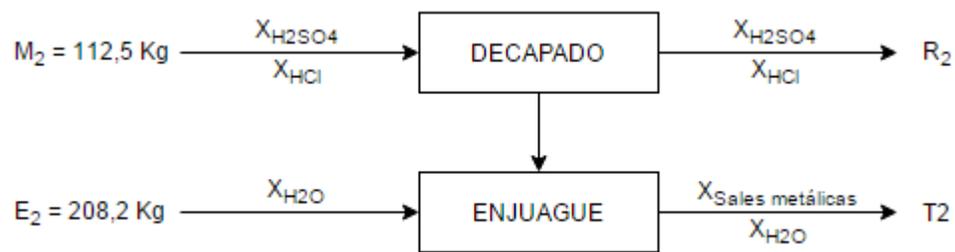
$$\text{H}_2\text{O} \rightarrow X_{\text{H}_2\text{O}} \cdot M_1 + X_{\text{H}_2\text{O}} \cdot E_1 = X_{\text{H}_2\text{O}} \cdot R_1 + X_{\text{H}_2\text{O}} \cdot T_1 \quad (3)$$

2.3 PROCESO DE DECAPADO

El proceso de decapado o desengrase electrolítico, cuyo balance de materia es descrito a partir de la Figura 3, consiste en introducir las piezas a recubrir (F), en una cuba con una solución de ácido clorhídrico y ácido sulfúrico (M_2), con el objetivo de eliminar las impurezas que aún contengan las piezas. Como consecuencia, surge una corriente de agua residual (R_2), compuesta también por ácido clorhídrico y ácido sulfúrico, obtenida del baño de decapado agotado durante el proceso.

Después del decapado, las piezas deben sumergirse nuevamente en una caneca plástica con agua (E_2), para eliminar los posibles restos de contaminantes que puedan afectar la siguiente etapa. Como resultado, surge una corriente de agua residual (T_2), compuesta por sales metálicas.

Figura 3. Diagrama del proceso de decapado



Balance general

Entrada – Salida = Acumulación

$$(M_2 + E_2) - (R_2 + T_2) = A \quad (4)$$

Balance por componente

$$H_2SO_4 \rightarrow X_{H_2SO_4} \cdot M_2 = X_{H_2SO_4} \cdot R_2 \quad (5)$$

$$HCl \rightarrow X_{HCl} \cdot M_2 = X_{HCl} \cdot R_2 \quad (6)$$

$$H_2O \rightarrow X_{H_2O} \cdot E_2 = X_{H_2O} \cdot T_2 \quad (7)$$

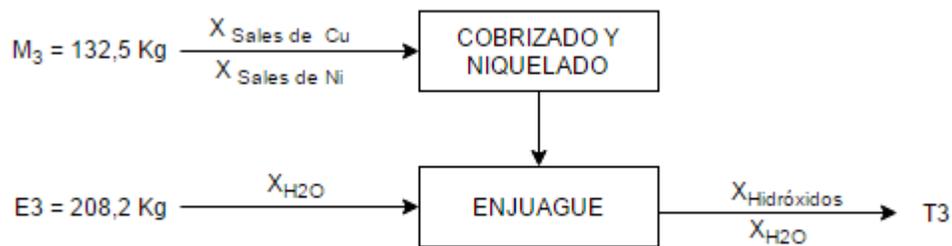
2.4 PROCESO DE COBRIZADO Y NIQUELADO

El proceso de cobrizado y niquelado, cuyo balance de materia es descrito a partir de la Figura 4, consiste en introducir las piezas (F) en una cuba con una solución (M₃), compuesta por sales de cobre y sales de níquel, con el objetivo de recubrir las piezas, no solo mejorando su apariencia física, sino con el propósito de mejorar algunas de sus propiedades.

Este proceso no genera una corriente de agua residual directa. Sin embargo, presenta pérdidas por arrastre, causadas por el traslado de las piezas de una cuba a otra y que son asociadas a la velocidad con la que el operario realiza la acción.

Una vez recubiertas, las piezas son sometidas a un enjuague en una caneca con agua (E₃), a partir del que surge una corriente de agua residual (T₃), compuesta por hidróxidos obtenidos a partir de las sales empleadas para realizar el recubrimiento.

Figura 4. Diagrama del proceso de cobrizado y niquelado



Balance general

$$\text{Entrada} - \text{Salida} = \text{Acumulación}$$

$$(M_3 + E_3) - T_3 = A \quad (8)$$

Balance por componente

$$\text{Sal de Cu} \rightarrow X_{\text{Sal Cu}} \cdot M_3 = X_{\text{Hidróxido}} \cdot T_3 \quad (9)$$

$$\text{Sal de Ni} \rightarrow X_{\text{Sal Ni}} \cdot M_3 = X_{\text{Hidróxido}} \cdot T_3 \quad (10)$$

$$\text{H}_2\text{O} \rightarrow X_{\text{H}_2\text{O}} \cdot E_3 = X_{\text{H}_2\text{O}} \cdot T_3 \quad (11)$$

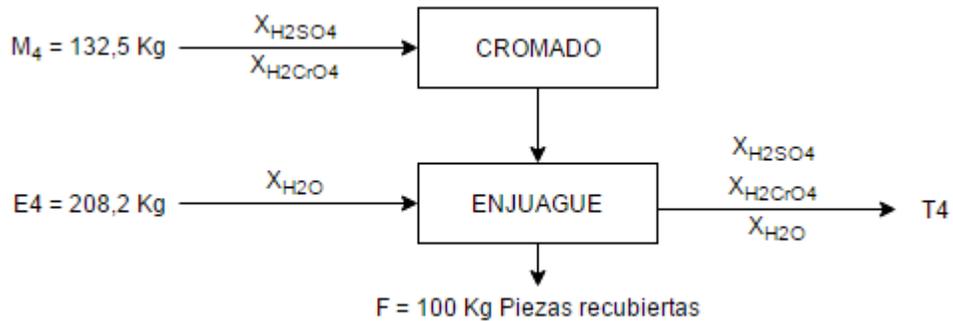
2.5 PROCESO DE CROMADO

El proceso de cromado, cuyo balance de materia es descrito a partir de la Figura 5, consiste en introducir las piezas (F) en una cuba con una solución (M₄), compuesta por ácido crómico y ácido sulfúrico, con el objetivo de recubrir las piezas, con el propósito de mejorar algunas de sus propiedades.

De la misma forma que en el proceso de cobrizado y niquelado, este proceso no genera una corriente de agua residual directa. Sin embargo, presenta pérdidas por arrastre, causadas por el traslado de las piezas de una cuba a otra y que son asociadas a la velocidad con la que el operario realiza la acción.

Una vez recubiertas, las piezas son sometidas a otro enjuague en una caneca con agua (E₄), a partir del que surge una corriente de agua residual (T₄), compuesta por trazas de ácido crómico y/o ácido sulfúrico, sustancias empleadas para llevar a cabo el recubrimiento.

Figura 5. Diagrama del proceso de cromado



Balance general

$$\begin{aligned} \text{Entrada} - \text{Salida} &= \text{Acumulación} \\ (M_4 + E_4) - T_4 &= A \end{aligned} \quad (12)$$

Balance por componente

$$H_2SO_4 \rightarrow X_{H_2SO_4} \cdot M_4 = X_{H_2SO_4} \cdot T_4 \quad (13)$$

$$H_2CrO_4 \rightarrow X_{H_2CrO_4} \cdot M_4 = X_{H_2CrO_4} \cdot T_4 \quad (14)$$

$$H_2O \rightarrow X_{H_2O} \cdot E_4 = X_{H_2O} \cdot T_4 \quad (15)$$

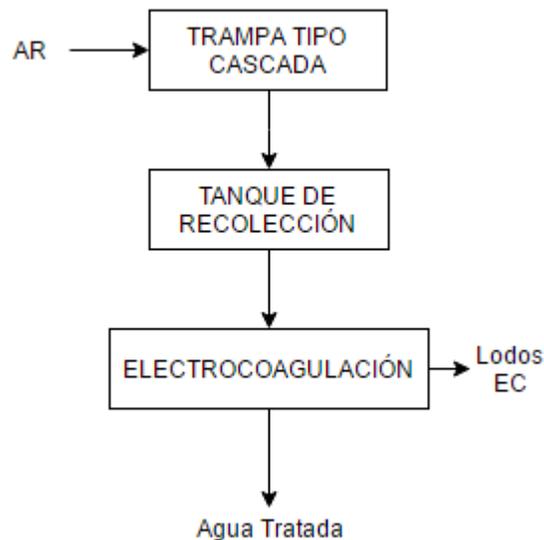
2.6 PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

Las corrientes de aguas residuales generadas a partir de cada una de las ocho etapas que hacen parte del proceso de producción, sin tener en cuenta el tipo de contaminante que contienen, son depositadas en un sistema de rejillas ubicadas en el piso de toda el área de producción de la planta.

A medida que avanza el proceso, las aguas residuales son arrastradas por un sistema de canaletas hasta una trampa tipo cascada como parte del tratamiento primario, con la que son removidos residuos sólidos de gran tamaño, grasas y aceites.

Una vez el agua residual ha pasado a través de la trampa, es depositada en un tanque de recolección, como indica el diagrama evidenciado en la Figura 6.

Figura 6. Diagrama del tratamiento de aguas residuales



Finalmente, el agua residual acumulada en el tanque, cumple con las especificaciones establecidas para continuar con un tratamiento complementario y de tipo terciario como la electrocoagulación, con el cual pueden removerse los agentes contaminantes presentes y por consiguiente dar cumplimiento a la normatividad vigente en materia de vertimientos, que permite que su disposición final puede realizarse en el sistema de alcantarillado público de la ciudad.

3. ELECTROCOAGULACIÓN

Este capítulo hace una descripción del proceso de electrocoagulación, los sub-procesos que lo constituyen, las reacciones que lo caracterizan y el análisis de los reactores en los que puede llevarse a cabo. Además, contempla el diseño del sistema de electrocoagulación propio para el caso de estudio, haciendo énfasis en el dimensionamiento de la celda, los electrodos, la fuente regulable de voltaje y los equipos complementarios a emplear durante el proceso.

3.1 GENERALIDADES

Durante el proceso de electrocoagulación, ocurren una serie de fenómenos físicos y químicos, que permiten lograr la remoción de los contaminantes, y que inician con la inducción de corriente eléctrica al agua residual a través de un par de electrodos²⁵, con el fin de generar un diferencial de potencial entre ellos para provocar las reacciones redox dentro de las que a su vez ocurren dos sub-procesos:

a. Reducción en el cátodo

Es el proceso en el que ocurre la conversión de los protones del agua en hidrógeno. Durante este proceso la placa que cumple la función de cátodo permanece intacta sin disolverse.²⁶

b. Oxidación en el ánodo

Es el proceso en el que ocurre la generación del ion Al^{3+} en el caso en el que el ánodo sea aluminio. Los iones metálicos son proporcionados por el ánodo o electrodo de sacrificio, debido a que durante el proceso sucede la disolución de la placa metálica.²⁷

Luego, los iones generados son los encargados de desestabilizar las cargas que contienen las partículas de los contaminantes presentes en el agua, que una vez neutralizadas, hacen que las partículas en suspensión cedan y formen los flóculos de contaminante que luego coagulan.

²⁵ ARANGO, Álvaro. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. EN: Revista Lasallista de Investigación. Enero, 2005. Vol. 2 no. 1, p. 59.

²⁶ RESTREPO, Ana, *et al.* La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. EN: Producción + Limpia. Diciembre, 2006. Vol. 1 no. 2, p. 65.

²⁷ *Ibidem.*

De igual forma, los iones producidos por los electrodos, desencadenan la eliminación de los contaminantes, que puede darse por reacciones químicas y precipitación o por procesos físicos de agregación de coloides que pueden flotar o precipitar, teniendo en cuenta su densidad.²⁸

Entonces, de acuerdo a lo expuesto, el proceso de electrocoagulación consta de tres etapas fundamentales: formación del coagulante por oxidación electrolítica del metal que constituye el ánodo; desestabilización de los contaminantes y emulsionantes; y formación de flóculos por agregación de partículas del contaminante en el coagulante.²⁹

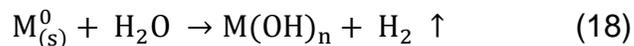
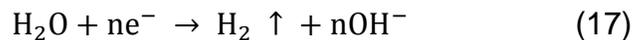
3.2 REACCIONES EN EL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN

Las reacciones de óxido reducción incluidas en los procesos de reducción en el cátodo y oxidación en el ánodo, que ocurren en el interior de la celda electroquímica³⁰ corresponden a:

Oxidación (Ánodo):

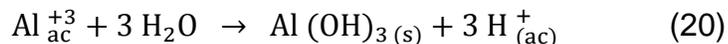
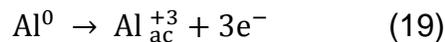


Reducción (Cátodo):



Donde M^0 corresponde al metal o electrodo metálico.

