

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA
DE CURTIEMBRE MEDIANTE EL MÉTODO DE
ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA REDUCCIÓN DE LA
DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO Y CROMO”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUÍMICO**

**PERCY JIMMY DE LA CRUZ GARCÍA
ELMER HUMBERTO SILVA SALAZAR
JOSÉ LUIS INCA GÓMEZ**

Callao, setiembre 2017

PERÚ

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Percy Jimmy de la Cruz García", is written over a large, stylized oval flourish.

PRÓLOGO DEL JURADO

La presente Tesis fue Expuesto por las Bachilleres **DE LA CRUZ GARCIA PERCY JIMMY, INCA GOMEZ JOSÉ LUIS y SILVA SALAZAR ELMER HUMBERTO** ante el **JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS** conformado por los siguientes Profesores Ordinarios:

Ing. Dr. ANCIETA DEXTRE CARLOS ALEJANDRO	PRESIDENTE
Ing. Dr. CALDERÓN CRUZ JULIO CÉSAR	SECRETARIO
Lic. Mg. REYNA SEGURA ANA MARÍA	VOCAL
Ing. LAZO CAMPOSANO ROBERTO	ASESOR

Tal como está asentado en el Libro N° 1 Folio N° 15 y Acta N° 014 de Sustentación por la Modalidad de Tesis con Ciclo de Tesis, de fecha **09 DE SETIEMBRE 2017**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la Modalidad de Tesis con Ciclo de Tesis, de conformidad establecido por el Reglamento de Grados y Títulos aprobado por Resolución N° 082-2011-CU de fecha 29 de abril de 2011 y Resolución N° 221-2012-CU de fecha 19 de setiembre de 2012.

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo principalmente a Dios, por concedernos la vida, por los triunfos y momentos difíciles que no han enseñado a valorarlo cada día más, permitiéndonos haber llegado a este momento tan importante de nuestra formación profesional.

Finalmente, un eterno agradecimiento a nuestros familiares por el apoyo incondicional que nos brindaron a lo largo de toda nuestra carrera.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradecemos a Dios, por habernos dado la fuerza necesaria para culminar la tesis con éxito.

Agradecemos a nuestro director de tesis, Ing. Oscar Manuel Champa Henríquez por la oportunidad que nos ha brindado para emprendernos como investigadores y llegar así a elaborar esta Tesis de Pregrado, así como el apoyo y la confianza que ha mostrado con nuestro trabajo.

También queremos agradecer al Decano de la facultad de Ingeniería Química de la Universidad nacional del callao Dr. Ing. Luis Américo Carrasco Venegas por el apoyo y los recursos brindados en el centro de investigación del Laboratorio de Ingeniería Química.

Un agradecimiento particular nuestro asesor Ing. Roberto Lazo Camposano por la orientación y colaboración brindada durante la elaboración de la tesis.

Gracias a todas las personas que ayudaron directa e indirectamente en la realización de este proyecto.

INDICE GENERAL

INDICE DE TABLAS	5
INDICE DE FIGURAS	7
INDICE DE GRAFICOS	10
RESUMEN	13
ABSTRAC	12
I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION	13
1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	13
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	14
1.2.1. Problema general	14
1.2.2. Problemas específicos	14
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	14
1.3.1. Objetivos General	14
1.3.2. Objetivo específico	14
1.4. JUSTIFICACIÓN	15
1.4.1. Legal	15
1.4.2. Teórica	15
1.4.3. Tecnológicas	15
1.5. IMPORTANCIA	16

II. MARCO TEÓRICO	17
2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO	17
2.2. MARCO CONCEPTUAL	21
2.2.1. Aguas residuales	21
2.2.2. Valores Máximos Admisibles de aguas residuales no domésticas	24
2.2.3. Industria curtiembre en el Perú	27
2.2.4. Proceso de contaminación de la industria curtiembre	28
2.2.5. Descripción del proceso	29
2.2.6. Electrolisis.....	43
2.2.7. Electrodeposición.....	55
2.2.8. Electrocoagulación.....	58
2.2.9. Desventajas y ventajas de la electrocoagulación	65
2.2.10. Mecanismo del proceso de electrocoagulación.....	67
2.2.11. Reacciones presentes en el proceso de electrocoagulación.....	68
2.2.12. Factores para proceso de electrocoagulación	71
2.2.13. Isotermas de adsorción.....	74
2.2.14. Reactores para proceso de electrocoagulación.....	76
2.2.15. Diseño del sistema de electrocoagulación.....	80
2.3. DEFINICIONES DE TÉRMINOS	83

III. VARIABLES E HIPÓTESIS.....	86
3.1. VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN.....	86
3.1.1. Variable independiente	86
3.1.2. Variables dependientes	86
3.2. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	86
3.3. HIPÓTESIS	87
3.3.1. Hipótesis general.....	87
3.3.2. Hipótesis específica	87
IV. METODOLOGÍA.....	88
4.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	88
4.1.1. Por su finalidad	88
4.1.2. Por su diseño de investigación.....	88
4.1.3. Por su énfasis en la naturaleza de datos manejados	88
4.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	88
4.2.1. Definición del escenario de investigación	88
4.2.2. Elección del método de diseño de equipo de laboratorio.....	88
4.2.3. Determinación de la variable de diseño	89
4.2.4. Diseño del equipo del laboratorio	91
4.3. POBLACIÓN Y MUESTRA	95
4.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	95

4.4.1. Técnica de recolección de datos.....	95
4.4.2. Instrumentos para recolección de datos	97
4.5. PROCEDIMIENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	98
4.6. PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO Y ANÁLISIS DE DATOS	113
V. RESULTADOS	114
5.1. CALCULO DE LA NORMALIDAD DEL NaOH.....	115
5.2. RELACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO Y AGUA	115
5.3. CALCULO DE HIDROXIDO DE ALUMINIO Y Al^{+3} EN CADA ETAPA.....	115
5.4. CALCULO DE LAS ISOTERMA DE ADSORCIÓN.....	119
5.5. ANÁLISIS ECONÓMICO	128
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	132
6.1. Constrastacion de hipotesios con los resultdos	132
6.2. Constrastacion de los resultados con otrosestudios similares	133
VII. CONCLUSIONES	134
VIII. RECOMENDACIONES.....	135
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136
ANEXOS	143
1. MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	144
2. ANÁLISIS DEL ENSAYO INICIAL.....	145
3. ANÁLISIS DEL ENSAYO FINAL.....	147

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 2.1	Etapas del tratamiento del agua residual	23
Tabla N° 2.2	Parámetros Orgánicos.....	25
Tabla N° 2.3	Parámetros Fisicoquímicos.....	25
Tabla N° 2.4	Modificatoria de los VMA	26
Tabla N° 2.5	Desventajas de la Electrocoagulación	65
Tabla N° 2.6	Ventajas de la Electrocoagulación.....	66
Tabla N° 4.1	Pruebas Experimentales.....	90
Tabla N° 4.2	Materiales para el proceso de Electrocoagulación	96
Tabla N° 4.3	Insumos y Reactivos.....	96
Tabla N° 4.4	Istrumentos para tratamiento de Electrocoagulación	97
Tabla N° 4.5	Condiciones iniciales de los parámetros Fisicoquímicos	103
Tabla N° 5.1	Cantidad generada de Al^{+3} en gramos	117
Tabla N° 5.2	Cálculo de las isoterma de adsorción de langmuir	119
Tabla N° 5.3	Cálculo de las isoterma de adsorción de freundlich.....	120
Tabla N° 5.4	Resultados de la adsorción de la isoterma vs experimentales	121
Tabla N° 5.5	Resultados de la Demanda Química de Oxígeno	122
Tabla N° 5.6	Resultados de cromo inicial y cromo final	122
Tabla N° 5.7	Variación del pH después de la Electrocoagulación	124
Tabla N° 5.8	Variación de Conductividad después de la Electrocoagulación.....	125
Tabla N° 5.9	Remoción del cromo y Demanda Química de Oxígeno.....	126

Tabla N° 5.10 Costo de materiales y equipos	130
Tabla N° 5.11 Calculo del costo del análisis en laboratorio	131

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 2.1	Proceso de producción del cuero.....	30
Figura N° 2.2	Etapas de remojo en los botales.....	32
Figura N° 2.3	Piel luego de la etapa de pelambre.....	33
Figura N° 2.4	Máquina de descarnar.....	34
Figura N° 2.5	Máquina de dividir.....	35
Figura N° 2.6	Cuero en estado recurtido.....	42
Figura N° 2.7	Proceso de secado al vacío.....	43
Figura N° 2.8	Esquema general de un reactor Electrolytico.....	44
Figura N° 2.9	Reacciones directas.....	47
Figura N° 2.10	Reacciones indirectas.....	48
Figura N° 2.11	Aplicación electroquímica al tratamiento regenerativo del agua.....	52
Figura N° 2.12	Proceso de electrodeposición.....	56
Figura N° 2.13	Proceso de electrocoagulación.....	62
Figura N° 2.14	Procesos durante la electrocoagulación de aguas tratadas.....	64
Figura N° 2.15	Proceso de electrocoagulación.....	68
Figura N° 2.16	Reactor con electrodos monopolares conectados en paralelo.....	78
Figura N° 2.17	Reactor electrodos monopolares conectados en serie.....	79
Figura N° 2.18	Reactor electrodos bipolares conectados en paralelo.....	80
Figura N° 4.1	Celda de electrocoagulación.....	91
Figura N° 4.2	Geometría de los electrodos.....	92

Figura N° 4.3	Preparación de los electrodos.....	92
Figura N° 4.4	Distancia entre los electrodos.....	93
Figura N° 4.5	Fuente regulable de voltaje	94
Figura N° 4.6	Multímetro y Potenciómetro	95
Figura N° 4.7	Vista satelital de procedencia de la muestra	98
Figura N° 4.8	Zona industrial de la panamericana norte	99
Figura N° 4.9	Toma de muestra de agua residual de la industria de curtiembre	99
Figura N° 4.10	Imagen de la muestra inicial	100
Figura N° 4.11	Medición del pH en el laboratorio.....	101
Figura N° 4.12	Medición de la Conductividad eléctrica en el laboratorio.....	101
Figura N° 4.13	Muestra distribuida en 4 vasos	104
Figura N° 4.14	Modificación de los pH.....	104
Figura N° 4.15	Sedimentación de la muestra del agua residual de curtiembre.....	105
Figura N° 4.16	Filtración del agua residual pre tratada	105
Figura N° 4.17	Equipo de Electrocoagulación a nivel laboratorio	106
Figura N° 4.18	Determinación del pH de la muestra M1	107
Figura N° 4.19	Determinación del pH y Conductividad de muestra M2.....	108
Figura N° 4.20	Determinación del pH y Conductividad de muestra M3.....	108
Figura N° 4.21	Determinación del pH y Conductividad de muestra M4.....	109
Figura N° 4.22	Determinación del pH y Conductividad de muestra M5.....	110
Figura N° 4.23	Determinación del pH y Conductividad de muestra M6.....	110
Figura N° 4.24	Determinación del pH y Conductividad de muestra M7.....	111

Figura N° 4.25	Determinacion del pH y Conductividad de muestra M8.....	112
Figura N° 4.26	Filtro de arena y carbón.....	112
Figura N° 4.27	Muestras finales tomadas para su analisis de Cromo y DQO.....	113
Figura N° 5.1	Curva de la isoterma de adsorcion de langmuir	119
Figura N° 5.2	Curva de la isoterma de adsorción de freundlich	120

INDICE DE GRAFICOS

Grafico N° 5.1	Metodo de electrocoagulacion a nivel laboratorio	114
Grafico N° 5.2	Demanda Quimica de Oxigeno despues de electrocoagulacion.....	122
Grafico N° 5.3	Cromo después de la electrocoagulación	123
Grafico N° 5.4	Variación del pH después de la electrocoagulación	124
Grafico N° 5.5	Variación de Conductividad después de electrocoagulación.....	125
Grafico N° 5.6	Porcentaje de remoción del Cromo y DQO.....	128

RESUMEN

La finalidad de este trabajo es el tratamiento de aguas residuales de la industria curtiembre mediante el método de electrocoagulación para la reducción de la demanda química de oxígeno y Cromo, la cual se realizó mediante la aplicación de la corriente eléctrica usando electrodo ánodo de sacrificio el aluminio y electrodo cátodo de hierro.