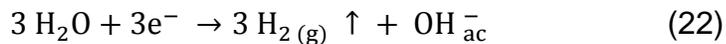
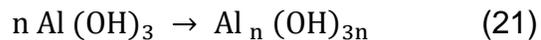
Cuando el ánodo o electrodo de sacrificio es una lámina de aluminio (Al), las reacciones no espontaneas que se producen son:



²⁸ *Ibíd.*

²⁹ GILPAVAS, Edison. Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales. EN: Cuadernos de Investigación. Julio, 2008. No. 65, p. 6.

³⁰ RESTREPO, Ana, *et al.* La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. EN: Producción + Limpia. Diciembre, 2006. Vol. 1 no. 2, p. 67.



A partir de las reacciones redox, son producidos los iones responsables de la desestabilización de las cargas de los contaminantes presentes en el agua. Una vez las cargas hayan sido neutralizadas y los sistemas que mantienen las partículas en suspensión desaparezcan, ocurre la formación de agregados que inician el proceso de coagulación que permite su remoción.³¹

Por otro lado, los gases generados por los electrodos durante el proceso, que ascienden a la superficie de la solución, desencadenan a su vez una serie de fenómenos que corresponden a:

a. Proceso de auto-limpieza

Debido a la velocidad de flujo generada, los gases resultantes del proceso provocan una fuerza de arrastre que es capaz de remover los coloides alojados en los electrodos.³²

b. Proceso de aceleración de la mezcla

La presencia de gases generados en el proceso, produce corrientes que ascienden y descienden de la solución generando un mayor contacto entre los coágulos formados, razón por la que en el proceso se emplea agitación espontánea y no mecánica.³³

c. Separación entre fases (clarificado – lodo)

Es un proceso que puede realizarse por separación clásica o de la misma forma mediante electro-flotación ya que los flóculos se saturan de gas generado a partir de la electrolisis propia del proceso.³⁴

³¹ RESTREPO, Ana, *et al.* La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. EN: Producción + Limpia. Diciembre, 2006. Vol. 1 no. 2, p. 67.

³² JARAMILLO, Xavier. Diseño y construcción de un reactor de electrocoagulación para el estudio de tratamiento de agua residual de tintura y acabado textil. Tesis Ingeniero Textil. Ibarra: Universidad Técnica del Norte. Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, 2012. 136 p.

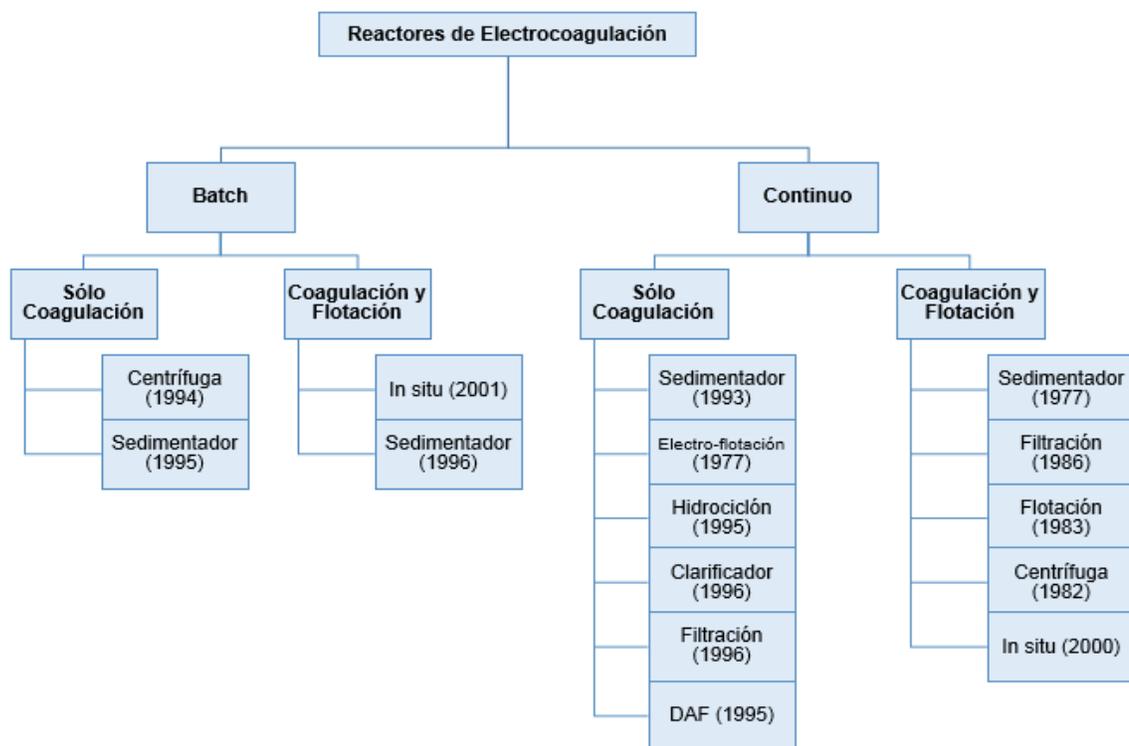
³³ *Ibidem.*

³⁴ *Ibidem.*

3.3 REACTORES PARA PROCESOS DE ELECTROCOAGULACIÓN

Los reactores para el proceso de electrocoagulación pueden clasificarse como es evidenciado en la Figura 7, según el tipo de operación en: reactores tipo batch y reactores de tipo continuo, cuya selección depende de las características del contaminante y la cantidad de agua a tratar. Además, existe una clasificación secundaria, según la función de flotación, que corresponde a: reactores de coagulación que son aquellos que no separan el contaminante del medio a través de las burbujas generadas en el proceso, y reactores de coagulación y flotación que por el contrario, integran la flotación en su diseño para favorecer la separación del contaminante del efluente³⁵.

Figura 7. Clasificación de reactores para procesos de electrocoagulación



Fuente: HOLT, Peter, et al. The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology EN: Chemosphere. August 2005. Vol. 59 no. 3, p. 358.

³⁵ AGUILAR, Edward. Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. Tesis Magíster en Ciencias Ambientales con Mención en Control de la Contaminación y Ordenamiento Ambiental. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, 2015. 102 p.

3.3.1 Reactor tipo Batch. El reactor discontinuo o tipo batch, es un reactor de operación simple, que trabaja con un volumen establecido, de bajo costo, y empleado para el tratamiento localizado de aguas residuales. Sin embargo, la mayor desventaja que presenta, es que sus condiciones pueden variar con el tiempo.³⁶

El reactor tipo batch aplicado al proceso de electrocoagulación en su forma más simple, está compuesto por una celda electroquímica con un par de electrodos dispuestos en forma vertical y conectados a una fuente externa de energía.

Durante el proceso, el ánodo sufre un proceso de corrosión debido a la oxidación, mientras que el cátodo permanece pasivo.³⁷

Es importante mencionar que no es recomendable emplear un sistema conformado por un solo par de electrodos, ya que con el fin de obtener una disolución efectiva del metal, es necesario tener un área superficial amplia mediante el aumento del número de electrodos que pueden ser mono-polares que pueden conectarse a su vez en serie o en paralelo, o bipolares.³⁸

3.3.1.1 Electrodos mono-polares. Los electrodos mono-polares son sometidos al mismo diferencial de potencial y por lo tanto, un proceso de electrocoagulación con este tipo de electrodos requiere un mayor gasto de energía.³⁹

En este caso, los electrodos pueden estar conectados en serie como indica la Figura 8, en donde los electrodos de sacrificio están conectados uno con otro y no con los electrodos de los extremos; o en paralelo como indica la Figura 9, en donde la corriente eléctrica es distribuida en cada uno de los electrodos, teniendo en cuenta la resistencia que opone cada uno de ellos.⁴⁰

³⁶ RESTREPO, Ana, *et al.* La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. EN: Producción + Limpia. Diciembre, 2006. Vol. 1 no. 2, p. 68.

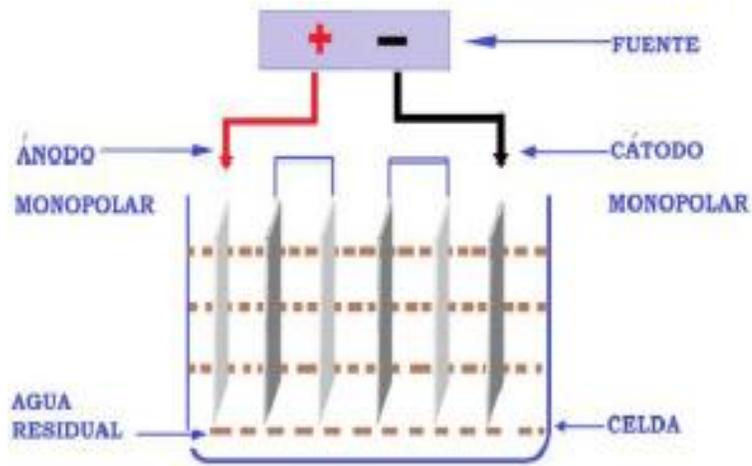
³⁷ *Ibíd.*

³⁸ ARANGO, Álvaro. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. EN: Revista Lasallista de Investigación. Enero, 2005. Vol.2 no. 1, p. 51

³⁹ AGUILAR, Edward. Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio. Tesis Magíster en Ciencias Ambientales. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, 2015. 102 p.

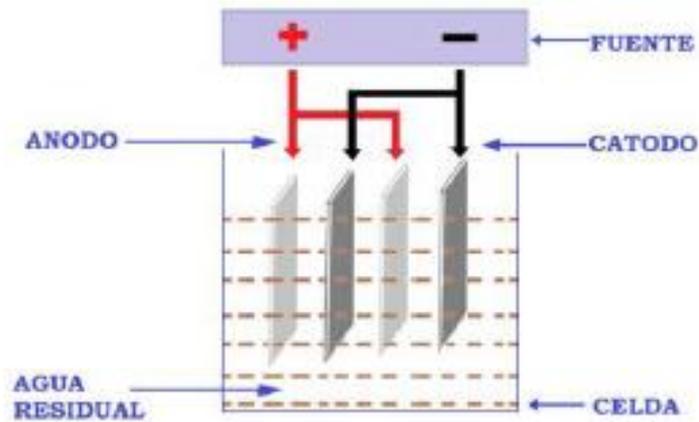
⁴⁰ *Ibíd.*

Figura 8. Reactor tipo batch con electrodos mono-polares en serie



Fuente: MOLLAH, M. Electrocoagulation (EC) – science and applications. EN: Journal of Hazardous Materials. 2001. Vol. 84 no. 1, p. 33.

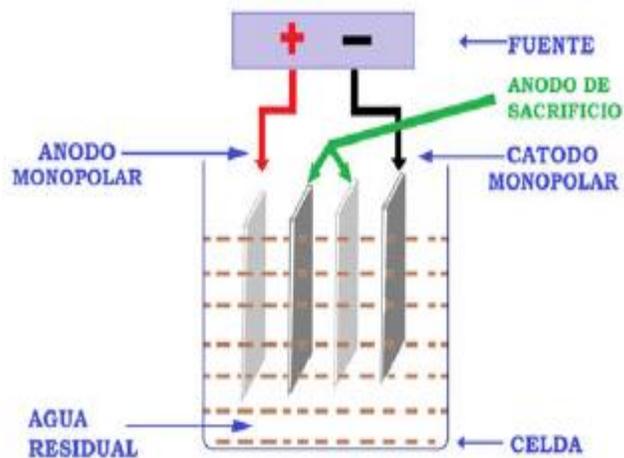
Figura 9. Reactor tipo batch con electrodos mono-polares en paralelo



Fuente: MOLLAH, M. Electrocoagulation (EC) – science and applications. EN: Journal of Hazardous Materials. 2001. Vol. 84 no. 1, p. 32.

3.3.1.2 Electrodo bipolar. El reactor para electrocoagulación con electrodos bipolares, requiere una menor intensidad, pero un voltaje mayor que en el caso anterior. Su disposición es relativamente sencilla, dado que solo es necesaria la conexión de un par de electrodos alimentadores, que puede reducir la distancia que debe existir entre los electrodos para el proceso, como lo indica la Figura 10.⁴¹

Figura 10. Reactor tipo batch con electrodos bipolares



Fuente: MOLLAH, M. Electrocoagulation (EC) – science and applications. EN: Journal of Hazardous Materials. 2001. Vol. 84 no. 1, p. 32.