La reducción de la demanda química de oxígeno y el cromo se realiza en cuatro etapas: la primera etapa es la sedimentación del agua residual industrial, la segunda etapa es el proceso de filtración (con bomba de succión al vacío), la tercera etapa es el método de electrocoagulación y la última etapa es el filtro de arena y carbón activado. Se realizó 8 experiencias en el laboratorio obteniendo los siguientes parámetros de operación óptimos: intensidad de corriente 20 amperios, caída de tensión 30 voltios y tiempo de trabajo 35 minutos obteniéndose una remoción de la demanda química de oxígeno 90.1% y una remoción del cromo del 99.99%.

Con las condiciones óptimas trabajadas experimentalmente la demanda química de oxígeno y el cromo, obtenido cumple con los estándares de calidad de la norma D.S N° 021-2009-VIVIENDA.

Palabras clave: tratamiento de aguas residuales, industria de curtiembre, electrocoagulación, demanda química de oxígeno, cromo.

ABSTRACT

The purpose of this work is the treatment of wastewater of the tannery industry by the method of electrocoagulation for the reduction of the chemical demand of oxygen and Chromium, which was realized by the application of the electric current using electrode sacrificial anode aluminum and iron cathode electrode.

The reduction of the chemical demand for oxygen and chromium is carried out in four stages: the first stage is the sedimentation of industrial waste water, the second stage is the filtration process (vacuum suction pump), the third stage is the electrocoagulation method and the last stage is the sand filter and activated carbon. Eight experiments were carried out in the laboratory, obtaining the following optimum operating parameters: current 20 amperes, voltage drop 30 volts and working time 35 minutes obtaining a removal of the chemical demand of oxygen 90.1% and a removal of the chromium of 99.99 %.

With the optimum conditions worked experimentally the chemical oxygen demand and the chromium, obtained meets the quality standards of the standard D.S N°. 021-2009-HOUSING.

Key words: wastewater treatment, tanning industry, electrocoagulation, chemical oxygen demand, chromium.

I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION

1.1. Identificación del problema

Mundialmente se ha reconocido a la industria del cuero como una de las más contaminantes para el medio ambiente debido a que se utilizan procedimientos muy artesanales a través de todo el proceso, especialmente en la curtición. Los efluentes industriales provenientes de curtiembres son unos de los más complejos debido a su tratamiento en lo que se refiere a su composición y al origen de los contaminantes (AUQTIC, 2017)

La mayoría de las industrias producen descargas de agua residual que tienen demanda bioquímica de oxígeno DBO₅ y demanda química de oxígeno DQO muy altas, así como algunos metales pesados, constituyen ello un gran problema ecológico y contribuyen en el deterioro general de la calidad del agua.

En el Perú se encuentra una problemática relacionada con la Industrias curtiembres que se pueden agrupar en empresas pequeñas, medianas y grandes que generan una cantidad de efluentes contaminados con altos niveles de DQO, DBO₅, cromo, sulfuros, amoníaco, nitratos y sólidos en suspensión entre otros materiales.

En la industria curtiembre para la obtención de cuero se utiliza como materia prima las pieles de animales, en este proceso se genera gran cantidad de agua residual con alto contenido de carga orgánica que si se descarga directamente ocasiona efectos negativos al medio ambiente y salud. Por lo que se propone investigar el tratamiento de aguas residuales de la industria de curtiembre mediante el método de electrocoagulación para la reducción de la demanda química de oxígeno y Cromo.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cómo debe ser el tratamiento de aguas residuales de la industria curtiembre mediante el método de electrocoagulación para la reducción de la demanda química de oxígeno y Cromo?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuáles son las características fisicoquímicas de las aguas residuales de la industria curtiembre?
- ¿Cuáles son los parámetros óptimos para el tratamiento de las aguas residuales mediante el método de electrocoagulación para reducir la demanda química de oxígeno y Cromo?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivos General

Realizar el tratamiento de aguas residuales de la industria curtiembre mediante el método de electrocoagulación para la reducción de la demanda química de oxígeno y Cromo.

1.3.2. Objetivo específico

- Determinar las características fisicoquímicas de las aguas residuales de la industria curtiembre.
- Determinar los parámetros óptimos para el tratamiento de las aguas residuales mediante el método de electrocoagulación para reducir la demanda química de oxígeno y Cromo.

1.4. Justificación

La presente investigación de tesis radica en el tratamiento de aguas residuales de la industria curtiembre mediante el método de electrocoagulación para reducir significativamente la demanda química de oxígeno y Cromo, el cual tendrá valiosos aportes por las siguientes razones:

1.4.1. Legal

De acuerdo con el D.S. N° 021-2009-VIVIENDA. Emitido por el ministerio de vivienda, construcción y saneamiento que aprueba los valores máximos admisibles de las descargas de aguas residuales en el sistema de alcantarillado sanitario aprobado por D.S. N° 003-2011-vivienda a fin de evitar el deterioro de las instalaciones, infraestructura sanitaria, maquinarias, equipos y asegurar su adecuado funcionamiento, garantizando la sostenibilidad de los sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales. El cual establece que el DQO y Cromo debe estar en 1000 mg/L y 10 mg/L respectivamente.

1.4.2. Teórica

La investigación propuesta busca, reducir el nivel de contaminación generado en las aguas residuales de la industria curtiembre aplicando el método de la electrocoagulación y los conceptos básicos de Faraday en la electroquímica.

1.4.3. Tecnológicas

Se aplicará el proceso de electrocoagulación, siendo esta una tecnología limpia. Puesto no se agregaría reactivos químicos debido a que se utilizara la corriente continua para el tratamiento de las aguas residuales industriales.

1.5. Importancia

La presente investigación radica su importancia no solo en contribuir como una alternativa en el tratamiento adecuado de efluentes residuales industriales, sino además en remover los parámetros de cromo y la demanda química de oxígeno los cuales son nocivos para la salud y el medio ambiente, utilizando la corriente eléctrica el cual es una fuente de energía renovable.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

(IVONNE LINARES, 2011), desarrollo una investigación cuyo objetivo de esta investigación fue implementar un sistema electroquímico, mediante tratamientos de electrocoagulación, empleando electrodos de hierro y oxidación anódica directa (OAD), empleando electrodos de diamante dopados con boro (DDB), para tratar aguas residuales provenientes de una planta de tratamiento que recibe las descargas de 144 empresas de diferentes giros, de la zona industrial Toluca-Lerma, México. Los resultados de estos tratamientos indicaron una remoción del 99% de la demanda química de oxígeno (DQO), 99% de color y 97% de turbidez, en un tiempo de 2 h. En el sistema acoplado, la electrocoagulación removió las partículas coloidales y suspendidas y la OAD, permitió la degradación de materia orgánica persistente. Se determinó la cantidad de lodos generados en el sistema y se caracterizaron por microscopia electrónica de barrido y análisis elemental.

Se concluye que los métodos electroquímicos resultan ser aplicables y eficientes en la degradación compuestos que no son fácilmente biodegradables.

(PEREZ CUASQUER, 2015), desarrollo una investigación cuyo objetivo de esta investigación fue el estudio de procesos electroquímicos: electrocoagulación y electrofenton, como alternativas para el tratamiento de aguas residuales de una industria textil mediante el control de los parámetros: demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos, turbidez, color, pH y hierro, para el cumplimiento de la

norma vigente. Se sometió el efluente a electrocoagulación en un reactor electroquímico de laboratorio, definiendo como variables operacionales el pH, potencial, densidad de corriente (ρ) y tiempo. Se obtuvo el mejor porcentaje de remoción de DQO, variable tomada como respuesta, a las siguientes condiciones: pH 5, potencial 15 V, ρ 160 A/m² y tiempo 30 minutos. A estas condiciones por electrocoagulación se trataron dos muestras, Ef₁ menos y Ef₂ más contaminadas; y mediante el control de los parámetros indicados se determinó que el tratamiento de Ef₁ cumple con la norma y que el de Ef₂ no; por lo que se la trató mediante dos procesos de electrofenton: 1) con H₂O₂ y 2) con sales de hierro, logrando los mejores resultados con dosificaciones de 150 ppm y 50 ppm respectivamente y una modificación del pH entre 2-3 para los dos casos.

Se concluye que dichos procesos electroquímicos son tratamientos aplicables para estos efluentes industriales, logrando valores permisibles de descarga de acuerdo a la norma y obteniendo porcentajes de remoción de DQO: 86 % aplicando electrocoagulación, 99% con el proceso 1 de electrofenton y de 93% con el otro.

(OÑA PAZMIÑO, 2013). desarrollo una investigación cuyo objetivo fue realizar un análisis de los diferentes métodos para tratamientos de aguas residuales, enfocándonos principalmente en el tratamiento por electrocoagulación, estudiando sus ventajas, desventajas y sus diferentes formas de funcionamiento.

Se realizó un análisis del impacto ambiental que está generando la empresa, especialmente en el recurso agua.

Se realizaron una serie de experimentos para poder determinar el método más eficiente, teniendo al tratamiento por electrocoagulación como el más idóneo para poder tratar el agua residual de la industria textil, luego de este análisis se procedió a construir el prototipo de una planta de tratamiento de aguas mediante electrocoagulación, que consta de un tanque ecualizador, una celda de electrocoagulación, un sistema de remoción de lodos mediante barrido y un tanque sedimentador; éste proceso está semi-automatizado.

Con el prototipo se logró verificar que el método de electrocoagulación logra remover los parámetros críticos del agua, haciendo que éstos cumplan con la norma respectiva, cabe recalcar que se obtuvo una mayor eficiencia en la remoción del color, logrando reducirlo en un 96%.

(BARBOZA PALOMINO, 2011), desarrollo una investigación, la cual consistió en la aplicación del método de electrocoagulación con electrodos de sacrificio de aluminio para reducir la carga de contaminantes de las aguas residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “La Totorá” – Ayacucho. Los ensayos se realizaron en los laboratorios de Análisis Instrumental de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga – Ayacucho, Laboratorio de Electroquímica de la Universidad Nacional de Ingeniería - Lima. El trabajo de investigación comprendió dos etapas:

- Determinación de las características físicas, químicas y biológicas de las aguas efluentes y receptoras de la PTAR – “La Totorá”.

- Aplicación de la técnica de electrocoagulación para el tratamiento de las aguas del efluente de la PTAR “La Totorá”.

La aplicación del método de electrocoagulación a las aguas en estudio resultó ser muy efectivo en el propósito de reducir la carga de contaminantes porque su aplicación permitió la remoción de turbidez, sólidos totales, sólidos disueltos, alcalinidad, dureza total, coliformes fecales y materia orgánica expresada como disminución de DBO₅.