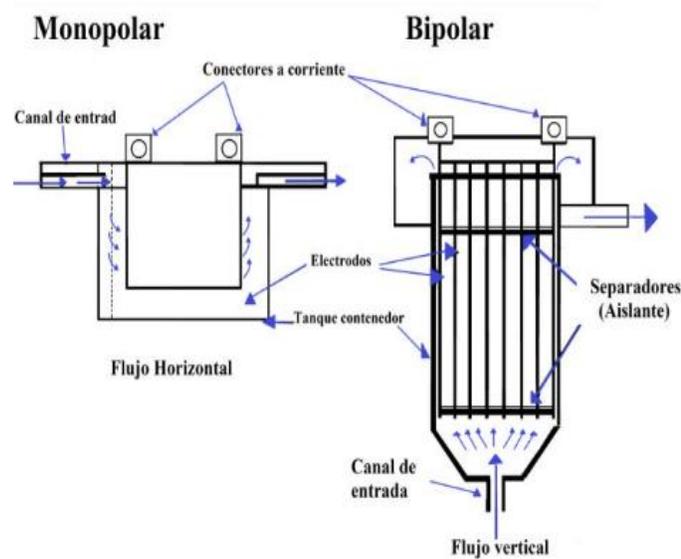
3.3.2 Otros tipos de reactores. Existen además otros tipos de reactores para el proceso de electrocoagulación, que incluyen los reactores de flujo tanto vertical como horizontal, reactor tipo filtro prensa, el reactor de electrodo cilíndrico rotativo y el reactor de lecho fluidizado, que son descritos a continuación.

⁴¹ AGUILAR, Edward. Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio. Tesis Magíster en Ciencias Ambientales. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, 2015. 102 p.

3.3.2.1 Reactores de flujo. Los reactores según el tipo de flujo pueden clasificarse a su vez, en unidades de flujo horizontal y unidades de flujo vertical. La selección de alguno de ellos incide en el aprovechamiento del movimiento de las moléculas de oxígeno e hidrógeno generados por los procesos redox llevados a cabo en el ánodo y el cátodo.⁴²

Además, en función de la circulación del agua a través de los electrodos, pueden diseñarse celdas de un solo canal como corresponde a la Figura 11; o de canales múltiples que son de fácil operación, pero que debido al bajo caudal que manejan, pueden favorecer que los electrodos permanezcan inertes y no realicen su función dentro del proceso.⁴³

Figura 11. Reactor de flujo horizontal y flujo vertical



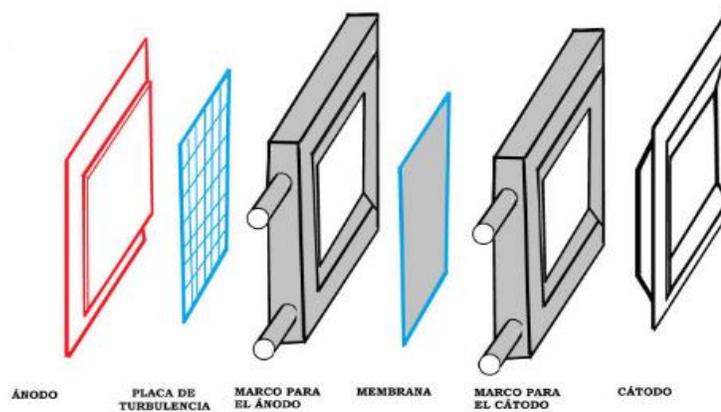
Fuente: CHEN, Guohua. Electrochemical technologies in wastewater treatment EN: Separation and Purification Technology. Octubre, 2004. Vol.38 no. 1, p. 14

⁴² CHEN, Guohua. Electrochemical technologies in wastewater treatment EN: Separation and Purification Technology. Octubre, 2004. Vol.38 no. 1, p. 14

⁴³ *Ibíd.*

3.3.2.2 Reactor filtro prensa. El reactor filtro prensa está constituido por un par de marcos: en el primero está soportado el ánodo y en el segundo el cátodo, ambos en forma de placas, formando una cámara como indica la Figura 12.

Figura 12. Reactor tipo filtro prensa



Fuente: CHEN, Guohua. Electrochemical technologies in wastewater treatment EN: Separation and Purification Technology. Octubre, 2004. Vol.38 no. 1, p. 13

El agua residual a tratar, entra por la parte lateral de la cámara y es inducida a un flujo turbulento para que aumente la eficiencia del proceso, además de ser un reactor de fácil operación y mantenimiento.⁴⁴

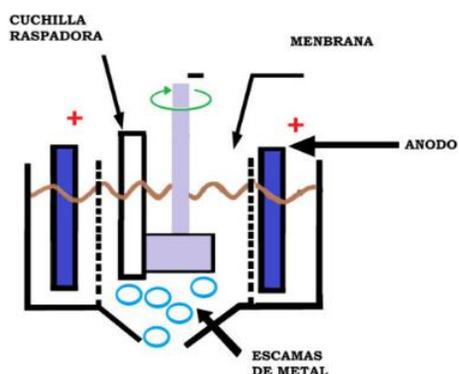
3.3.2.3 Reactor de electrodo cilíndrico rotativo. Para la remoción de metales, también puede emplearse el reactor de electrodo cilíndrico rotativo, en donde el cátodo gira en el centro de la celda mientras que el ánodo permanece fijo como muestra la Figura 13.

Esta disposición dentro del reactor, aumenta la transferencia de masa entre los electrodos y facilita la remoción de las partículas del contaminante acumuladas en el cátodo.⁴⁵

⁴⁴ RESTREPO, Ana, *et al.* La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. EN: Producción + Limpia. Diciembre, 2006. Vol. 1 no. 2, p. 69.

⁴⁵ ARANGO, Álvaro. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. EN: Revista Lasallista de Investigación. Enero, 2005. Vol.2 no. 1, p. 52

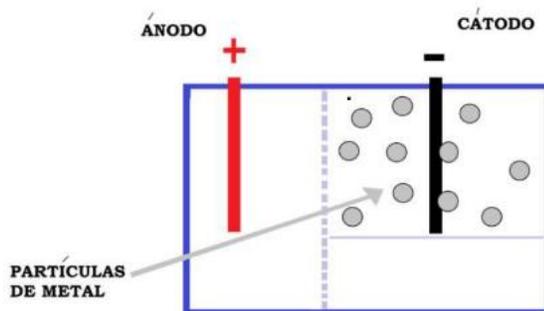
Figura 13. Reactor de electrodo cilíndrico rotativo



Fuente: CHEN, Guohua. Electrochemical technologies in wastewater treatment EN: Separation and Purification Technology. Octubre, 2004. Vol.38 no. 1, p. 13

3.3.2.4 Reactor de lecho fluidizado. Es un tipo de reactor empleado para la remoción de metales, en donde el lecho fluidizado permite aumentar el área superficial, que puede favorecer la eficiencia del proceso de electrocoagulación como indica la Figura 14. Este tipo de reactor emplea materiales dimensionalmente estables como acero, titanio o aluminio para el ánodo, y metales, grafito o fibras de carbón para el cátodo.⁴⁶

Figura 14. Reactor de lecho fluidizado



Fuente: CHEN, Guohua. Electrochemical technologies in wastewater treatment EN: Separation and Purification Technology. Octubre, 2004. Vol.38 no. 1, p. 13

⁴⁶ RESTREPO, Ana, *et al.* La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. EN: Producción + Limpia. Diciembre, 2006. Vol. 1 no. 2, p. 69.

3.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN

La configuración del sistema de electrocoagulación es un factor determinante en la efectividad de remoción de los agentes contaminantes presentes en cualquier tipo de efluente. Por lo tanto, es necesario tener en cuenta algunos aspectos relacionados con el diseño de la celda electroquímica, la geometría de los electrodos, el material que los constituye, la distancia que los separa, el número de electrodos, entre otros, que contribuirán a la obtención de mejores resultados.⁴⁷

3.4.1 Celda de electrocoagulación. La celda de electrocoagulación también conocida como cuba electrolítica, fundamenta su diseño en la distribución volumétrica indicada en la Figura 15, que contempla tres zonas:

- a. Zona superior o zona de flotación para depositar los lodos de flotación o los lodos de menor densidad.⁴⁸
- b. Zona media o zona de reacción en la que están sumergidos los electrodos y donde ocurre el proceso de electrocoagulación propiamente dicho.⁴⁹
- c. Zona inferior o zona de sedimentación en donde sedimentan los lodos de precipitación o lodos más densos.⁵⁰

Con base en lo anterior y en los resultados obtenidos en estudios con efluentes similares, que obtuvieron porcentajes de remoción superiores al 95%, Arboleda y Herrera: "Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo Batch para la remoción de cromo hexavalente (Cr^{+6})"⁵¹; el diseño de la celda para este caso, consta de un paralelepípedo rectangular de 11 cm de ancho, 14 cm de largo y 18 cm de alto, fabricado en vidrio de 5 mm de espesor, con el fin de que sea posible observar de forma clara, los cambios que ocurren en el proceso.

⁴⁷ RESTREPO, Ana, *et al.* La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. EN: Producción + Limpia. Diciembre, 2006. Vol. 1 no. 2, p. 69

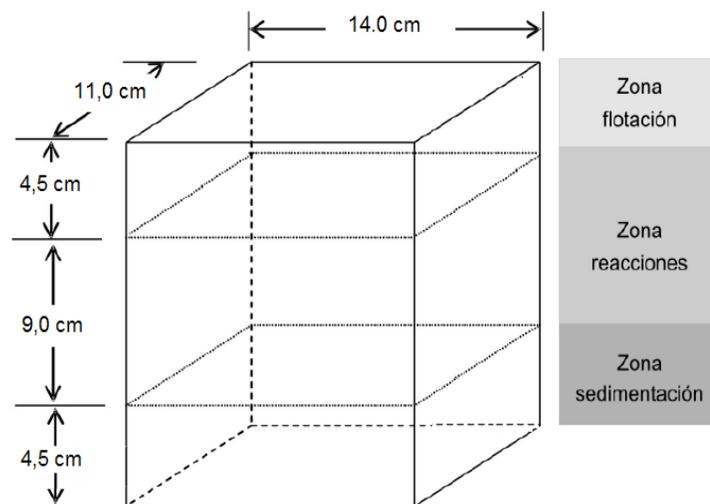
⁴⁸ ARANGO, Álvaro y GARCÉS, Luis. Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. EN: Revista Universidad EAFIT. Julio, 2007. Vol. 43, no 147, p. 61.

⁴⁹ *Ibídem.*

⁵⁰ *Ibídem.*

⁵¹ ARBOLEDA, Juan y HERRERA, Paula. Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo Batch para la remoción de cromo hexavalente (Cr^{+6}) con electrodos de aluminio-aluminio y de hierro-aluminio en condiciones de laboratorio. Tesis Ingeniero Ambiental. Bogotá: Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería Ambiental, 2015. 107 p.

Figura 15. Dimensiones de la celda de electrocoagulación



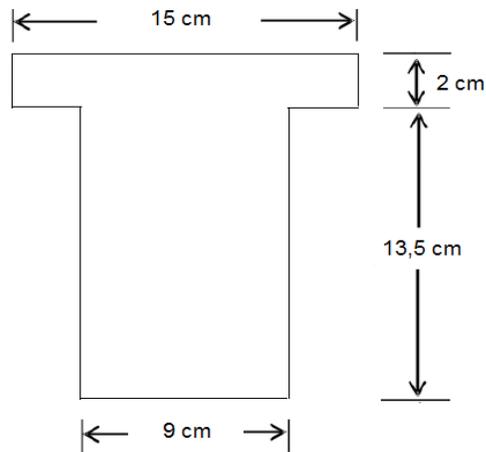
Fuente: ARANGO, Álvaro y GARCÉS, Luis. Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. EN: Revista Universidad EAFIT. Julio, 2007. Vol. 43, no 147, p. 62.

3.4.2 Geometría de los electrodos. Los electrodos corresponden a estructuras fundamentales en el proceso de electrocoagulación, ya que a partir de ellos ocurren las reacciones propias del proceso.

Con base en la información suministrada por estudios similares, que reportan un porcentaje de remoción superior al 95%, Arboleda y Herrera: “Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo Batch para la remoción de cromo hexavalente (Cr^{+6}) con electrodos de aluminio-aluminio y de hierro-aluminio en condiciones de laboratorio”⁵²; y a la disponibilidad en el mercado, los electrodos para el caso de estudio, son placas metálicas en forma de “T”, de 9 cm de ancho, 13,5 cm de largo y 0,1 cm de espesor, con una pestaña de 2 cm de ancho y 15 cm de largo, para que puedan sujetarse a la celda como indica la Figura 16.

⁵² ARBOLEDA, Juan y HERRERA, Paula. Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo Batch para la remoción de cromo hexavalente (Cr^{+6}) con electrodos de aluminio-aluminio y de hierro-aluminio en condiciones de laboratorio. Tesis Ingeniero Ambiental. Bogotá: Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería Ambiental, 2015. 107 p.

Figura 16. Dimensiones de los electrodos



3.4.3 Material de los electrodos. La selección del material que constituye los electrodos está basada en tres aspectos fundamentales: la disponibilidad de los metales en el mercado, el costo de fabricación y la información bibliográfica disponible, que evidencia mejores porcentajes de remoción empleando determinados materiales, y que además son los más empleados en proceso de electrocoagulación.⁵³

Teniendo en cuenta lo anterior y el reporte del porcentaje de remoción superior al 95%, Arboleda y Herrera: “Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo Batch para la remoción de cromo hexavalente (Cr+6) con electrodos de aluminio-aluminio y de hierro-aluminio en condiciones de laboratorio”⁵⁴; los materiales que constituyen los electrodos para este caso corresponden a aluminio en el caso del ánodo, y a hierro en el caso del cátodo.

⁵³ ARANGO, Álvaro y GARCÉS, Luis. Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. EN: Revista Universidad EAFIT. Julio, 2007. Vol. 43, no 147, p. 57-58.

⁵⁴ ARBOLEDA, Juan y HERRERA, Paula. Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo Batch para la remoción de cromo hexavalente (Cr+6) con electrodos de aluminio-aluminio y de hierro-aluminio en condiciones de laboratorio. Tesis Ingeniero Ambiental. Bogotá: Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería Ambiental, 2015. 107 p.

3.4.4 Distancia entre los electrodos. La distancia entre los electrodos es determinada con base en los resultados obtenidos en fuentes bibliográficas como Aguilar: “Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua”⁵⁵, que indica que los mejores resultados son obtenidos a una distancia de 1 cm, dado que a distancias superiores, el proceso es extenso y que pueden presentarse atascamientos en la superficie de los electrodos y que a distancias inferiores, no ocurren cambios significativos comparados con los resultados obtenidos a 1 cm.

Con base en lo anterior, y con el fin de mantener la distancia entre electrodo y electrodo, es necesaria la construcción de una estructura de madera en forma de marco cuadrado, de 14 cm de ancho y 17 cm de largo, con ranuras de 0,1 cm de espesor, para que los electrodos sean soportados y separados a la distancia establecida.

3.4.5 Número de electrodos. El número de electrodos empleados para el proceso de electrocoagulación, es determinado en función del ancho de la celda, la distancia entre los electrodos de los extremos y las paredes de la celda (determinada con el fin de disponer los electrodos en la parte central de la celda), la separación entre dichos electrodos y el espesor de la cada uno de ellos, mediante la siguiente ecuación⁵⁶.

$$\text{Número electrodos} = \frac{(\text{ancho celda}) - 2 (\text{dist. electrodos cara lateral})}{(\text{dist. entre electrodos} + \text{espesor placa})} \quad (23)$$

$$\text{Número electrodos} = \frac{(11 \text{ cm}) - 2 (2 \text{ cm})}{(1 \text{ cm} + 0,1 \text{ cm})}$$

$$\text{Número electrodos} = 6$$

⁵⁵ AGUILAR, Edward. Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. Tesis Magíster en Ciencias Ambientales con Mención en Control de la Contaminación y Ordenamiento Ambiental. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, 2015. 102 p.

⁵⁶ ARANGO, Álvaro y GARCÉS, Luis. Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. EN: Revista Universidad EAFIT. Julio, 2007. Vol. 43, no 147, p. 56

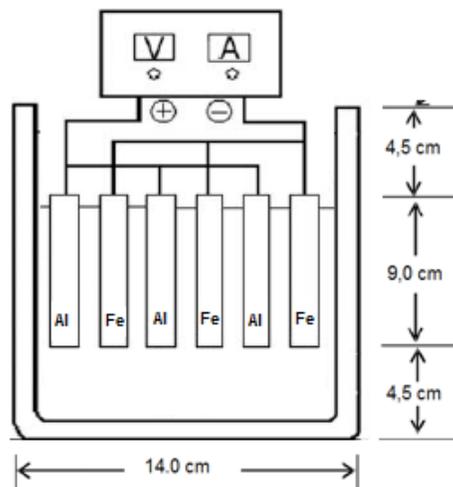
3.4.6 Fuente regulable de voltaje. La fuente de voltaje o fuente de alimentación, empleada en el proceso de electrocoagulación, es una fuente regulada de corriente continua (DC), con un rango de voltaje entre 0 y 30 voltios y con un rango de intensidad de corriente entre 0 y 3 amperios; variables que pueden ser monitoreados con medidores digitales de voltaje y amperaje respectivamente.

Por otro lado, con el fin de suministrar corriente a los electrodos en el interior de la celda, son empleados cables de tipo eléctrico con pinzas en los extremos, que conectan la fuente a cada uno de los electrodos soportados en la celda.

3.4.7 Equipos complementarios A medida que avanza el proceso de electrocoagulación, deben emplearse equipos complementarios: un multímetro para verificar las mediciones de voltaje y amperaje suministradas por la fuente de alimentación a la celda; un pH-metro empleado para medir no solo el pH sino también la temperatura del agua residual; y un sensor de conductividad.

Con base en los apartados anteriores, el sistema de electrocoagulación diseñado para el caso particular de tratamiento de aguas residuales del proceso de cromado propio de la empresa, corresponde al evidenciado en la Figura 17.

Figura 17. Configuración final del sistema de electrocoagulación



4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados de la evaluación del proceso de electrocoagulación aplicado al agua residual objeto de estudio, comprenden los resultados de la caracterización del efluente así como sus condiciones previas al tratamiento; y los resultados de la electrocoagulación propiamente dicha, que incluye el comportamiento de cada una de las variables medidas: pH, temperatura, conductividad, voltaje, intensidad de corriente y concentración de cromo total; a lo largo del tratamiento.

4.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

4.1.1 Metodología. El agua residual seleccionada para el desarrollo de la investigación, es un efluente proveniente del proceso de cromado de la empresa Recubrimientos Galvánicos de Colombia.

La muestra es obtenida del tanque de recolección ubicado al final de la línea de producción de la planta, haciendo uso de un recipiente plástico para recolectar la muestra directamente del caudal y luego depositarla en la celda electrolítica diseñada para el proyecto, cuyo volumen ocupado es de 2,2 L.

4.1.2 Variables y método. Con el fin de establecer las condiciones iniciales del agua residual generada por el proceso de cromado, es necesario determinar: el pH y la temperatura de la muestra haciendo uso de un sensor de pH con indicador de temperatura, introduciéndolo directamente en el recipiente que contiene la muestra; y la conductividad que de la misma forma que el pH, debe determinarse directamente en el recipiente a través de un sensor de conductividad.

Además, debe determinarse la concentración de cromo total presente, que para el caso particular del proyecto, consiste en la recolección de una alícuota de 250 ml de agua residual en un recipiente de vidrio con ácido nítrico como conservante, suministrado por el laboratorio ANALQUIM, Ltda., encargado de realizar la determinación de dicho parámetro a través de la técnica analítica de absorción atómica de llama con número de referencia SM 31111 B.

4.1.3 Resultados. Con base en la información anterior, la Tabla 3 corresponde a las condiciones iniciales del efluente objeto de estudio.

Tabla 3. Condiciones iniciales del efluente

Parámetro	Unidades	Resultado
pH	-	3,0
Conductividad	mS/cm	2,0
Temperatura	°C	18
Concentración de Cr total	mg/L	346

Fuente: Laboratorio ANALQUIM Ltda.

4.2 ANÁLISIS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN

4.2.1 Metodología. Las pruebas propias del proceso de electrocoagulación para el caso particular en desarrollo, consisten en la evaluación del comportamiento de la temperatura: el pH; la conductividad y la concentración de cromo total, durante un tiempo de tratamiento de 35 minutos, determinado como el tiempo promedio empleado en las referencias bibliográficas con efluentes similares; con la variación de 3 intensidades de corriente que corresponden a la aplicación de 10, 20 y 30 V al sistema.

La realización de cada una de las tres pruebas es desarrollada en primera instancia con la aplicación del voltaje establecido para cada una de ellas, en el tiempo 0, a las condiciones descritas en el apartado anterior.

A medida que avanza el proceso, cada cinco minutos medidos con cronómetro y haciendo uso de una manguera plástica instalada en el interior de la celda, es extraída una muestra de agua residual de 250 ml, con la que son determinadas los valores para cada una de las variables mencionadas, con el fin de establecer su comportamiento a lo largo del proceso.

Posteriormente la muestra es depositada en un recipiente de vidrio proporcionado por el laboratorio ANALQUIM Ltda., con el fin de determinar la concentración de cromo total para cada tiempo medido.

4.2.2 Resultados

4.2.2.1 **pH.** La variación del pH con respecto al tiempo obtenida para el agua residual particular, presenta un comportamiento ascendente a lo largo del proceso como indican los resultados mostrados en la Tabla 4 y su respectivo comportamiento descrito en la Gráfica 1. Según Arango⁵⁷, debido a que la muestra es de naturaleza ácida con un pH inicial de 3,0, puede atribuirse su aumento a la reacción del hidrógeno que ocurre en el cátodo y que se indica a continuación.

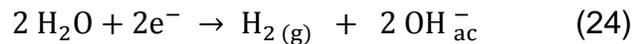
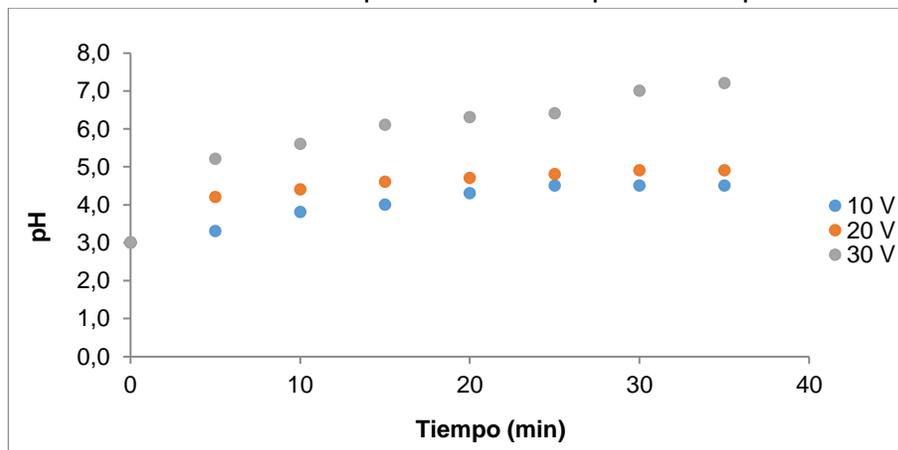


Tabla 4. Variación del pH con respecto al tiempo

Voltaje (V)	10 V	20 V	30 V
Tiempo (min)			
0	3,0	3,0	3,0
5	3,3	4,2	5,2
10	3,8	4,4	5,6
15	4,0	4,6	6,1
20	4,3	4,7	6,3
25	4,5	4,8	6,4
30	4,5	4,9	7,0
35	4,5	4,9	7,2

Gráfica 1. Comportamiento del pH vs tiempo



⁵⁷ ARANGO, Álvaro. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. EN: Revista Lasallista de Investigación. Enero, 2005. Vol. 2 no. 1, p. 53.

4.2.2.2 **Temperatura.** Con el respecto a la temperatura, la Tabla 5 indica los resultados obtenidos para los tres ensayos realizados, a partir de una temperatura inicial de 18,0 °C. Dichos resultados presentan un comportamiento ascendente como indica la Gráfica 2, que corresponde a la tendencia esperada, con base en la información suministrada por las fuentes bibliográficas.

Según Arboleda y Herrera, el comportamiento ascendente que presentan los resultados, puede deberse a que gran parte de la energía suministrada al sistema, es transformada en energía térmica acumulada.⁵⁸

Por su parte, Arango⁵⁹ establece que la temperatura favorece la destrucción de la película de óxido formada en el electrodo y que representa un aumento considerable en la eficiencia del proceso.

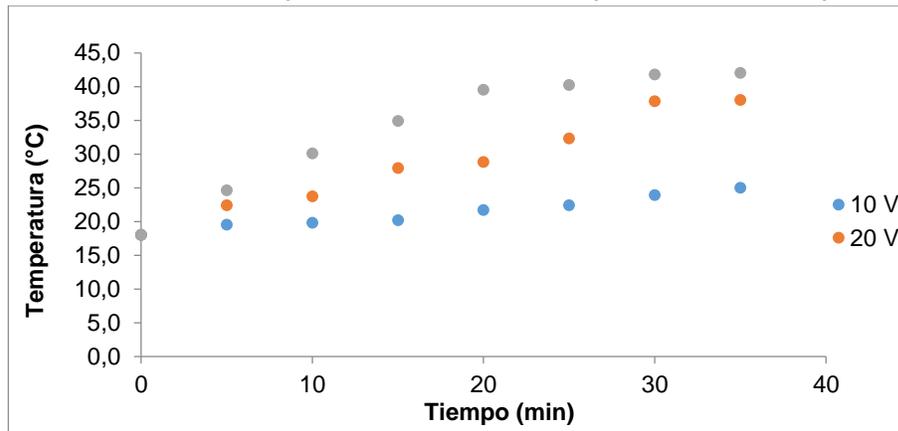
Tabla 5. Variación de la temperatura con respecto al tiempo

Voltaje (V)	10 V	20 V	30 V
Tiempo (min)	Temperatura (°C)		
0	18,0	18,0	18,0
5	19,5	22,4	24,6
10	19,8	23,7	30,1
15	20,2	27,9	34,9
20	21,7	28,8	39,5
25	22,4	32,3	40,2
30	23,9	37,8	41,8
35	25,0	38,0	42,0

⁵⁸ ARBOLEDA, Juan y HERRERA, Paula. Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo Batch para la remoción de cromo hexavalente (Cr+6). Tesis Ingeniero Ambiental. Bogotá: Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería Ambiental, 2015. 107 p.