La aplicación de 25 minutos de electrocoagulación a las muestras de agua, utilizando una densidad de corriente de 12,5 mA/cm² y 21 – 23 V, con pH de trabajo regulado a 7,33 - 7,34 permitió obtener 94,65% de remoción de turbidez, 65,1 % de remoción de coliformes fecales y 64,8 % de disminución de DBO₅, logrando mejorar la calidad del agua al reducir la turbidez y disminuir el valor de DBO₅ a 14,75 mg O₂/L, valor que se encuentra dentro de los límites permisibles.

Según los Estándares de Calidad Ambiental del Agua (ECA) para agua de categoría 3. El porcentaje de remoción de coliformes fecales puede aumentar hasta un valor de 93% para un tiempo de proceso de 45 minutos, sin embargo, para esta prueba se sugiere mejorar el diseño de los electrodos. Una de las bondades de este método es que casi la totalidad de los iones Al³⁺ producidos durante el proceso electrocoagulación participan en la desestabilización de los coloides y al mismo tiempo en la formación del precipitado de hidróxido de aluminio, quedando sólo un 1,27 % de aluminio residual en la muestra tratada, hecho que permitió que la concentración de aluminio residual dentro de los límites permisibles según ECA para

agua de categoría 3; en la actualidad donde el fenómeno ambiental está tomando cada vez mayor interés la efectividad de este método para la remoción de contaminantes lo perfila como un método prometedor de limpieza y purificación para tratamiento de agua.

(ARIAS CEPEDA, 2013). La presente tesis documenta el uso experimental de la electrocoagulación a escala banco como proceso para disminuir el Cromo y DQO (Demanda Química de Oxígeno) presente en las aguas residuales de una curtiembre en la región Cundiboyacense. Las variables experimentales incluyen el pH inicial (5 a 7) del agua del afluente, la amplitud de la corriente eléctrica (2,1A a 3,6A) y el uso de dos tipos de corriente diferentes: corriente continua (DC) y corriente alterna (AC de 1 mHz a 11 mHz) esta última con una modificación que la hacía pulsante (2kHz a 4 kHz) en cada hemicycle (PAC). Mediante el uso de dos tratamientos (DC y PAC) se lograron remociones cercanas al 95% de Cromo (Cr) y del 70% de la demanda química de oxígeno (DQO) en 20 minutos de proceso.

2.2. Marco conceptual

2.2.1. Aguas residuales

Aquella que procede de haber utilizado un agua natural, o de la red, en un uso determinado (METCALF & AMP, EDDY INC, 1996). Las aguas residuales cuando se desaguan se denominan vertidos y éstos se clasifican en función:

- ✓ Del uso prioritario u origen
- ✓ De su contenido en determinados contaminantes

Los vertidos residuales arrastran compuestos con los que las aguas han estado en contacto. Estos compuestos pueden ser:

Según su Naturaleza:

- **Conservativos:** Su concentración en el río depende exactamente de la ley de la dilución del caudal del vertido al del río. Generalmente: Compuestos Inorgánicos y estables. (METCALF & AMP, EDDY INC, 1996)
- **No Conservativos:** Su concentración en el río no está ligada directamente a la del vertido. Son todos los compuestos orgánicos e inorgánicos que pueden alterarse en el río por vía Física, Química o Biológica (NH₄, fenoles, Materia Orgánica...) (METCALF & AMP, EDDY INC, 1996).

a) Clasificación de las aguas residuales

- **Aguas residuales industriales:** Proceden de los procesamientos realizados en fábricas y establecimientos industriales y contienen aceites, detergentes, antibióticos, ácidos y grasas y otros productos y subproductos de origen mineral, químico, vegetal o animal. Su composición es muy variable, dependiendo de las diferentes actividades industriales. (ESPIGARES GARCÍA, 2017)
- **Aguas residuales domésticas:** Las aguas residuales domésticas se componen fundamentalmente, en su carga contaminante, de materia orgánica en forma soluble o coloidal y de sólidos en suspensión. (RAMALHO, 1990)

b) Clasificación del tratamiento de aguas residuales Para la reducción de la contaminación de aguas residuales existen procesos físicos, químicos y biológicos, estos de acuerdo con las necesidades del efluente, se pueden utilizar de forma individual o combinados, a continuación (véase en la Tabla N° 2.1) se realiza una explicación de cada uno de ellos. (METCALF & AMP, EDDY INC, 1996)

TABLA N° 2. 1
ETAPAS DEL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL

TIPO DE TRATAMIENTO	OPERACIONES O PROCESOS UNITARIOS
Preliminares	Dilaceración, desbaste, filtración, flotación, remoción por gravedad, tanque Imhoff, filtración por membrana, remoción de grasas y aceites, tamizado grueso y fino y micro tamizado.
Primarios	Tamizado, sedimentación primaria
Secundarios	Lodos activados, reactores de lecho fijo, sistemas de lagunaje, sedimentación secundaria, deshidratación.
Terciarios	Coagulación química, floculación, sedimentación seguida de filtración y carbón activado. Intercambio iónico, osmosis inversa, electrocoagulación.

Fuente: (METCALF & AMP, EDDY INC, 1996)

2.2.2. Valores Máximos Admisibles de aguas residuales no domésticas

La presente norma regula mediante los Valores Máximos Admisibles (VMA) las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario a fin de evitar el deterioro de las instalaciones, infraestructura sanitaria, maquinarias, equipos y asegurar su adecuado funcionamiento, garantizando la sostenibilidad de los sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales.

Los VMA, son aplicables en el ámbito nacional y son de obligatorio cumplimiento para todos los usuarios que efectúen descargas de aguas residuales no domésticas en el alcantarillado sanitario; su cumplimiento es exigible por las entidades prestadoras de servicios de saneamiento (D.S N°02-2009-VIVIENDA, 2009)

Entiéndase por Valores Máximos Admisibles (VMA), como aquel valor de la concentración de elementos, sustancias o parámetros físicos y/o químicos, que caracterizan a un efluente No doméstico que va a ser descargado a la red de alcantarillado sanitario, que al ser excedido en sus parámetros aprobados (véase tabla N° 2.2, y Tabla N° 2.3 en la página 22) causa daño inmediato o progresivo a las instalaciones, infraestructura sanitaria, tratamiento de aguas residuales y tiene influencias negativas en los procesos de tratamiento de aguas residuales (D.S N°02-2009-VIVIENDA, 2009)

TABLA N° 2.2

PARÁMETROS ORGÁNICOS

PARÁMETRO	UNIDAD	EXPRESIÓN	VMA PARA DESCARGAS AL SISTEMA DE ALCANTARILLADO
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)	mg/L	DBO5	500
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	DQO	1000
Sólidos Suspensos Totales (SST)	mg/L	SST	500
Aceites y Grasas (AyG)	mg/L	AyG	100

Fuente: (D.S N°02-2009-VIVIENDA, 2009)

TABLA N° 2.3

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS

PARÁMETRO	UNIDAD	EXPRESIÓN	VMA PARA DESCARGAS AL SISTEMA DE ALCANTARILLADO
Aluminio	mg/L	Al	10
Arsénico	mg/L	As	0.5
Boro	mg/L	B	4
Cadmio	mg/L	Cd	0.2
Cianuro	mg/L	CN	1
Cobre	mg/L	Cu	3
Cromo hexavalente	mg/L	Cr ⁺⁶	0.5
Cromo total	mg/L	Cr	10
Manganeso	mg/L	Mn	4
Mercurio	mg/L	Hg	0.02
Níquel	mg/L	Ni	4
Plomo	mg/L	Pb	0.5
Sulfatos	mg/L	SO ₄ ⁻²	500
Sulfuros	mg/L	S ⁻²	5
Zinc	mg/L	Zn	10
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	NH ⁺⁴	80
pH ⁽²⁾		pH	6-9
Sólidos Sedimentables ⁽²⁾	mL/L/h	S.S.	8.5
Temperatura ⁽²⁾	°C	T	<35

Fuente: (D.S N°02-2009-VIVIENDA, 2009)

Mediante el Decreto Supremo N°001-2015-VIVIENDA; Se modifican diversos artículos del Decreto Supremo N°021-2009 VIVIENDA, que aprobó los Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario, así como de su Reglamento, aprobado mediante Decreto Supremo N°003-2011 VIVIENDA y modificado por el Decreto Supremo N°010-2012-VIVIENDA. (véase en la tabla N° 2.4)

TABLA N° 2.4
MODIFICATORIA DE LOS VMA

PARÁMETRO	UNIDAD	EXPRESIÓN	VMA PARA DESCARGAS AL SISTEMA DE ALCANTARILLADO SANITARIO
Aluminio	mg/L	Al	10
Arsénico	mg/L	As	0.5
Boro	mg/L	B	4
Cadmio	mg/L	Cd	0.2
Cianuro	mg/L	CN	1
Cobre	mg/L	Cu	3
Cromo hexavalente	mg/L	Cr ₆	0.5
Cromo total	mg/L	Cr	10
Manganeso	mg/L	Mn	4
Mercurio	mg/L	Hg	0.02
Niquel	mg/L	Ni	4
Plomo	mg/L	Pb	0.5
Sulfatos	mg/L	SO ₄ ²⁻	1000
Sulfuros	mg/L	S ²⁻	5
Zinc	mg/L	Zn	10
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	NH ₄ ⁺	80
pH	unidad	pH	6-9
Sólidos Sedimentables	mL/h	S.S.	8.5
Temperatura	°C	T	<35

Fuente: (N°01-2015-VIVIENDA, 2015)

2.2.3. Industria curtiembre en el Perú

La industria de cueros ha sido una de las primeras en instalarse. Hoy en día existen más de 200 curtiembres situadas en su mayoría en Lima, Trujillo y Arequipa. La producción de cuero crudo en el Perú depende de la población de animales con pieles de valor comercial.

La industria del cuero en el Perú se encuentra en estado crítico debido a la presencia de fuerzas internas y externas. Muchas curtiembres formales han cerrado. Frecuentemente, los operadores y empleados de una curtiembre formal que cierra han reaparecido como curtiembres informales. Muchas curtiembres formales inclusive alquilan sus servicios a curtidores informales como un medio para generar ingresos. (MERA RIVERA, 2010).

Las curtiembres formales, que alguna vez estuvieron lejos de las zonas residenciales, ahora se encuentran rodeadas de casas. Los residentes están indignados por el agua sin tratar y los desechos sólidos que generan las curtiembres vecinas y los malos olores. Muchos curtidores informales operan dentro de sus propias casas, rodeados de sus vecinos que sufren las consecuencias, (MERA RIVERA, 2010).

La globalización continuará haciendo que la industria del cuero y calzado del Perú sea vulnerable al ataque de zapatos importados baratos. Es muy probable que el número de curtidores formales continúe disminuyendo. La disponibilidad de zapatos de cuero a menor precio provenientes de otros países también ha deprimido la demanda por cuero y calzado peruano, (MERA RIVERA, 2010).

Las principales Empresas de Curtiembre de Perú son:

- Curtidos Peruanos S.A.
- Curtiduría El Porvenir
- Curtiduría Chimú Murgia Hnos.
- Curtiduría El Cortijo
- Curtiduría El Diamante
- Curtiduría La Colonial
- Curtiembre La Estrella
- Curtiembre La Pisqueña
- Curtiembre La Unión
- Curtiembre Panamericana
- Curtiembre Trujillo
- Curtiembre Regional del Norte
- Curtiembre Vizcarra

2.2.4. Proceso de contaminación de la industria curtiembre

La industria curtiembre se caracteriza por su elevado consumo de agua, así como por la gran cantidad y variedad de compuestos usados en las diferentes operaciones. Dichos efluentes presentan generalmente elevados valores de DQO, altas temperaturas, alto contenido en color, pH inestable, sólido en suspensión y compuesto orgánico. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

A continuación, se hace una rápida descripción de los procesos que tienen relación con la contaminación del agua usada en la industria curtiembre por lo que es importante definir cada una de las actividades. (Véase la Figura N° 2.1 en la página 26)

2.2.5. Descripción del proceso

La producción de cueros se realiza en tres etapas básicas.