⁵⁹ ARANGO, Álvaro. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. EN: Revista Lasallista de Investigación. Enero, 2005. Vol. 2 no. 1, p. 53.

Gráfica 2. Comportamiento de la temperatura vs tiempo



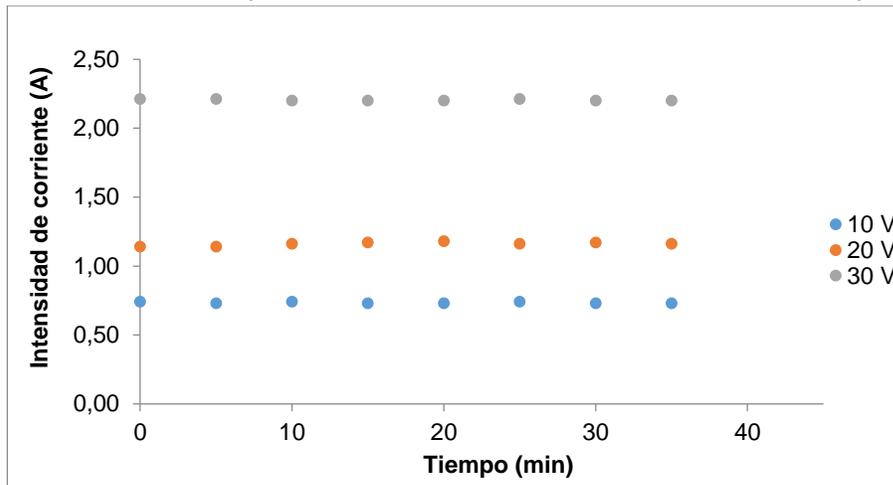
4.2.2.3 Intensidad de corriente. Debido a que el voltaje aplicado para cada una de las tres pruebas del proceso a desarrollar, mantiene un valor constante de 10, 20 y 30 voltios respectivamente, la intensidad de corriente no presenta variaciones significativas como evidencia la Tabla 6.

De la misma forma, el comportamiento de intensidad de corriente con respecto al tiempo no presenta variación importante como indica la Gráfica 3.

Tabla 6. Variación de la intensidad de corriente con respecto al tiempo

Voltaje (V)	10 V	20 V	30 V
Tiempo (min)	Intensidad de corriente (A)		
0	0,74	1,14	2,21
5	0,73	1,14	2,21
10	0,74	1,16	2,20
15	0,73	1,17	2,20
20	0,73	1,18	2,20
25	0,74	1,16	2,21
30	0,73	1,17	2,20
35	0,73	1,16	2,20
Promedio	0,73	1,16	2,20

Gráfica 3. Comportamiento intensidad de corriente vs tiempo

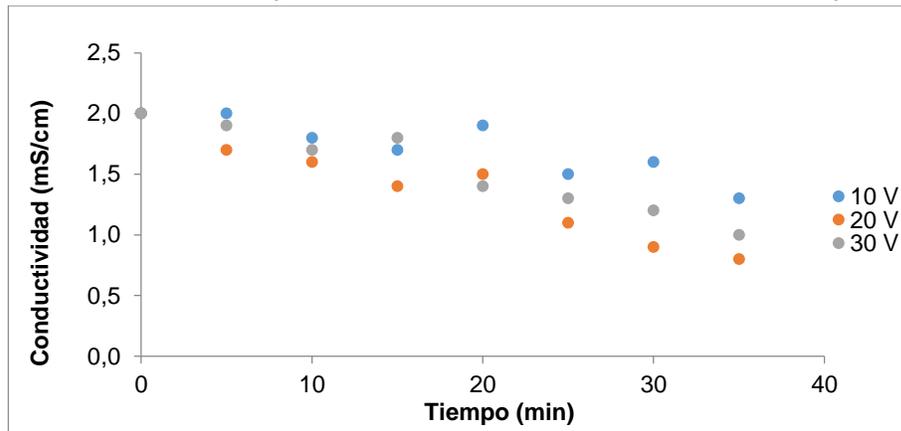


4.2.2.4 Conductividad. Con respecto a la conductividad en función del tiempo, los resultados para cada una de las tres pruebas son evidenciados en la Tabla 7 y su comportamiento es indicado en la Gráfica 4.

Tabla 7. Variación de la conductividad con respecto al tiempo

Voltaje (V)	10 V	20 V	30 V
Tiempo (min)	Conductividad (mS/cm)		
0	2,0	2,0	2,0
5	2,0	1,7	1,9
10	1,8	1,6	1,7
15	1,7	1,4	1,8
20	1,9	1,5	1,4
25	1,5	1,1	1,3
30	1,6	0,9	1,2
35	1,3	0,8	1,0

Gráfica 4. Comportamiento de la conductividad vs tiempo



De acuerdo a los resultados y según Arboleda y Herrera, el incremento en la conductividad puede deberse a la discontinuidad en la toma de las muestras que puede representar una interferencia en el campo eléctrico que genera el medido de conductividad por el campo eléctrico del reactor.⁶⁰

4.2.2.5 Concentración de Cromo Total. Por otro lado, las muestras de agua residual a partir de las cuales, son determinadas variables como el pH, la temperatura, la conductividad, el voltaje y el amperaje, cada cinco minutos, éstas son llevadas al laboratorio con el fin de determinar la concentración de cromo total de cada una de ellas, mediante la técnica analítica de absorción atómica de llama y cuyos resultados son evidenciados en la Tabla 8.

Tabla 8. Variación de la concentración de cromo total con respecto al tiempo

Voltaje (V)	10 V	20 V	30 V
Tiempo (min)	Concentración de Cr (mg/L)		
0	346	346	346
10	240	290	298
15	261	265	126
20	176	210	65
25	150	189	17
30	139	110	9
35	137	69	2

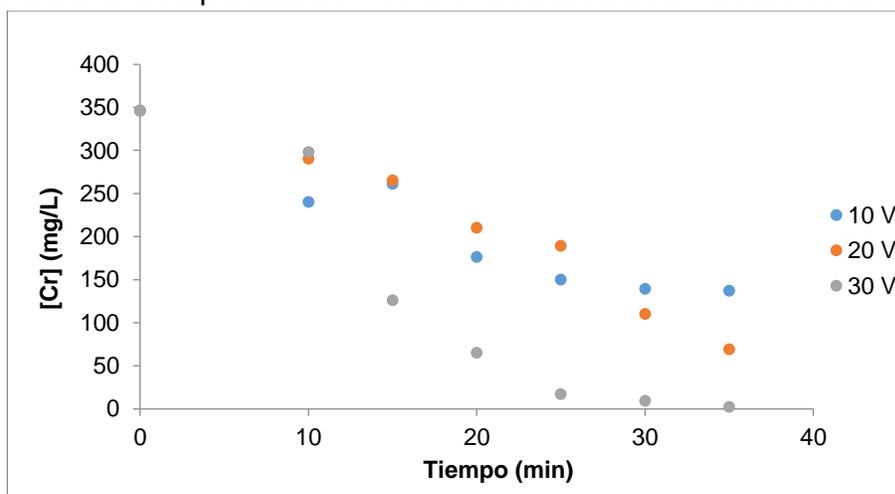
⁶⁰ ARBOLEDA, Juan y HERRERA, Paula. Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo Batch para la remoción de cromo hexavalente (Cr+6). Tesis Ingeniero Ambiental. Bogotá: Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería Ambiental, 2015. 107 p.

Con base en los resultados descritos para la concentración de cromo, el porcentaje de remoción para cada ensayo es evidenciado en la Tabla 9 y su respectivo comportamiento en la Gráfica 5.

Tabla 9. Porcentaje de remoción de cromo total

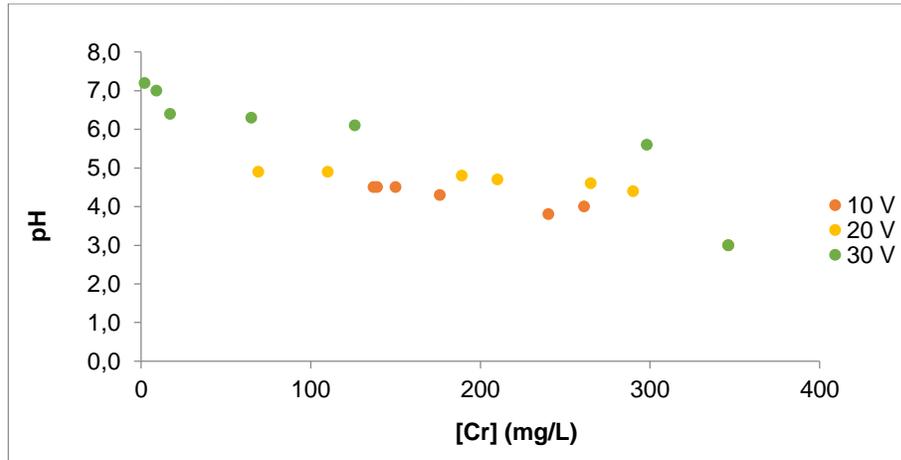
Voltaje (V)	10 V	20 V	30 V
Tiempo (min)	Porcentaje remoción Cr (%)		
0	0	0	0
10	31	16	14
15	25	23	64
20	49	39	81
25	57	45	95
30	60	68	97
35	60	80	99

Gráfica 5. Comportamiento de la concentración de cromo vs tiempo

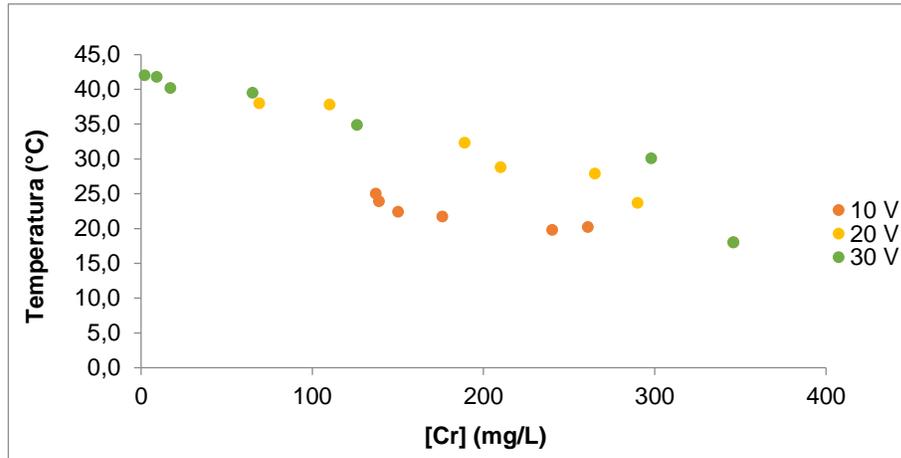


Finalmente, el comportamiento del pH, la temperatura y la conductividad a lo largo del proceso de electrocoagulación, puede evaluarse mediante la representación de dichas variables en función de la concentración de cromo total como es evidenciado en las Gráficas 6, 7 y 8 respectivamente.

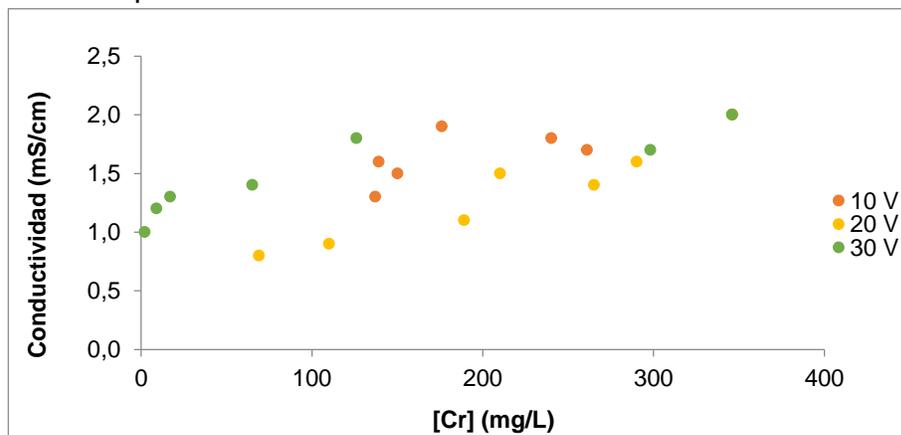
Gráfica 6. Comportamiento del pH vs la concentración de cromo



Gráfica 7. Comportamiento de la temperatura vs la concentración de cromo



Gráfica 8. Comportamiento de la conductividad vs la concentración de cromo



Con base en el comportamiento de cada una de las variables de estudio a lo largo del proceso descrito en las gráficas anteriores, los resultados más favorables son obtenidos con la aplicación de 30 voltios con los cuales el porcentaje de remoción de cromo total presente en el efluente, es superior al obtenido con la aplicación de 10 y 20 voltios.