- Primera etapa:

Consiste en la eliminación de pelos, grasas, etc., restando una red, compleja de fibras proteicas. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

- Segunda etapa:

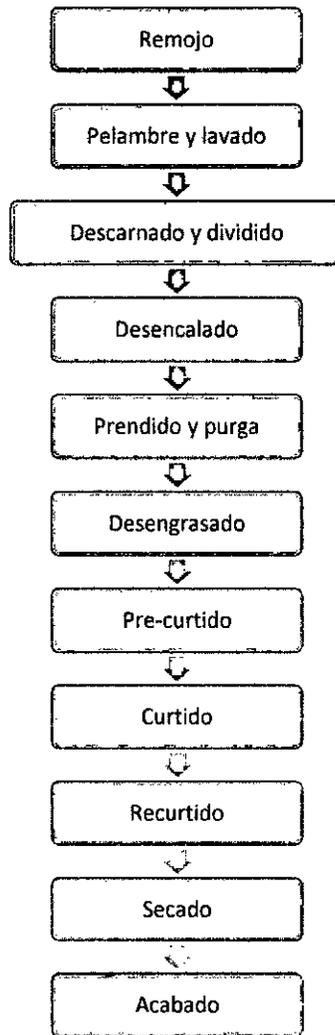
Se basa en la reacción de esta red proteica con las sustancias curtientes agregadas con la finalidad de producir una estructura fibrosa estabilizada. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

- Tercera etapa:

Es la destinada a impartir a de cuerpo, calor, suavidad y una terminación adecuada las fibras curtidas determinadas características lubricación produciendo a la superficie fibrosa. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

FIGURA N° 2.1

PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL CUERO



Fuente: (CARRANZA NORIEGA, 2002)

a) Remojo

Esta operación tiene por objeto hacer que la piel conservada adquiera la blandura y elasticidad de una piel fresca, mediante reabsorción del agua eliminada durante la conservación, al mismo tiempo se eliminan las sustancias extrañas (tierra, sal, sustancias proteicas, sangre).

El remojo influye notablemente en la calidad del cuero; una piel mal remojada implica que, en los procesos posteriores, las zonas no hidratadas no reciben los químicos necesarios dado que el agua es el vehículo de transporte. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

La duración de esta operación depende del grado de humedad que tenga la piel, en el caso de las pieles de camal exigen un lavado para acelerar el reblandecimiento agregándose generalmente productos auxiliares.

Este efecto se logra también en casos especiales con cantidades mínimas de sulfuro de sodio, carbonato de sodio, bajo nivel de PH en aproximadamente 10. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

El remojo se realiza en batanes con una agitación lenta de 2 a 4 rpm, clasificándolos en:

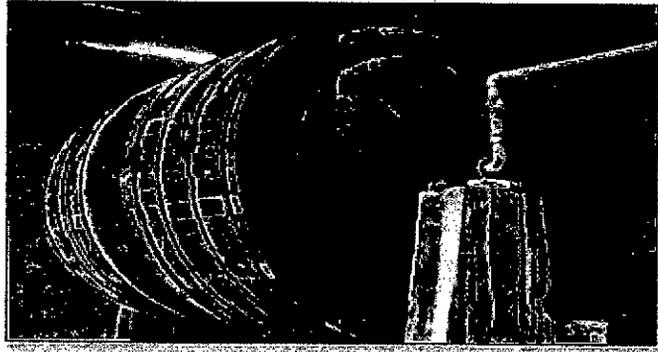
- Remojo corto de 4 a 6 horas, con baños de 24 a 28°C.
- Remojo durante la noche, con baños de 20 a 24°C.
- Remojo de 20 – 24 hasta 48 horas, con baños de 20°C.

Son comunes los cambios de baños para disminuir la concentración de la sal, que al final del remojo debe ser de 5° Be aproximadamente.

Los batanes que se usan vienen acondicionados con temporizadores programados para rodar y parar cada determinado periodo, de manera que la piel no se maltrate por excesivo trabajo mecánico. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

FIGURA N° 2.2

ETAPA DE REMOJO EN LOS BOTALES



Fuente: (PINEDO OCHOA, 2012)

b) Pelambre

Es una operación que consiste en eliminar el pelo, lana y epidermis por diversos métodos. Se realiza por embadurnamiento (cuando se requiere conservar la lana) o por contacto directo en batanes con agitación lenta de 2 a 4 rpm. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

La acción principal de los productos químicos usados es soltar y destruir la epidermis y el pelo, produciéndose un hinchamiento en la estructura fibrosa, resultando un aflojamiento de la piel, además de una saponificación parcial de la grasa natural. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

En el caso de realizar el pelambre por embadurnamiento, se aplica una pasta por el lado de la carne hasta la raíz, de manera que suelte el pelo.

La pasta que se utiliza se prepara con sulfuro de sodio concentrado y cal, agregando pequeñas cantidades de humectante para conseguir un efecto parejo.

La combinación de cal con sulfuro de sodio forma sulfhidratos de calcio, con un poder notable para el depilado y apelmbrado de las pieles, dando un cuero resistente; la duración del curtido es mayor, obteniéndose mejor rendimiento y resultados. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

FIGURA N° 2.3

PIEL LUEGO DE LA ETAPA DE PELAMBRE



Fuente: (PINEDO OCHOA, 2012)

c) Lavado

Una vez concluido el proceso de pelambre se escurre y se lava con tapa rodante aproximadamente 10 mm, se escurre y repitiendo la operación, se llena el batán nuevamente con agua y se tiran las pieles para descarnarlas.

El lavado se realiza con la finalidad de hacer posible el manipuleo sobre la maquina descarnadora. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

d) Descarnado

La piel llamada a esta altura tripa, se coloca la carne arriba entre los rodillos de la maquina descarnadora. Pisando el pedal se pone en movimiento el mecanismo de empuje de los cilindros transportadores que harán apretar el cuero con el cilindro de

cuchillas que gira a gran velocidad, cuando sale la tripa de la maquina se pisa el pedal y los cuchillos vuelven a su posición inicial. Se repite la operación por el lado de la tripa que falta descarnar. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

FIGURA N° 2.4

MÁQUINA DE DESCARNAR

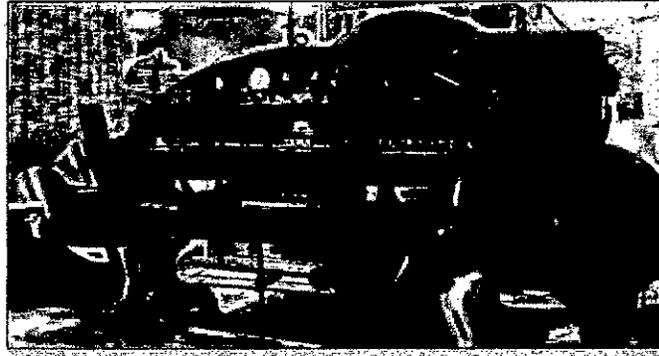


Fuente: (PINEDO OCHOA, 2012)

e) Dividido

Después del descarnado la piel se coloca sobre una mesa con la flor hacia arriba, se recorta las piltrafas de los flancos y luego se divide simétricamente a lo largo del lomo, obteniéndose dos lados. Estos lados se colocan en cajones con tara estandarizada para llevarlos a la balanza y luego a los batanes de desencale. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

FIGURA N° 2.5
MÁQUINA DE DIVIDIR



Fuente: (PINEDO OCHOA, 2012)

f) Desencalado

Tiene por finalidad eliminar la cal absorbida por la tripa durante el apelmbrado y encalado. Se controla observando la textura de la piel, por igual a la de una recién desollada. También se controla al corte con solución de fenolftaleína la que debe dar reacción incolora; es la más efectiva. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

En el desencalado se utilizan sustancias que tienen efecto contrario a los del pelambre, mientras que los últimos hinchan a la tripa, los desencalantes la deshinchon, mostrando una piel caída. Este efecto debe ser controlado para evitar el soplado de la piel. Los desencalantes son en su mayoría ácidos orgánicos y sus respectivas sales amoniacaes o también productos compuestos con efectos especiales. El desencalado se realiza en batanes de menor capacidad que los desapelambrado y se opta de 8 a 12 rpm. (CARRANZA NORIEGA, 2002)

g) Prendido y Purga

Tiene por finalidad obtener una flor lisa, fina, elástica y limpia. Para lograr esto se utiliza rindentes que vienen a ser enzimas (proteasas) que actúan sobre las sustancias proteicas.

El efecto de la purga tiene que ser controlado para evitar una degradación total de la estructura fibrosa de la piel, la prueba más efectiva es la de la huella, la que consiste en tomar la piel y aprisionar entre los dedos pulgar e índice observando la huella de estos que desaparecen en algunos segundos. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

La purga sigue al desencalado en el mismo baño y cuando se da por terminado se escurre y lava con abundante agua hasta que el baño entre de un color rosa apenas perceptible con la solución de fenolftaleína. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

h) Desengrasado

La piel en tripa contiene una parte de grasa natural según la raza, procedencia y tipo de alimentación, estudios sobre la materia nos muestran que: el ganado vacuno contiene de 2 a 5% de grasa natural, el ganado caprino de 2 a 10% y el ganado ovino de 5 a 30%. En el proceso de tratamiento con cal, se emulsiona parte de la grasa y por adición de productos humectantes y desengrasantes el efecto es mejorado. Los vacunos generalmente no necesitan de este tratamiento en cambio los caprinos y ovinos requieren un tratamiento especial en tripa, durante el piquelado o durante el romado; de no realizarse el desengrasado el proceso de curtido se retardaría, trayendo como consecuencia el maltrato de la piel por el excesivo trabajo. (CARRANZA NORIEGA, 2002)

i) Pre-Curtido ("Pickle")

Se realiza para preparar las pieles para el curtido.

La piel desencalada y purgada es tratada en un baño de sal y luego acidulada con la finalidad de que la reacción con la curtiembre no sea brusca y disminuya la astringencia por medio del aumento de los grupos amino y la descarga de los grupos acetato del colágeno. El baño de sal debe ser natural con una concentración de 6 a 8 % para evitar el hinchamiento ácido de la tripa.

La sal usada comúnmente es el Cloruro de Sodio por su bajo costo y en casos especiales el Sulfato de Sodio con una concentración de por lo menos 6° Be.

El ácido sulfúrico y el fórmico pueden ser mezclados generalmente para este propósito. El fórmico es más efectivo; pero más caro. También se pueden utilizar ácido clorhídrico o láctico con mucho cuidado, pues el clorhídrico es muy fuerte, en tanto que el láctico es demasiado débil. Tanto el ácido sulfúrico como el fórmico pueden ser mezclados en partes iguales para lograr un buen atravesado en pieles gruesas.

El "Pickle" se realiza en el mismo batán de desencale y haciendo rodar las pieles en baño de sal por no menos de 20 minutos, antes de agregar al ácido diluido de en frío.

El proceso se da por concluido cuando la piel presente en el corte un PH de 3,5 a 3,8 que se verifica por el color amarillo de la reacción con una solución verde de Bromocresol. En el caso de curtición vegetal se recomienda un PH de 3,8 a 4 que se verifica con el color ligeramente verdoso del mismo indicador. (CARRANZA NORIEGA, 2002)

j) Curtido

Con el curtido se logra la estabilización de la piel frente a los productos químicos, los curtientes actúan al nivel del colágeno produciendo la reticulacion de sus cadenas proteicas. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

La curtición se realiza de acuerdo al tipo de cuero que se requiere, mediante una variedad de curtientes de diferente origen y con diferentes mecanismos. (CARRANZA NORIEGA, 2002)

➤ Clasificación de Curtientes

• Curtientes Vegetales

Existen diversas plantas que contienen cantidades apreciables de taninos, cuya bondad es transformar las pieles en cueros. Los taninos se encuentran localizados unas veces en las cortezas (pino, mimosa, quebracho, etc), otras en hojas (zumaque, mangle, gambir), y otros en frutos (tara, sauce, eucalipto). (CARRANZA NORIEGA, 2002).

• Curtientes sintéticos

Llamados o conocidos como sintanes.

Se clasifican en dos grupos:

- ✓ Curtientes Fenólicos (Sintanes Aromáticos): Son productos que se utilizan como curtientes de sustitución y blanqueo.
- ✓ Curtientes No Fenólicos: Son productos de curtición auxiliares con efectos de neutralización. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

- **Curtientes Minerales**

Son de usos más común por su bajo costo. Los principales son:

- ✓ Sal de Cromo: Especialmente bajo la forma de Sulfatos.
- ✓ Curtientes de Aluminio y Zirconio: Son más bien recurtientes para pieles curtidas previamente al Cromo. El alumbre (Sulfato de Aluminio y Potasa) se usa para la curtición blanca y de peletería. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

- **Curtientes Resínicos y Alifáticos**

Estos comprenden tres grupos:

- ✓ Grupo Resinas: Son productos de policondensación y polimerización de urea, melanina y otros con formol, acrilatos empleados fundamentalmente en recurtición. (CARRANZA NORIEGA, 2002).
- ✓ Grupo Aldehído: Pertenecen a este grupo el formaldehído y el glutardialdehído. (CARRANZA NORIEGA, 2002).
- ✓ Grupo Grasa: Son derivados de parafinas y grasas sulfocloradas, sulfonatos de alcoholes de grasa, aceites de pescado. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

- **Curtido al Cromo**

Es el tipo de curtición más importante, siendo sencillo y seguro, se realiza en relativo corto tiempo es fácil de regular y controlar. El curtido se realiza en batanes con agitación de 12 y 14 rpm; en tres fases: pickle, curtición y alcalización. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

Los cueros curtidos al Cromo tienen mayores cualidades que los curtidos con vegetales así la resistencia a la tracción es doble o mayor, tiene menor peso específico, resiste mejor al calor, frío, sol, agua.

La piel curtida al cromo resiste la ebullición media hora, y al agua fría tiempo indefinido y los ácidos sin alterarse. Sin embargo, la curtición al Cromo no es recomendable para suelas, por ser resbaladiza y menos rígida, sujeta al alargamiento y deformación. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

- **Curticion Vegetal**

Este tipo de curtición hoy en día resulta muy costoso, usándose solo para la fabricación de suelas debido a las propiedades que les confiere, como son: rigidez, porosidad y resistencia a la deformación y alargamiento. En el caso del cuero se utilizan curtientes vegetales para la recurtición para mejorar sus propiedades. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

- **Curticion con Alumbre**

Hoy en día se utiliza para la curtición de cuero blanco de cabritilla y cordero en peletería. Los cueros curtidos con alumbre son poco estables, si no están bien engrasados, lavando con agua se elimina la mayor parte de alumbre absorbido. La cualidad de este curtido es que presenta un cuero elástico. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

El exceso de sal disminuye la acción curtiente del alumbre. Prácticamente las soluciones con un pH de 3 a 4 y menores carecen de acción curtiente. Si se hierve el cuero con alumbre se eliminan completamente las sales de aluminio y la piel se

transforma en una sustancia gelatinosa, por acción de los ácidos también se obtiene una transformación de la piel en tripa. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

Luego de finalizado el proceso de curtición, la piel es sometida a las operaciones de escurrido dividido y rebajado. La piel luego de ser descargada del batán de curtido reposa como mínimo 48 horas sobre parihuelas, luego del cual es escurrido eliminando el agua remanente hasta una humedad adecuada para el manipuleo, para el manipuleo, para no afectar la máquina de dividido. De ahí se obtiene el cuero propiamente dicho (crust) y la carnaza. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

Tanto el cuero como la carnaza son sometidos a operaciones de recortado, donde se eliminan restos inservibles de los costados. El cuero así recortado es entonces rebajado para darle el calibre adecuado, en tanto que la carnaza vuelve a ser dividida y luego rebajada, quedando ambos listos para el proceso de recurtición. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

k) Recurtido

En los trabajos de recurtido, la temperatura, el pH y el nivel del baño influyen decisivamente. Si tenemos baños cortos los recurtientes penetran el interior de la piel sin sobresaturación de la flor, a temperatura de 40 a 50 °C se favorece la fijación de los recurtientes profundamente en el corte de la piel, a bajos PH los recurtientes aniónicos se fijan más frecuentemente y superficialmente. El recurtido se compone de una serie de procesos sucesivos que se diferencian claramente:

- ✓ Neutralización
- ✓ Recurtido

✓ Teñido

✓ Engrase

Se entiende por recurtido al aumento de tanino o de materia curtiente fijada con extractos especiales, así como también el llenado de cuero con productos ordinarios. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

FIGURA N° 2.6

CUERO EN ESTADO RECURTIDO



Fuente: (PINEDO OCHOA, 2012)

l) Secado

El secado se considera como una operación simple, evaporar el agua de la piel, para no influir sobre las características del cuero acabado.

No obstante, la realidad es otra, ya que durante el secado se produce contracción de la superficie, migraciones de diversos productos, formaciones de enlaces entre fibras y productos, etc., es decir existen modificaciones importantes. (CARRANZA NORIEGA, 2002).

Durante el secado se presentan las siguientes operaciones:

- Secado al vacío
- Túnel del secado continuo
- Reposo
- Acondicionado

FIGURA N° 2.7

PROCESO DE SECADO AL VACÍO



Fuente: (PINEDO OCHOA, 2012)

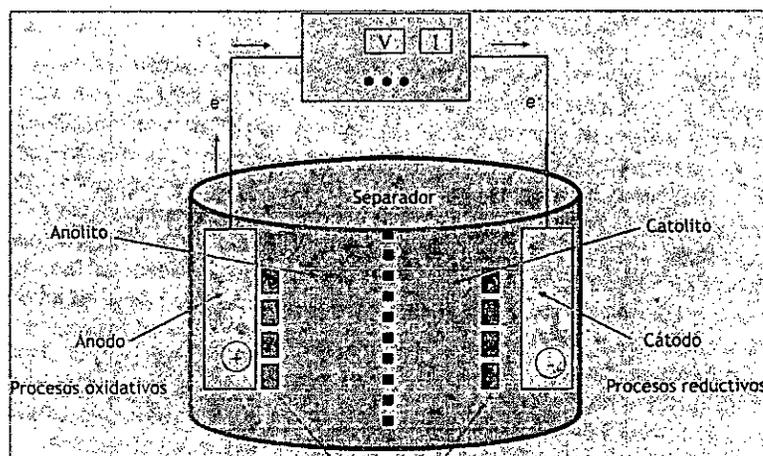
2.2.6. Electrolisis

La electrolisis es una tecnología electroquímica mediante la que se provoca un cambio químico en un líquido por intervención de la energía eléctrica. La energía eléctrica se introduce mediante la aplicación de una diferencia de potencial entre los elementos conductores (electrodos) sumergidos en el líquido. El líquido en el que se provoca la reacción química debe ser conductor y contener sustancias capaces de oxidarse o reducirse. La diferencia de potencial genera un paso neto de corriente eléctrica (electrones) entre los electrodos, con la consiguiente oxidación de algunas

especies en la superficie de uno de los electrodos (ánodo) y la reducción de otras en el otro (cátodo). (BARRERA DIAZ, 2014)

FIGURA N° 2.8

ESQUEMA GENERAL DE UN REACTOR ELECTROLÍTICO



Fuente: (BARRERA DIAZ, 2014)

Como se observa, los dos electrodos están conectados a una fuente de alimentación de corriente continua (o un rectificador), que provoca un transporte de electrones desde uno hasta el otro. El electrodo conectado al polo negativo de la fuente de alimentación se denomina "cátodo", y en él tienen lugar los procesos de reducción (transferencia electrónica desde el electrodo a la especie química).

Los productos reducidos resultantes pueden pasar a formar parte del cátodo (electrodeposición) o pueden continuar en disolución (electrorreducción). El electrodo conectado al polo positivo se denomina "ánodo", y en él tiene lugar la oxidación (transferencia electrónica hacia el electrodo desde la especie química de algún compuesto presente en la disolución (electrodisolución), o bien la oxidación de

parte del material electrodo (electrodisolución). Para mantener el balance de cargas es necesario que dentro de la celda exista transporte de carga. Por este motivo es necesario que en la disolución existan sales, ya que los aniones de las mismas transportaran cargas negativas hacia el ánodo y los cationes transportaran cargas positivas hacia el cátodo, cerrándose así el circuito de transporte de cargas (eléctrico e iónico). (BARRERA DIAZ, 2014)

El tratamiento electrolítico de aguas, residuales comenzó a estudiarse en la década de los setenta, y se aplicaba fundamentalmente a la destrucción oxidativa de compuestos orgánicos contenidos en el agua residual. Los resultados alcanzados fueron desalentadores ya que, en muchos casos, no se conseguía la mineralización de la materia orgánica, sino la formación de polímeros resistentes al ataque electroquímico, y además los rendimientos en la utilización de energía eléctrica eran bajos, lo que encarecía dramáticamente la aplicación.

Por tal motivo, el uso de esta tecnología se desestimó hasta la década de los noventa, en la que con el uso de nuevos materiales electrodo se ha conseguido superar ambos problemas. No obstante, el tratamiento electrolítico todavía no ha logrado superar las reticencias ocasionadas en el mundo industrial, y tampoco ha salido del laboratorio, aunque estudios económicos demuestran que su costo es inferior en algunos casos al de las tecnologías de referencia en el tratamiento de algunos tipos de efluentes residuales. (BARRERA DIAZ, 2014)

El objetivo del tratamiento electrolítico de aguas residuales es la oxidación o la reducción de los contaminantes contenidos en las aguas, de modo que estas especies se transformen en otras con menor peligrosidad ambiental. (BARRERA DIAZ, 2014)

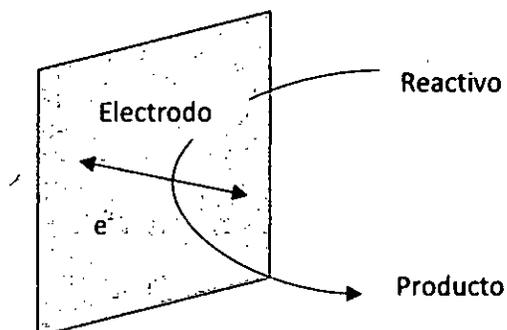
Sin embargo, dado que en las aguas residuales pueden existir otras muchas especies químicas, durante una electrolisis en los electrodos pueden ocurrir reacciones distintas de las de eliminación directa de los contaminantes. Entre ellas están las reacciones de generación de compuestos con capacidad de oxidar o reducir los contaminantes contenidos en el agua residual. Así, si en el agua residual hay cloruros, estas especies químicas pueden oxidarse a cloro/hipoclorito, y este oxidante actuara sobre los contaminantes oxidándolos y convirtiéndolos de esta forma en otras especies químicas.