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.3.1 Concentración de Hidróxido de Aluminio. La concentración de Al^{+3} generado por el proceso de electrocoagulación, evidenciada en el Tabla 10, es obtenida de dos maneras:

- De forma experimental, en función de la masa del electrodo antes (Masa inicial Al) y después del tratamiento (Masa Final Al), de la diferencia entre ellos (Masa Al^{+3} Experimental), y del volumen de agua tratada (2,2 L).
- De forma teórica, en función de dicho volumen (2,2 L), y de la masa determinada mediante la ecuación de Faraday⁶¹ descrita a continuación.

$$m Al^{+3}_t = \frac{PE \cdot I \cdot t}{F} \quad (25)$$

$m Al^{+3}_t$: es la masa de aluminio producida en el proceso (g)

PE : es el peso equivalente de Al^{+3} (masa atómica / valencia: 27/3=9)

I : es la intensidad de corriente (2,2 A)

t : es el tiempo (s)

F : es la constante de Faraday (96475,309 C mol⁻¹)

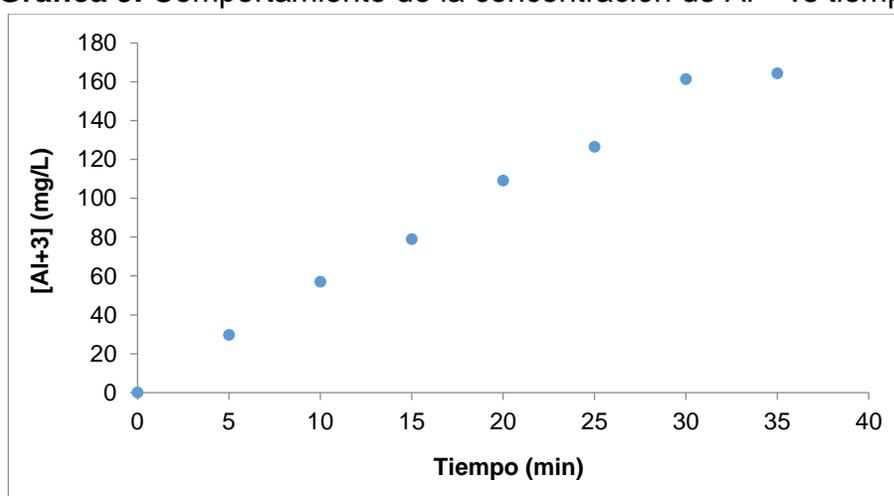
⁶¹ BARBOZA, Gloria. (2011). Reducción de la Carga de Contaminantes de las Aguas Residuales de la Planta de Tratamiento de Totorá – Ayacucho Empleando la Técnica de Electrocoagulación. Tesis Maestro en Ciencias con Mención en Química. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ciencias, 2011. 145p.

Tabla 10. Concentración de Al^{+3}

Tiempo (min)	Masa Inicial Al (g)	Masa Final Al (g)	Masa Al^{+3} Exp (g)	Masa Al^{+3} Teórica (g)	$[\text{Al}^{+3}]$ Exp (mg/L)
0	0,6502	0,6502	0	0	0
5	0,6795	0,6142	0,0653	0,0616	29,68
10	0,7411	0,6156	0,1255	0,1231	57,05
15	0,8026	0,6290	0,1736	0,1847	78,91
20	0,8642	0,6243	0,2399	0,2462	109,05
25	0,9258	0,6476	0,2782	0,3078	126,45
30	0,9873	0,6325	0,3548	0,3693	161,27
35	0,9972	0,6358	0,3614	0,4309	164,27

Con base en los resultados evidenciados en la tabla, los datos experimentales son inferiores a los datos obtenidos teóricamente, diferencia que puede asociarse a la presencia de impurezas presentes en el efluente.

Gráfica 9. Comportamiento de la concentración de Al^{+3} vs tiempo



4.3.2 Cinética de reacción. El comportamiento de la concentración de hidróxido de aluminio generado a lo largo del proceso de electrocoagulación, es estimado a través de una cinética de reacción. Para ello, los resultados obtenidos para la concentración determinados de forma experimental, son evaluados mediante las ecuaciones integradas de la ley de velocidad de reacciones de primer, segundo y tercer orden, que son descritas a continuación.

La ley de velocidad para reacciones de primer orden⁶² está dada por:

$$v(t) = -\frac{dC_A}{dt} = k C_A \quad (26)$$

Integrando:

$$-\int \frac{dC_A}{C_A} = \int k dt \quad (27)$$

$$\ln C_A = \ln C_{A0} - k t \quad (28)$$

La ecuación resultante corresponde a:

$$-\ln \frac{C_A}{C_{A0}} = k t \quad (29)$$

C_A : es la concentración de cromo total de la solución en el tiempo dado

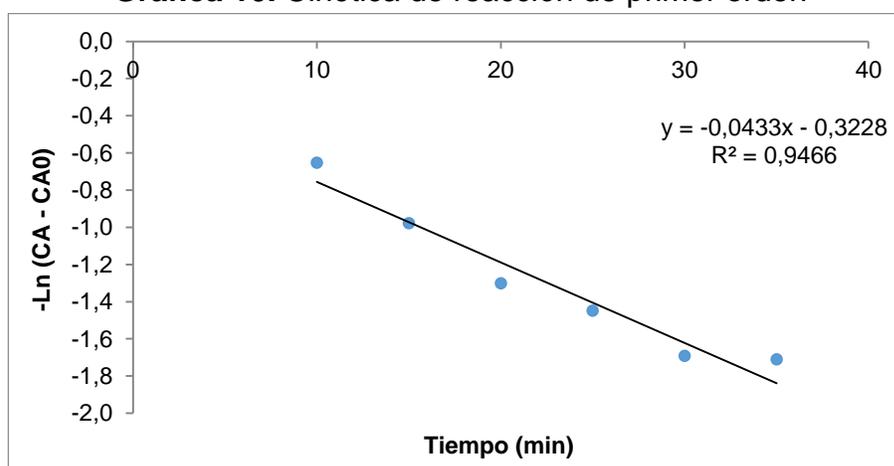
C_{A0} : es la concentración inicial de cromo total de la solución en el tiempo 0

k : es la constante cinética de reacción

t : es el tiempo

Con base en lo anterior, la Gráfica 6 representa la cinética para la reacción de orden uno para el proceso objeto de estudio; en ella, la que la línea de tendencia obtiene una correlación de 0,9466 y evidencia una constante cinética de -0,043.

Gráfica 10. Cinética de reacción de primer orden



62 BAEZA, Juan. Conceptos básicos de cinética química. Velocidad de reacción. [En línea]. <<http://www.uv.es/~baeza/cqtema3.html>> [citado 4 de junio de 2016]

A su vez, la ley de velocidad para reacciones de segundo orden⁶³, corresponde a:

$$v(t) = -\frac{dC_A}{dt} = k C_A^2 \quad (30)$$

Integrando:

$$-\int \frac{dC_A}{C_A^2} = \int k dt \quad (31)$$

La ecuación resultante está dada por:

$$\frac{1}{C_A} = kt + \frac{1}{C_{A0}} \quad (32)$$

C_A : es la concentración de cromo total de la solución en el tiempo dado

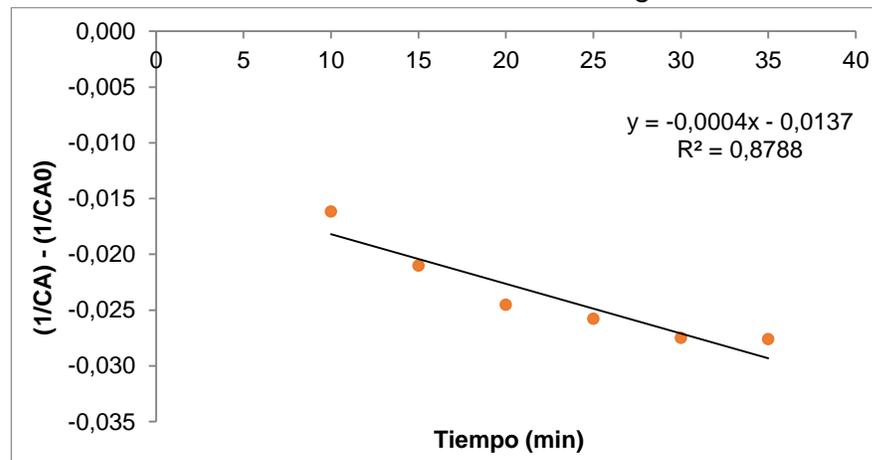
C_{A0} : es la concentración inicial de cromo total de la solución en el tiempo 0

k : es la constante cinética de reacción

t : es el tiempo

Por lo tanto, la cinética para la reacción de segundo orden, que describe el proceso, corresponde a la Gráfica 7, en la que la línea de tendencia presenta una correlación de 0,8788, y evidenciando una constante cinética de -0,0004.

Gráfica 11. Cinética de reacción de segundo orden



⁶³ BAEZA, Juan. Conceptos básicos de cinética química. Velocidad de reacción. [En línea]. <<http://www.uv.es/~baeza/cqtema3.html>> [citado 4 de junio de 2016]

Finalmente, la ley de velocidad para reacciones de tercer orden⁶⁴ está dada por:

$$v(t) = -\frac{dC_A}{dt} = k C_A^3 \quad (33)$$

$$-\int \frac{dC_A}{C_A^3} = \int k dt \quad (34)$$

$$\frac{1}{C_A^2} = 2kt + \frac{1}{C_{A0}^2} \quad (35)$$

C_A : es la concentración de cromo total de la solución en el tiempo dado

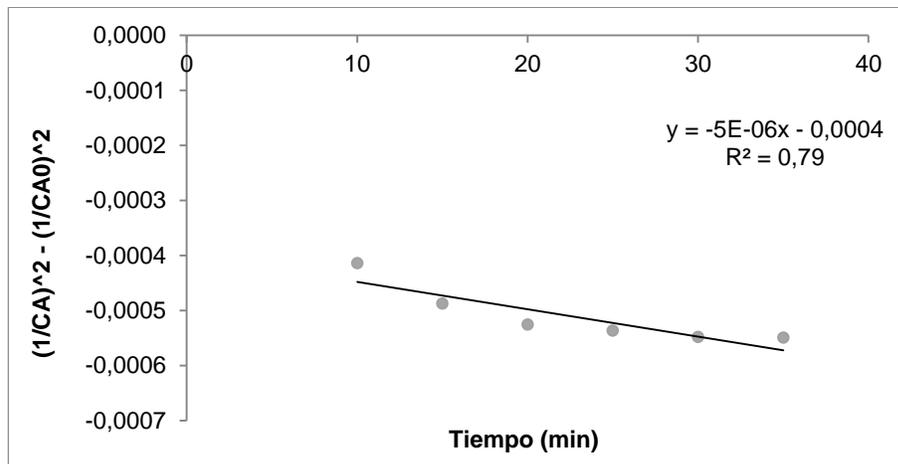
C_{A0} : es la concentración inicial de cromo total de la solución en el tiempo 0

k : es la constante cinética de reacción

t : es el tiempo

Por último, la cinética de reacción de orden tres que representa los resultados del proceso, corresponde a la Gráfica 8, con una constante cinética de $-5E-06$, con una correlación de 0,79 obtenida mediante la línea de tendencia.

Gráfica 12. Cinética de reacción de tercer orden



Con base en los resultados obtenidos, la cinética planteada para una reacción de primer orden se ajusta a los datos experimentales de la concentración de hidróxido generada durante el proceso, con una correlación de 0,95; por lo que la reacción corresponde a una de tipo elemental.

⁶⁴ POZUELO, Javier. Tema 5. Cinética química, termodinámica y equilibrio 1. [En línea]. <<http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/quimica-de-los-materiales/>> [citado 5 de junio de 2016]

Sin embargo, según Moreno⁶⁵, puede considerarse como una reacción de tipo complejo que a su vez puede clasificarse en una reacción consecutiva o en serie, ya que el producto de la reacción de una etapa elemental, es el reactante de la siguiente como en el caso del Al³⁺.

4.3.3 Isotherma de adsorción. Una isoterma de adsorción está definida como la relación entre la cantidad de sustancia adsorbida por un adsorbente y la concentración de equilibrio.⁶⁶

Para su determinación, es necesario establecer tanto la concentración de cromo total en equilibrio del FLOC, como en la solución también en equilibrio; asumiendo que la cantidad total de cromo total que deja de estar en la solución, es transferida en su totalidad al FLOC generado durante el proceso. A partir de ello, los resultados son evidenciados en la Tabla 11 y su comportamiento en la Gráfica 9.