Esto permite clasificar a las reacciones que ocurren en una celda electrolítica en dos grandes grupos. (BARRERA DIAZ, 2014)

➤ **Reacciones directas.** La transferencia electrónica al producto de interés sucede directamente en la superficie del electrodo. En este caso, las reacciones son de tipo superficial y, en consecuencia, adquieren gran importancia los fenómenos de transporte de contaminantes hacia el electrodo. Para obtener buena eficacia en el proceso debe asegurarse en todo momento que el proceso limitante sea el propiamente electroquímico, y no la transferencia de materia. (BARRERA DIAZ, 2014)

FIGURA N° 2.9

REACCIONES DIRECTAS

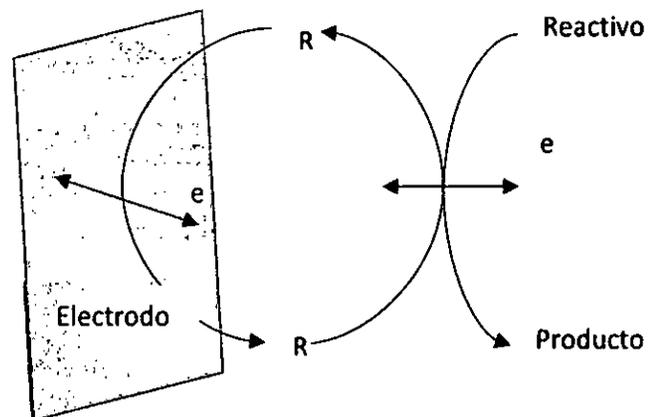


Fuente: (BARRERA DIAZ, 2014)

- **Reacciones indirectas.** La transferencia electrónica se realiza a un mediador, oxidante o reductor inorgánico (Ti^{3+} , Sn^{2+} , CO^+ , Mn^{3+} , Cl^- , Br^- , etc.), que posteriormente reacciona con el compuesto de interés. Al tratarse de reacciones de tipo químico, están muy influenciadas por la temperatura y, como sucede en todo el volumen de reacción, no son tan importantes los procesos de transporte de materia hacia el electrodo. Estas reacciones se clasifican en irreversibles o reversibles, en función de que el mediador pueda o no volver a su estado inicial. (BARRERA DIAZ, 2014)

FIGURA N° 2.10

REACCIONES INDIRECTAS



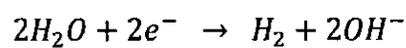
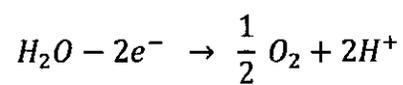
Fuente: (BARRERA DIAZ, 2014)

En algunas ocasiones, para incrementar el rendimiento del proceso electroquímico se añaden al agua residual en tratamiento especies químicas susceptibles de actuar, una vez activadas en los electrodos, como oxidantes o reductores intermedios. Un ejemplo de estos compuestos son los iones cloruro que, una vez oxidados en el ánodo a cloro gas/hipoclorito, incrementan la velocidad de los procesos de oxidación que pueden ocurrir en el reactor electroquímico.

En la selección de estas sustancias hay que tener en cuenta que la velocidad de generación del agente redox en la superficie electrodoica debe ser elevada, y que la velocidad de la reacción química con el contaminante a eliminar debe ser mayor que la de cualquier otra reacción en la que intervenga esta especie. Asimismo, hay que tener en cuenta los factores de peligrosidad de la sustancia adicionada, de modo que

esta no incremente el daño ambiental que ya de por sí ocasionarla el agua residual bruta. (BARRERA DIAZ, 2014)

Así, dos de las reacciones superficiales más importantes que ocurrirán en una celda en la que se electroliza un agua residual son la oxidación anódica y la reducción catódica del agua:



Estas reacciones consumen una parte importante de la energía eléctrica suministrada a la celda, ya que los electrones involucrados en las mismas no se dedican a la oxidación o reducción de los contaminantes que contiene el agua residual, ni a la generación de especies que, indirectamente, realicen esta función. Como consecuencia, disminuirá la eficacia en el uso de corriente eléctrica. (BARRERA DIAZ, 2014)

De esta forma, en los procesos electrolíticos, además de las variables que típicamente inciden en los procesos químicos como el pH, la temperatura, etc., existen otras con igual o superior importancia: la naturaleza del ánodo y el cátodo, la densidad de corriente en la superficie electrodoica, la geometría de la celda, etc. Este mayor número de variables dificulta aún más el estudio de un proceso electroquímico, pero a la vez ofrece la ventaja de una mayor versatilidad de operación, lo que a menudo ha permitido aplicar técnicas electroquímicas a problemas que mediante las técnicas convencionales serían de difícil solución. (BARRERA DIAZ, 2014)

En la actualidad, las principales aplicaciones que se estudian para esta tecnología en el tratamiento de residuos líquidos son la eliminación de la materia orgánica contenida en determinados tipos de efluentes industriales mediante su conversión a dióxido de carbono, y la transformación de esta materia orgánica en otra más sencilla susceptible de ser tratada biológicamente. Los efluentes a los que se suele aplicar esta tecnología proceden fundamentalmente de las industrias químicas, petroquímicas y farmacéuticas, y se caracterizan por tener cargas orgánicas bajas, generadas por materia orgánica biorrefractaria o toxica.

Ejemplos de contaminantes que se han eliminado mediante la vía electroquímica oxidativa son los fenoles, las aminas aromáticas y los compuestos aromáticos nitrados y clorados. En todos estos casos se pueden obtener como productos finales dióxido de carbono y especies inorgánicas de nitrógeno y cloro, si se deja que el tratamiento evolucione hasta la completa oxidación de los componentes. Si el tratamiento se paraliza en un punto intermedio, se pueden obtener aguas residuales susceptibles de ser tratadas biológicamente, ya que la oxidación de los compuestos aromáticos suele llevar, en una primera etapa, a la formación de ácidos carboxílicos, normalmente más biodegradables y menos tóxicos que los compuestos aromáticos en sí. (BARRERA DIAZ, 2014)

Estas técnicas de tratamiento alcanzan su máximo rendimiento cuando la concentración del contaminante en el agua está en el orden de los mg/dm^3 - g/dm^3 . De hecho, la aplicación del tratamiento de efluentes industriales no debe aplicarse para concentraciones superiores a los $10\text{-}20 \text{ g/dm}^3$ de DQO ni inferiores a los $10\text{-}100$

mg/dm³, ya que, tal y como se explica en este capítulo, existen otras tecnologías más adecuadas para trabajar en estos intervalos. (BARRERA DIAZ, 2014)

Los principales parámetros que se requieren en los materiales electródicos son su estabilidad física y química, su conductividad, su capacidad catalítica y, en especial la oxidación del agua.

Básicamente se utilizan dos tipos de electrodos como material anódico para estos procesos: recubrimientos de óxidos metálicos y derivados del carbono. Como ejemplo del primer tipo de material electrodo destacan los recubrimientos de Óxidos de plomo y estaño sobre titanio. La oxidación que se efectúa sobre estos materiales es muy energética y los rendimientos en la utilización de corriente alcanzados son altos. El carbono se ha empleado en forma vitrificada, de fibras, de negro de carbón, de grafito poroso, de carbon activo y de diamante. Precisamente, este último tipo de electrodos ha sido objeto, de numerosos estudios, ya que tiene una gran resistencia química y unas inmejorables propiedades electroquímicas, con elevados sobre potenciales para las reacciones de descomposición del agua, que permiten obtener elevados rendimientos electroquímicos. (BARRERA DIAZ, 2014)

Las reacciones catódicas también se pueden utilizar para descontaminar aguas residuales industriales. Así, en la actualidad se estudia la des halogenación de cloro alcanos, cloro fenoles, transformándolos en compuestos orgánicos con menor toxicidad. Al contrario de lo que ocurría con las electrolisis oxidativas, en este tipo de tecnología es posible que el tratamiento electroquímico no sea el tratamiento final, sino una etapa intermedia del tratamiento, puesto que las características de los

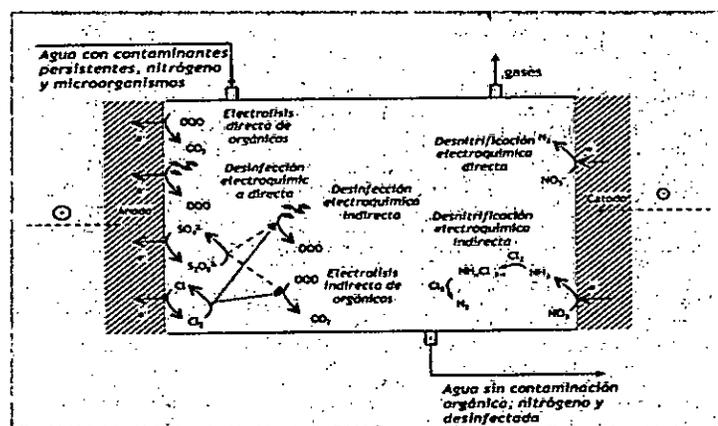
productos generados hacen necesario un posterior tratamiento que consiga la completa descontaminación. (BARRERA DIAZ, 2014)

Como material catódico se han estudiado electrodos basados en carbono fundamentalmente grafito, níquel metálico o en aleaciones, platino y plomo, entre otros. En todo caso, el mayor interés respecto al material catódico es que tenga grandes sobre potenciales para el proceso de evolución de hidrogeno. (BARRERA DIAZ, 2014)

Otra potencial aplicación de las tecnologías electrolíticas es la regeneración de aguas residuales tratadas. Esta tecnología electroquímica tiene tres aplicaciones que, oportunamente, podrían ser combinadas: (véase la figura N° 2.11 muestra un esquema ilustrativo de estos tres procesos durante el tratamiento regenerativo del agua) (BARRERA DIAZ, 2014)

FIGURA N 2.11

APLICACIÓN DE LA ELECTROQUÍMICA AL TRATAMIENTO REGENERATIVO DEL AGUA.



Fuente: (BARRERA DIAZ, 2014)

La desinfección electroquímica es, probablemente, la aplicación más prometedora de los tres procesos electrolíticos. Básicamente, consiste en una electrolisis del agua residual, conducente a la formación de especies oxidantes a partir de los Tones contenidos naturalmente en el agua. Estos oxidantes atacan a los microorganismos contenidos en el agua tratada, destruyéndolos oxidativa mente, proceso que normalmente comienza con la lisis de la membrana celular. Suele ser una tecnología muy efectiva, ya que combina la acción del hipoclorito generado a partir de los cloruros que típicamente contiene un agua, con el efecto sinérgico de otros oxidantes-desinfectantes: tales como los peroxosulfatos, los ferratos, etc. El Único inconveniente que presenta esta tecnología es que, en ocasiones, una praxis no adecuada puede dar origen a la formación de subproductos no deseados, cuya aparición hay que limitar. Además, tiene una enorme ventaja: no deja de ser un proceso de electrolisis. Esto implica que se puede realizar conjuntamente con otros procesos de oxidación anódica (eliminación de compuestos orgánicos biorrefractarios) o catódica (reducción de nitratos), obteniéndose procesos multipropósito que conduzcan a una mejor calidad de las aguas regeneradas. (BARRERA DIAZ, 2014)

En lo que respecta a la utilización de electrolisis para la eliminación de contaminantes orgánicos presentes en aguas depuradas, destaca la destrucción de los contaminantes refractarios a los tratamientos secundarios. Normalmente, estos compuestos refractarios corresponden con especies de origen antropogénico que suelen estar incluidas en la categoría de contaminantes emergentes supone un problema sanitario

y ambiental que aún no está suficientemente investigado y cuya regulación legal es todavía poco satisfactoria, o que están incluidos en las listas de contaminantes prioritarios. Entre ellos, destacan los fármacos y otros productos de higiene personal, los pesticidas y los surfactantes perfluorados y etoxilados, además de múltiples productos ligados a la actividad industrial. (BARRERA DIAZ, 2014)

Una última aplicación de electrolisis en la regeneración de un agua tratada es la eliminación del nitrógeno. En el efluente de un tratamiento secundario, la especie de nitrógeno que predomina es el nitrato ya que, salvo problemas operativos, la mayor parte de los tratamientos biológicos hidrolizan y nitrifican el nitrógeno presente en las aguas residuales. Este nitrato se puede reducir electroquímicamente a nitrógeno gas o a ion amonio. En el primer caso, la eliminación del nitrógeno es inmediata, y también en el segundo, si se utilizan reactores de celda única, ya que el amoníaco reacciona con el hipoclorito generado a partir de la oxidación de los cloruros contenidos en las aguas depuradas para formar secuencialmente monocloramina, dicloramina, tricloruro de nitrógeno y finalmente, nitrógeno gas y cloruros. (BARRERA DIAZ, 2014)

En este punto es importante comentar dos aspectos:

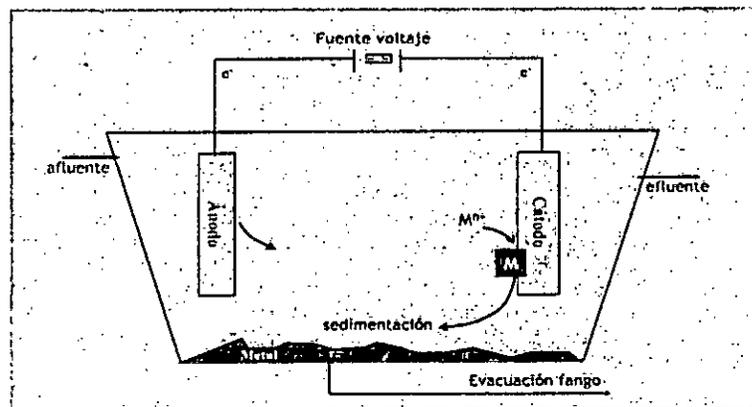
- Si hubiera amonio en el efluente de la planta de tratamiento mal funcionamiento del proceso de nitrificación, la acción del cloruro lo eliminaría.
- Las cloraminas tienen un efecto desinfectante importante, que en la celda electroquímica puede complementar al de las especies oxidantes generadas anódicamente.

Por tanto, se puede emplear la tecnología electrolítica tanto en la desinfección, tratamiento que hay que aplicar siempre en la regeneración de un agua tratada como en la oxidación de contaminantes orgánicos y en la eliminación de nitrógeno, cuando la aplicación que se intente dar al agua regenerada requiera la eliminación de compuestos orgánicos o cuando se pretenda tratar los rechazos de procesos de membrana. (BARRERA DIAZ, 2014)

2.2.7. Electrodeposición

La electrodeposición es un proceso de reducción en el que la especie reducida se deposita como metal sobre la superficie catódica de una celda electroquímica (Figura II.12): Su principal aplicación en el tratamiento de efluentes industriales es la recuperación de metales. En estos procesos no es necesario añadir reactivos al agua residual, con lo que el agua tratada frecuentemente se vuelve a reciclar en el proceso. Además, los costos operativos son bajos, la producción de lodos residuales es mínima y es posible conseguir la deposición selectiva de un metal mediante el control de las condiciones operativas. Por este motivo, y al contrario que el tratamiento electrolítico de efluentes con materia orgánica, esta tecnología está ampliamente extendida en la actualidad. (BARRERA DIAZ, 2014)

FIGURA N° 2.12
PROCESO DE ELECTRODEPOSICIÓN



Fuente: (BARRERA DIAZ, 2014)

Los principales factores que afectan a este proceso son los potenciales de reducción del par redox ion metálico/metal, la composición y concentración de la disolución, el tipo de electrodo y su interacción con los iones metálicos de la solución, y la existencia de reacciones químicas acopladas. (BARRERA DIAZ, 2014)

En la preparación de superficies, el control de las condiciones de operación favorece la aparición de un tipo u otro de depósito. Por ejemplo, la operación a potenciales cercanos al de reducción de ion metálico da lugar a la formación de depósitos compactos. Por el contrario, Si se trabaja a potenciales superiores, se provoca la aparición de depósitos más bastos y polvorientos. Asimismo, para favorecer la formación de depósitos porosos, se puede aplicar un campo magnético durante la electrodeposición, o para cambiar el orden de deposición en una mezcla de varios iones metálicos se pueden adicionar agentes acomplejantes. (BARRERA DIAZ, 2014)

Los principales problemas de esta tecnología se dan si la concentración del ion en disolución es baja. En ese caso, pueden aparecer limitaciones en el transporte de materia y disminuir la eficacia del proceso. Este hecho es especialmente importante en el tratamiento de las aguas residuales ya que, cuando la concentración del metal que se va a eliminar disminuye mucho, el rendimiento también lo hace. Para minimizar el problema es posible programar la evolución de la intensidad de corriente aplicada o implementar una técnica que permita mejorar el transporte de materia (promotores de turbulencia, electrodos tridimensionales, etc.).

Asimismo, la pérdida de rendimiento derivada de la evolución de hidrogeno o de la reducción del oxígeno se ha de minimizar, ya que en principio supone pérdidas energéticas considerables. Para ello, es conveniente utilizar el pH como variable manipulada. Sin embargo, en algunos casos, la evolución de hidrogeno favorece el proceso de electrodeposición al aumentar las burbujas de hidrogeno el coeficiente de transferencia de materia del metal. Además, debe asegurarse que el líquido presente un valor adecuado de la conductividad para disminuir el potencial de celda y el consiguiente consumo energético. (BARRERA DIAZ, 2014)

La concentración del ion metálico también influye en la elección del tipo de reactor electroquímico. Así, se suelen emplear tanques de mezcla completa con electrodos planos para concentraciones altas (mayores de 100 ppm), celdas de flujo con electrodos planos para concentraciones intermedias (entre 10 y 100 ppm) y celdas especiales con electrodos rotatorios o tridimensionales si las concentraciones son bajas (<10 ppm).

Entre los materiales electrónicos más utilizados destacan los de carbón vitreo reticulado, que se obtienen por pirolisis de resinas poliméricas. Como principales ventajas presentan una alta relación superficie/volumen ($>66 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$), elevados coeficientes de transferencia de materia, baja resistencia al flujo hidráulico de líquido y bajas pérdidas de carga. Además, es inerte a muchos contaminantes químicos, presenta una gran estabilidad térmica y electroquímica, presenta un bajo peso específico y un fácil mecanizado. Se ha empleado en la electrodeposición de cobre, cadmio, cromo, plomo, plata, uranio, mercurio y zinc con rendimientos cercanos al 100%. También se utilizan ampliamente electrodos de fibras de carbono y de grafito poroso y, en menor medida, en forma metálica. (BARRERA DIAZ, 2014)

2.2.8. Electrocoagulación

La coagulación asistida electroquímicamente, o electrocoagulación (EC), es un proceso electroquímico en el que, a partir de compuestos procedentes de la disolución de un ánodo, se agrupa la materia coloidal existente en un agua residual, lo que posibilita su conversión en sólidos suspendidos y su separación del agua mediante técnicas convencionales de separación sólido/líquido, tales como la decantación, la flotación y la filtración. Como consecuencia de su disolución, los ánodos van desapareciendo a medida que transcurre el tratamiento, llegando un momento en el que es necesaria su reposición (ánodos de sacrificio).

Un reactor electroquímico para llevar a cabo un proceso de electrocoagulación se compone básicamente de un depósito, en el que se sumergen los dos electrodos el

ánodo o electrodo de trabajo y el cátodo o electrodo inerte y de una fuente de alimentación a la que se conectan los electrodos. Normalmente, el material anódico empleado son planchas de aluminio o de acero. Al establecerse una diferencia de potencial sobre los electrodos de la celda, comienzan los procesos de reducción en el cátodo generalmente, conversión de los protones del agua en hidrogeno y los de oxidación en el ánodo generándose el ion Al^{3+} si el ánodo es de aluminio, o el Fe^{3+} si el ánodo es de acero, estos iones de aluminio o de hierro se hidratan rápidamente.

A continuación, suceden una serie de etapas interrelacionadas en las que se forman tantos hidróxidos insolubles del metal, sobre los que quedan retenidos los contaminantes, como hidroxocomplejos cargados, positiva o negativamente, que permiten la coagulación por neutralización de cargas. (BARRERA DIAZ, 2014)

Un factor importante ligado al proceso de coagulación química y electroquímica es la posibilidad de eliminar otros contaminantes. Distintos de la materia coloidal, existentes en el agua en tratamiento. Así, las partículas generadas en estos procesos (precipitados o floculo) tienen capacidad para adsorber otros contaminantes presentes en el agua, tales como materia orgánica y cationes metálicos o aniones, por lo que esta tecnología también se puede emplear a la hora de eliminar estos contaminantes. En este sentido, se ha descrito la eliminación de fluoruros y nitratos. Asimismo, los precipitados y floculos pueden unirse a especies que precipiten como consecuencia de la adición del reactivo, posibilitando así la eliminación de algunas macromoléculas orgánicas. Ejemplos de este tipo de tratamiento son la eliminación de colorantes en el tratamiento de efluentes residuales procedentes de industrias textiles o la eliminación

de compuestos fenólicos presentes en efluentes de industrias petroquímicas. Esto tiene especial importancia, puesto que se trata de un mecanismo que contribuiría, aunque sea parcialmente, en la eliminación de las especies contaminantes biorrefractarias que se escapan en algunos tratamientos convencionales.