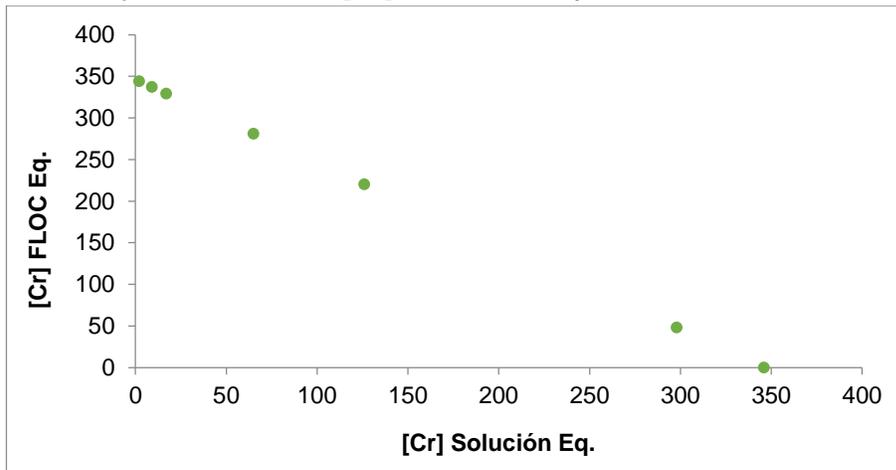
Tabla 11. Concentración de cromo en el FLOC y en la solución

Tiempo (min)	[Cr] Solución Eq.	[Cr] FLOC Eq.
0	346	0
10	298	48
15	126	220
20	65	281
25	17	329
30	9	337
35	2	344

⁶⁵ MORENO, Rafael. (2011). Cinética Química. Ecuaciones de Velocidad complejas. [En línea] <http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/04_ecuaciones_complejas_12828.pdf> [citado 8 de junio d 2016]

⁶⁶ CARRETO, Alejandro. Apuntes. Adsorción. [En línea]. <<http://apuntescientificos.org/adsorcion-qbp.html>> [citado 6 de junio de 2016]

Grafica 13. Comportamiento de [Cr] en el FLOC y en la solución



De acuerdo a los resultados evidenciados anteriormente, la gráfica presenta una tendencia inversamente proporcional dada la suposición planteada para el equilibrio del cromo total tanto en la solución como en el FLOC.

A su vez, dichos resultados son evaluados mediante el modelo de Langmuir y el modelo de Freundlich, descritos a continuación; con el fin de establecer cuál de ellos presenta un mejor ajuste a los datos experimentales obtenidos.

El modelo de Langmuir plantea una adsorción localizada, solo en sitios definidos de la superficie, denominados puntos activos; asumiendo que la superficie es homogénea y la formación de una única capa en cada punto, de forma que en cada uno de ellos puede adherirse una sola molécula de adsorbato. Sin embargo, es un modelo que no contempla la interacción entre las moléculas adsorbidas.⁶⁷

La ecuación linealizada para la isoterma de Langmuir⁶⁸ está dada por:

$$q = \frac{q_m \cdot b \cdot C}{(1+b \cdot C)} \quad (36)$$

⁶⁷ CARRETO, Alejandro. Apuntes. Adsorción. [En línea]. <<http://apuntescientificos.org/adsorcion-qbp.html>> [citado 6 de junio de 2016]

⁶⁸ LAZO, José., *et al.* Síntesis y caracterización de arcillas organofílicas y su aplicación. EN: Revista Sociedad Química del Perú. Lasallista de Investigación. 2008. Vol. 74 no. 1, p. 4.

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{(q_m \cdot b)} \cdot \frac{1}{C} + \frac{1}{q_m} \quad (37)$$

C : corresponde a la concentración del adsorbato en el equilibrio (mg/L)

q_m : corresponde a la capacidad máxima de adsorción (mg/g)

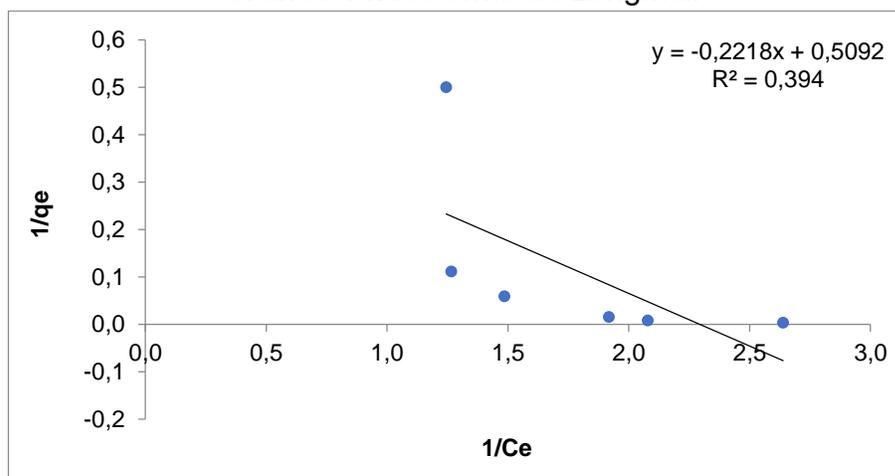
b : corresponde a la constante de Langmuir de afinidad o energética (L/mg)

Con base en lo anterior, los datos requeridos para el modelo de Langmuir, son mostrados en la Tabla 12 y su comportamiento descrito en la Gráfica 10.

Tabla 12. Datos para el modelo de Langmuir

Tiempo (min)	[Cr] Solución Eq.	1/Ce (mg/L)	qe (mg/g)
0	346	0,0029	0
10	298	0,0034	0,3790
15	126	0,0079	0,4810
20	65	0,0154	0,5213
25	17	0,0588	0,6733
30	9	0,1111	0,7902
35	2	0,5000	0,8032

Gráfica 14. Isotherma de Langmuir



Por su parte, el modelo de Freundlich, plantea una isoterma de adsorción asumiendo una superficie rugosa o micro-porosa, con una distribución exponencial de la energía en los puntos de adsorción. Sin embargo, el modelo no contempla la formación de una mono-capa⁶⁹.

La ecuación linealizada para la isoterma de Freundlich⁷⁰ está dada por:

$$q = k_f C^{1/n} \quad (38)$$

$$\log(q) = \log(k_f) + \frac{1}{n} \log(C) \quad (39)$$

k_f : corresponde a la constante de capacidad de adsorción

n : corresponde a la constante de intensidad de adsorción

Con base en lo anterior, los datos requeridos para el modelo de Freundlich, son descritos en la Tabla 13 y su comportamiento en la Gráfica 11.

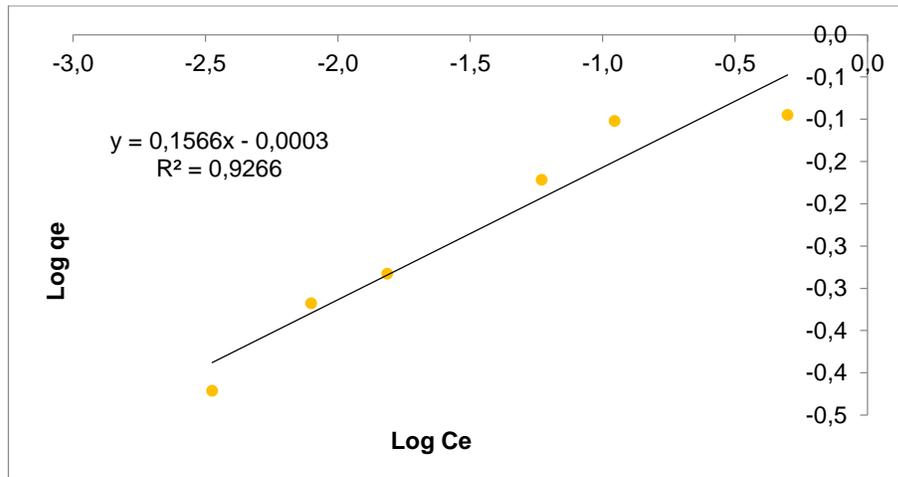
Tabla 13. Datos para el modelo de Freundlich

Tiempo (min)	[Cr] Solución Eq.	Log Ce	Log qe
10	298	-2,4742	-0,42136079
15	126	-2,1004	-0,3179
20	65	-1,8129	-0,2829
25	17	-1,2304	-0,1718
30	9	-0,9542	-0,1023
35	2	-0,3010	-0,0952

⁶⁹ CARRETO, Alejandro. Apuntes. Adsorción. [En línea]. <<http://apuntescientificos.org/adsorcion-qbp.html>> [citado 6 de junio de 2016]

⁷⁰ LAZO, José., *et al.* Síntesis y caracterización de arcillas organofílicas y su aplicación. EN: Revista Sociedad Química del Perú. Lasallista de Investigación. 2008. Vol. 74 no. 1, p. 5.

Gráfica 15. Isoterma de Freundlich



De acuerdo a la información anterior y a los resultados de la evaluación de los datos experimentales con los dos modelos planteados para la isoterma de adsorción, el que mejor resultado presenta es el modelo de Freundlich con una correlación de 0,9266.

Además, con los resultados obtenidos para las constantes de la regresión lineal, es posible determinar el valor tanto de la constante de capacidad de adsorción (K_f), como el valor de la intensidad de adsorción (n), a través de las ecuaciones expuestas a continuación.

$$m = \text{Log} (K_f) \quad (40)$$

$$0,1566 = \text{Log} (K_f)$$

$$K_f = 10^{0,1566}$$

$$K_f = 1,44$$

$$b = \frac{1}{n} \quad (41)$$

$$0,0003 = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{0,0003}$$

$$n = 3333,33$$

4.4 CONDICIONES DE OPERACIÓN

El proceso de cromado en la empresa Recubrimientos Galvánicos de Colombia, produce mensualmente 500 litros de agua residual aproximadamente y presenta una concentración inicial de cromo total de 346 mg/L. Sin embargo, dicha concentración puede variar, teniendo en cuenta la producción de la empresa medida en términos de la cantidad y las dimensiones de las piezas a recubrir.

Con respecto al pH, pese a que las referencias bibliográficas sugieren un valor de 7, en el caso particular, el pH de operación corresponde al pH inicial del agua residual de 3,0, debido a las implicaciones en términos de costo de equipos, que llevaría realizar el control de dicha variable, el cual podría realizarse mediante un sensor de pH.

De la misma forma que el pH, las referencias indican que a medida que el proceso avanza, la temperatura aumenta hasta llegar a los 60°C como valor máximo. Sin embargo, para el caso en estudio, la temperatura de operación corresponde a la temperatura inicial del agua de 18°C, debido a los costos que su control acarrearía.

Por otro lado, con relación a la intensidad de corriente que mejores resultados presenta, corresponde a 2,2 amperios que fue determinado a partir del voltaje aplicado de 30 V, seleccionado con base en la información bibliográfica como Arboleda y Herrera⁷¹, que refieren un porcentaje de remoción superior al 95% con un valor de voltaje cercano al aplicado en el caso de estudio.

En cuanto a la conductividad, las referencias sugieren mantener una cantidad de iones cloruro, cercanos al 20% con el fin de favorecer el proceso de electrocoagulación. Para el caso particular, la conductividad no fu modificada y

⁷¹ ARBOLEDA, Juan y HERRERA, Paula. Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo Batch para la remoción de cromo hexavalente (Cr+6). Tesis Ingeniero Ambiental. Bogotá: Universidad Santo Tomás. Facultad Ingeniería Ambiental, 2015. 107 p.

equivalente a un valor de 2 mS/cm, debido a que para realizar cambios en esa variable, es necesaria la adición de sales que incrementa los costos del proceso.

Finalmente en cuanto al tiempo de operación, a partir de la información obtenida el estudio cinético desarrollado, el tiempo de tratamiento debe ser de 42,5 minutos aproximadamente para alcanzar la concentración permisible de 0,5 mg/L de cromo para los vertimientos propios de esta industria. Es un tiempo superior al empleado en el presente estudio que no cumple con dicho requerimiento a 35 minutos de tratamiento.

5. ANÁLISIS ECONOMICO

Para llevar a cabo el análisis financiero del proyecto, es necesario determinar los costos del mismo a las condiciones de operación que mayor porcentaje de remoción de cromo total presentan, y que para el caso particular de estudio corresponden a 30 V, 2,2 A, 3,0 unidades de pH inicial, conductividad inicial de 2 ms/cm, ánodo de sacrificio de aluminio, cátodo de hierro y una distancia entre electrodos de 1 cm.

Con base en lo anterior, el costo total del proyecto, está dado por el costo de operación y el costo de materiales mediante la siguiente ecuación⁷².

$$\text{Costo Total Proceso} = \text{Costo Operación} + \text{Costo Materiales} \quad (42)$$

5.1 COSTO DE OPERACIÓN

El costo de operación⁷³ del proceso de electrocoagulación está dado por el costo de la energía y el costo del electrodo, mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Costo Operación} = X \cdot C_{\text{Energía}} + \beta \cdot C_{\text{Electrodo}} \quad (43)$$

X: corresponde a la constante del precio de la energía eléctrica⁷⁴ (402,29 \$/kWh)

β : corresponde a la constante del precio del electrodo (4.800 \$/Kg)

$$C_{\text{Energía}} = \frac{V \cdot I \cdot t}{\text{Volumen}} \quad (44)$$

V: corresponde al voltaje aplicado a la celda (V)

I: corresponde a la intensidad de corriente (A)

t: corresponde al tiempo de proceso (h)

Volumen: corresponde al volumen de agua residual a tratar (m³)

⁷² ARANGO, Sebastián y LÓPEZ, Andrés. Tratamiento de aguas residuales del proceso de desengrase de autopartes con fines de re-uso. Tesis Ingeniero de Procesos. Medellín: Universidad EAFIT. Facultad de Ingeniería, 2008. 122p.

⁷³ ibídem.

⁷⁴ CODENSA. Tarifas de energía eléctrica (S/kWh) mayo de 2016. [En línea] <<https://www.codensa.com.co/hogar/tarifas>> [citado 24 de mayo de 2016]

$$C_{\text{Energía}} = \frac{30 \text{ V} \cdot 2,2 \text{ A} \cdot 0,583 \text{ h}}{0,0022 \text{ m}^3}$$

$$C_{\text{Energía}} = 17.500 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$$

$$C_{\text{Electrodo}} = \frac{I \cdot t \cdot M_w}{Z \cdot F \cdot \text{Volumen}} \quad (45)$$

Mw: corresponde al peso molecular del electrodo

z: corresponde al número de electrones en la reacción óxido - reducción

F: corresponde a la constante de Faraday (96487 C/mol)

$$C_{\text{Electrodo}} = \frac{2,2 \cdot 0,583 \cdot 26,98}{3 \cdot 96.487 \cdot 0,0022}$$

$$C_{\text{Electrodo}} = 0,0543 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Con base en la información anterior, el costo de operación está dado por:

$$\text{Costo Operación} = X \cdot C_{\text{Energía}} + \beta \cdot C_{\text{Electrodo}} \quad (46)$$

$$\text{Costo Operación} = 402,29 \frac{\$}{\text{kWh}} \cdot 17.500 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} + 4.800 \frac{\$}{\text{kg}} \cdot 0,0543 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Costo Operación} = 7.040.335 \frac{\$}{\text{m}^3}$$

5.2 COSTO DE MATERIALES

El costo de los materiales requeridos para el proceso de electrocoagulación corresponde a los costos particulares indicados en la Tabla 14.

Tabla 14. Costos de materiales

Material	Costo
Celda en vidrio	13.000
Electrodos	10.000
Cables tipo eléctrico	2.000
pH metro	610.000
Sensor de conductividad	389.000
Fuente regulada de corriente	200.000
Multímetro	25.000
Costo Materiales	\$ 1.249.000,00

5.3 COSTO TOTAL

A partir de la ecuación que relaciona los costos de operación y los costos de los materiales requeridos para el proceso de electrocoagulación, el costo total está dado por la siguiente ecuación.

$$\text{Costo Total Proceso} = \text{Costo Operación} + \text{Costo Materiales} \quad (47)$$

$$\text{Costo Total Proceso} = \$7.040.335 + \$1.249.000$$

$$\text{Costo Total Proceso} = \$ 8.289.335$$

Finalmente, el costo total del proceso está en función de la cantidad de agua residual a tratar, que a su vez depende de la cantidad de piezas que llegan a la empresa con el fin de someterse al proceso de cromado. Por lo tanto, el costo de tratamiento de todo el efluente debe establecerse de acuerdo a la cantidad de agua residual que necesita tratarse, a los materiales que deben emplearse en la fabricación de la celda con las dimensiones aptas para dicha cantidad de agua y a las tarifas de energía que rigen a la ciudad de Bogotá cada mes.

6. CONCLUSIONES

- La caracterización del efluente objeto de estudio proveniente del proceso de cromado de la empresa Recubrimientos Galvánicos de Colombia, presenta una concentración de cromo total de 346 mg/L a una temperatura inicial de 18 °C, un pH de 3,0 y una conductividad inicial de 2 mS/cm; efluente que excede la normatividad vigente para vertimientos con respecto a la concentración de cromo total, con una diferencia de 345,5 mg/L.
- La celda de electrocoagulación para el caso particular, corresponde a una celda electrolítica con capacidad para tratar un total de 2,2 L de agua residual, de 14 cm de largo, 11 cm de ancho y 18 cm de alto; con un total de 6 placas metálicas electrodos en forma de “T”, que actúan como electrodos, de los cuales 3 son de hierro y 3 de aluminio, conectados a una fuente regulable de voltaje, con la que el porcentaje de remoción de cromo total obtenido es de 99,4%.
- De acuerdo a la evaluación de la celda a las condiciones iniciales de 18 °C, pH de 3,0, conductividad de 2 mS/cm y a la aplicación de 10, 20 y 30 V; las variables que mejores resultados presentan, corresponde a un voltaje 30 V y a una intensidad de corriente de 2,20 A; con las que el porcentaje de remoción de cromo total es del 99% al cabo de 35 minutos de tratamiento.
- Con base en el análisis económico, el proceso de electrocoagulación evaluado tiene un costo total de \$ 8.289.335, en función del costo de materiales y costos de operación, en los que a su vez, la energía representa un mayor porcentaje dados los requerimientos del sistema y las tarifas aplicadas en la ciudad de Bogotá.

7. RECOMENDACIONES

- Realizar un tratamiento previo de separación por etapas de agua residual, con el fin de aplicar el proceso de electrocoagulación únicamente al agua que contiene cromo, de forma que pueda evitarse la contaminación por otros agentes, aumentando la eficiencia del proceso medido en función del porcentaje de remoción de dicha concentración y pueda darse cumplimiento al requerimiento establecido por la legislación vigente.
- Analizar la influencia del pH en el proceso de electrocoagulación, que de acuerdo a la información bibliográfica, está representada en el tipo de hidróxido formado a partir de las reacciones que ocurren durante el proceso.
- Evaluar el diseño de la celda de electrocoagulación, empleando electrodos con conexión bipolar con el fin de establecer la influencia éste parámetro en la eficiencia de remoción de cromo total presente en el agua residual.
- Plantear un diseño experimental en el que la variable independiente sea el material de los electrodos, realizando pruebas con otros materiales como acero inoxidable, cobre, plomo, entre otros; con el fin de evaluar su influencia en los resultados del proceso.
- Realizar el análisis de la composición del FLOC resultante del proceso de electrocoagulación, con el fin de identificar los hidróxidos de aluminio formados, con los que podría establecerse la cinética que permitiría a su vez, mejorar las condiciones del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

ABRIL, Dibar y LÓPEZ, Alexander. Ingeniería básica de una planta a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales en la empresa QUIMAPLIC LTDA. Mediante el método de electrocoagulación. Tesis Ingeniero Químico. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Departamento de Ingeniería Química, 2009. 130 p.

ACOSTA, Gema, et al. La electrocoagulación como un tratamiento para la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales. EN: Revista Facultad de Ciencias Básicas. Noviembre, 2013. Vol. 9 no. 2.

ACOSTA, Gema, et al. Evaluación y regulación de parámetros en un equipo diseñado para la disminución de cromo (VI), provenientes de la industria de recubrimientos galvánicos. EN: Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Junio, 2013. Vol. 23 no. 1.

AGUILAR, Edward. Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. Tesis Magíster en Ciencias Ambientales con Mención en Control de la Contaminación y Ordenamiento Ambiental. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, 2015. 102 p.

AKBAL, Feryal y CAMCI, Selva. Treatment of Metal Plating Wastewater by: Electrocoagulation. EN: Environmental Progress & Sustainable Energy. Octubre, 2012. Vol. 31, no 3.

ARANGO, Álvaro y GARCÉS, Luis. Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. EN: Revista Universidad EAFIT. Julio, 2007. Vol. 43, no 147.

ARANGO, Álvaro. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. EN: Revista Lasallista Investigación. Enero, 2005. Vol. 2 no. 1.

ARANGO, Sebastián y LÓPEZ, Andrés. Tratamiento de aguas residuales del proceso de desengrase de autopartes con fines de re-uso. Tesis Ingeniero de Procesos. Medellín: Universidad EAFIT. Facultad de Ingeniería, 2008. 122 p.

ARBOLEDA, Juan y HERRERA, Paula. Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo Batch para la remoción de cromo hexavalente (Cr+6) con electrodos de aluminio-aluminio y de hierro-aluminio en condiciones de laboratorio. Tesis Ingeniero Ambiental. Bogotá: Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería Ambiental, 2015. 107 p.

BAEZA, Juan. Conceptos básicos de cinética química. Velocidad de reacción. [En línea]. <<http://www.uv.es/~baeza/cqtema3.html>>

BARBOZA, Gloria. Reducción de la Carga de Contaminantes de las Aguas Residuales de la Planta de Tratamiento de Totorá – Ayacucho Empleando la Técnica de Electrocoagulación. Tesis Maestro en Ciencias Mención en Química. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ciencias, 2011. 145 p.

BAUTISTA, Deissy y NIETO, Duvan. Desarrollo de la propuesta para el tratamiento de las aguas residuales de la empresa extrucciones SCHULLER Ltda. Tesis Ingeniero Químico. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. Departamento de Ingeniería Química, 2011. 185 p.

CANTERA, Luis. Automatización del proceso de tratamiento de aguas pluviales por el método de electrocoagulación. Tesis Ingeniero en Control y Automatización. México D.F.: Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Unidad Profesional “Adolfo López Mateos”, 2013. 147 p.

CARRETO, Alejandro. Apuntes científicos. Adsorción. [En línea]. <<http://apuntescientificos.org/adsorcion-qbp.html>>

CHARRY, Julián y MOLANO, Diego. Diseño de la planta de tratamiento de agua residual proveniente del proceso electrolítico de la planta de cromado de GRICOL S.A. Tesis Ingeniero Mecánico. Tesis Ingeniero Mecánico. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Departamento de Ingeniería Mecánica, 2002. 259 p.

CHÁVEZ, Álvaro, et al. Una alternativa limpia para el tratamiento de las aguas residuales galvánicas: Revisión bibliográfica. EN: Revista Ingenierías Universidad de Medellín. Enero, 2009. Vol. 8 no 14.

CHEN, Guohua. Electrochemical technologies in wastewater treatment EN: Separation and Purification Technology. Octubre, 2004. Vol.38 no. 1

CODENSA. Tarifas de energía eléctrica (S/kW/h) mayo de 2016. [En línea] <<https://www.codensa.com.co/hogar/tarifas>>

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631 (17 de marzo de 2015). Por la que se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Bogotá, 2015 p. 30

GILPAVAS, Edison. Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales. EN: Cuadernos de Investigación. Julio, 2008. no. 65.

HOLT, Peter, et al. The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology EN: Chemosphere. August 2005. Vol. 59 no. 3

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación, Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Bogotá: ICONTEC, 2008 14 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Referencias bibliográficas. Contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá: ICONTEC, 2008 27 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. NTC 4490. Bogotá: ICONTEC, 1998 38 p.

JARAMILLO, Xavier. Diseño y construcción de un reactor de electrocoagulación para el estudio de tratamiento de agua residual de tintura y acabado textil. Tesis Ingeniero Textil. Ibarra: Universidad Técnica del Norte. Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, 2012. 136 p.

LAZO, José., et al. Síntesis y caracterización de arcillas organofílicas y su aplicación. EN: Revista Sociedad Química del Perú. Lasallista de Investigación. 2008. Vol. 74 no. 1.

MOLLAH, M. Electrocoagulation (EC) – science and applications. EN: Journal of Hazardous Materials. 2001. Vol. 84 no. 1.

MORALES, Nelly. Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas. . EN: Ciencia e ingeniería Neogranadina. Junio, 2010. Vol. 20 no. 1.

MORENO, Rafael. (2011). Cinética Química. Ecuaciones de Velocidad complejas. [En línea] < http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/04_ecuaciones.pdf>

OÑA, Byron y FALCONÍ, David. Tratamiento avanzado de aguas residuales del proceso de lavado y triturado de Jean en la empresa "MUNDOCOLOR" mediante electrocoagulación. Tesis Ingeniero Industrial. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2013. 146 p.

PANTOJA, Evelyn. Aplicación de la electrocoagulación y floculación sobre el tratamiento del drenaje ácido de minas de carbón. Tesis Ingeniero Químico. Cali: Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería Química, 2012. 41 p.

PAPALEO, Martín y Rodríguez Stephen. Diseño y construcción del prototipo de un sistema de electrocoagulación de tratamiento de aguas residuales. Tesis Ingeniero Electrónico. Cali: Universidad de San Buenaventura, 2011. 122 p.

PIÑA-SOBERANIS, M. Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. EN: Revista Mexicana de Ingeniería Química. Abril, 2011. Vol. 10 no. 2.

POZUELO, Javier. Tema 5. Cinética química, termodinámica y equilibrio 1. [En línea]. <[Http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/quimica-de-los-materiales/Material-de-clase/tema-5.-cinetica-quimica-termodinamica-y-equilibrio-i](http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/quimica-de-los-materiales/Material-de-clase/tema-5.-cinetica-quimica-termodinamica-y-equilibrio-i)>

PRIETO, Francisco, et al. Electrocoagulación: una alternativa para depuración de lacto-suero residual. EN: Revista ADIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica. Diciembre, 2012. Vol. 5 no. 3.

RECUBRIMIENTOS GALVÁNICOS DE COLOMBIA. Procesos certificados. [En línea]. < <http://regalco.net/empresa.html>>

RESTREPO, Ana, et al. La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. EN: Producción + Limpia. Diciembre, 2006. Vol. 1 no. 2.