Por otra parte, en el interior de una celda electroquímica, la carga de los coloides facilita su movimiento por el campo eléctrico generado por los electrodos, y la evolución electroquímica de gases oxígeno en el ánodo e hidrógeno en el cátodo genera una mezcla suave. (BARRERA DIAZ, 2014)

Como consecuencia, se favorece el choque entre coloides y, por tanto, la floculación en el interior de la celda electroquímica sin necesidad de la agitación mecánica. Al no haber elementos móviles, se reducen notablemente los gastos de mantenimiento del proceso. A este proceso se le denomina "electrofloculación", y puede realizarse en un reducido espacio los mismos procesos que ocurren en volúmenes superiores en los procesos convencionales. (BARRERA DIAZ, 2014)

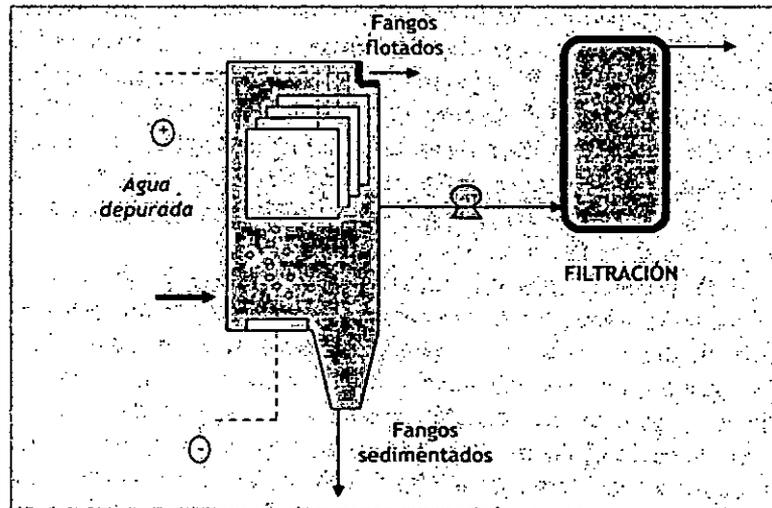
Asimismo, los gases generados en los electrodos pueden adherirse a la superficie de los floculos, con lo que disminuye la densidad del conjunto y es posible su separación por flotación. A este proceso se le conoce como "electro flotación", al igual que la electrofloculación, es un proceso secundario en cualquier proceso de electrocoagulación. Sin embargo, en determinadas ocasiones se puede usar, independientemente de la electrocoagulación, para separar por flotación los sólidos contenidos en un agua (véase la figura N° 2.13, en la página 58). (BARRERA DIAZ, 2014)

A pesar de las grandes ventajas que presenta este tratamiento, se han realizado pocos trabajos en los que se estudie detalladamente la electroflotación como proceso de separación independiente de la electrocoagulación, si bien existen numerosas patentes que demuestran que un diseño adecuado del reactor de electrocoagulación permite combinar todos los procesos anteriores y generar un tratamiento de una gran eficacia. (BARRERA DIAZ, 2014)

En este contexto, la pequeña demanda de corriente eléctrica permite que estos procesos se puedan abastecer mediante sistemas "verdes", entre los que se incluirán los basados en energía solar, eólica o incluso en el uso de celdas de combustible. La autonomía de algunos de estos sistemas abre la posibilidad del emplazamiento de este tipo de tecnologías en lugares aislados, en los que difícilmente son aplicables tecnologías más convencionales. En relación con el abastecimiento energético mediante celdas de combustible, es importante tener en cuenta que en el proceso de dosificación electroquímica de metal (Al o Fe) se generan cantidades importantes de hidrógeno de alta pureza, por lo que se abre la posibilidad de valorizar este subproducto mediante su posterior procesamiento en la celda de combustible. (BARRERA DIAZ, 2014)

FIGURA N° 2.13

PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN



Fuente: (BARRERA DIAZ, 2014)

Además, algunos ejemplos de aplicación de esta tecnología a casos reales incluyen:

- Aguas de abastecimiento, centrados en la eliminación de materia coloidal, de flúor
- Aguas residuales urbanas.
- Aguas residuales procedentes de la industria textil, con un elevado contenido de tintes, colorantes y sólidos en suspensión.
- Aguas residuales agroindustriales.
- Aguas procedentes de la fabricación de puertas, con alto contenido de materia coloidal y orgánico.
- Aguas residuales procedentes de un sector industrial que engloba distintos tipos de actividades, para la eliminación de DQO, color y coliformes, entre otros parámetros.

- Aguas procedentes de una industria de fabricación de papel, para la eliminación de fenol y lignina.
- Aguas residuales procedentes de procesos de galvanoplastia, para la eliminación de metales y materia orgánica.
- Emulsiones de aceite en agua procedentes de restaurantes, de la industria de mecanizado de metales, y procedentes del pulido en la fabricación de piezas de metales semiconductores empleados en la integración de circuitos.

A pesar de los Buenos resultados mostrados en estos trabajos, llama la atención el hecho de que tales resultados no se correspondan con la aplicación práctica mayoritaria de la tecnología en el tratamiento de efluentes industriales. De hecho, es una tecnología que actualmente se aplica en pocas ocasiones a escala real, fuera de los estudios tecnológicos. La razón se encuentra en el ámbito industrial, pues es la creencia de esta tecnología conlleva unos costos muy superiores a los del tratamiento por coagulación convencional, por paralelismo con las "creencias" asociadas a otras tecnologías electroquímicas en el mundo industrial. (BARRERA DIAZ, 2014)

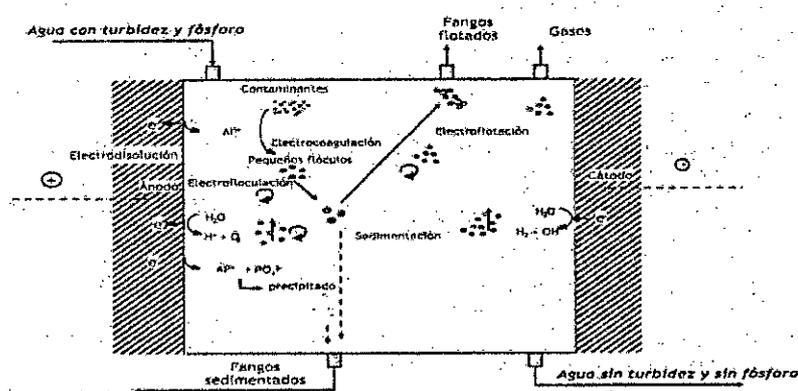
En la siguiente imagen (véase la figura N° 2.14) se muestran, a modo de ejemplo y mediante un esquema ilustrativo, los principales procesos que tendrían lugar durante un tratamiento de electrocoagulación de aguas tratadas.

Dado que estas aguas contienen cantidades importantes de materia coloidal y suspendida, proveniente del tratamiento biológico, y que además pueden contener moléculas orgánicas de gran tamaño susceptibles de coagular, la electrocoagulación

combinada con el electro flotación puede ser un proceso con un gran rendimiento. Aparte de ello, la baja solubilidad de los fosfatos de aluminio y de hierro hace que sea una tecnología adecuada para eliminar este contaminante de las aguas; eliminación que ocurrirá simultáneamente con la electrocoagulación de la materia coloidal, en el mismo reactor. En este sentido, conviene tener claro que el tratamiento se ha de combinar con un sistema de filtración para garantizar una eliminación importante de los sólidos en suspensión. (BARRERA DIAZ, 2014)

FIGURA N° 2.14

PROCESOS DURANTE LA ELECTROCOAGULACIÓN DE AGUAS TRATADAS.



Fuente: (BARRERA DIAZ, 2014)

2.2.9. Desventajas y ventajas de la electrocoagulación

TABLA N° 2.5

DESVENTAJAS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN

✓ Durante el proceso electrolítico el ánodo sufre desgaste por la liberación de los iones metálicos a la solución. Además, estos se engrasan y se corroen por lo cual es necesario realizar una correcta limpieza.
✓ Es necesario reponer los electrodos de sacrificio.
✓ Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo de sacrificio utilizado.
✓ Puede ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de la energía eléctrica sea alto.
✓ El óxido formado en el ánodo puede, en muchos casos, formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso.

Fuente: (ARANGO RUIZ, 2005)

TABLA N° 2.6
VENTAJAS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN

VENTAJAS	
<ul style="list-style-type: none"> ✓ La materia suspendida que se separa por electrocoagulación puede ser reprocesada y/o vendida como subproducto. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Los costos de operación son menores comparativamente con los de procesos convencionales usando polímeros.
<ul style="list-style-type: none"> ✓ El diseño de este sistema es más simple ya que no necesitan compresores ni bombas de alta presión, ni instrumentos para medición y control de sistemas presurizados. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Requiere de equipos simples y de fácil operación. ✓ Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos.
<ul style="list-style-type: none"> ✓ El lodo generado es menor que en el caso de otros métodos aplicados industrialmente. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Genera lodos más compactos y en menor cantidad, lo que involucra menor problemática de disposición de estos lodos.
<ul style="list-style-type: none"> ✓ El costo de operación de la electrocoagulación es menor al del tratamiento químico convencional. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Produce flóculos más grandes que aquellos formados en la coagulación química y contienen menos agua ligada.
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Las plantas de tratamiento de efluentes requieren menor área. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Los contaminantes son arrastrados por las burbujas a la superficie del agua tratada, donde pueden ser removidos con mayor facilidad
<ul style="list-style-type: none"> ✓ El tiempo de tratamiento requerido es menor al de los métodos tradicionales. ✓ Reduce la contaminación en los cuerpos de agua. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas, incrementando la coagulación.
<ul style="list-style-type: none"> ✓ El tratamiento electrolítico permite la reutilización de los efluentes. ✓ Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes. ✓ Puede generar aguas potables, incoloras e inodoras. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ El agua tratada por electrocoagulación contiene menor cantidad de sólidos disueltos que aquellas tratadas con productos químicos, situación que disminuye los costos de tratamiento de estos efluentes en el caso de ser reusados.

Fuente: (ARANGO RUIZ, 2005)

2.2.10. Mecanismo del proceso de electrocoagulación

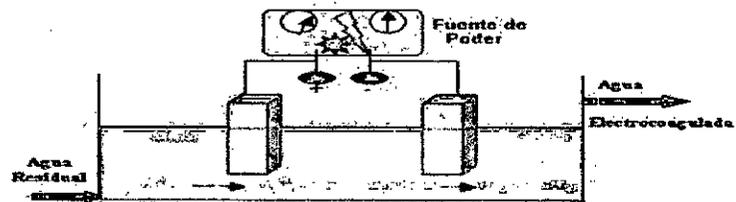
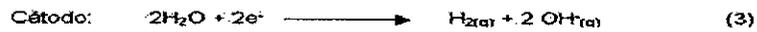
El fundamento teórico de la electrocoagulación consiste en que la precipitación se lleva a cabo al mismo tiempo que la desestabilización de coloides, el agua está sometida a electrólisis, la cual se ve favorecida por la presencia de sales en disolución, como el cloruro de sodio, que posibilitan la conducción de electricidad, debido a esto se produce un desprendimiento de hidrógeno y oxígeno gaseoso en sus respectivos electrodos. Estos gases al ascender a la superficie provocan tres fenómenos: Separación rápida de coloides del electrodo, evitando que se ensucie (limpieza), arrastre de coloides desestabilizados a la superficie formando una nata, posibilitando no sólo una extracción por sedimentación clásica, sino también, por flotación.

Debido a las burbujas de gas se producen corrientes ascendentes y descendentes de la solución ocasionando una mejor superficie de contacto, provocando así un aumento en la eficiencia de desestabilización. Estas microburbujas, que obviamente son inicialmente moleculares, se adhieren a las minúsculas partículas contaminantes presentes en la solución a tratar, provocando un proceso de flotación que transporta a la superficie, en forma de espuma compacta, todas las sustancias contaminantes, que, por su densidad, o por sus reducidas dimensiones son difíciles de precipitar y permanecen en suspensión.

FIGURA N° 2.15

PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN

REACCIONES:



Fuente: (DOMÍNGUEZ, Samantha Y BETANCOURT, Estefanía)

2.2.11. Reacciones presentes en el proceso de electrocoagulación

Los materiales más comúnmente utilizados como electrodos en la electrocoagulación son hierro y aluminio. Por esta razón se tratarán de manera especial las reacciones que se desarrollan manteniendo electrodos de estos dos metales en la celda. La bibliografía referenciada trata ampliamente estas reacciones, no sólo para hierro y aluminio, si no también aquellas reacciones que ocurren cuando los electrodos son de otros metales o materiales.

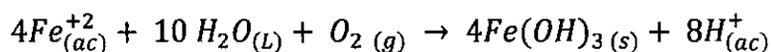
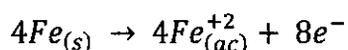
El proceso de electrocoagulación es afectado por diferentes factores. Entre los más importantes se encuentran la naturaleza y concentración de los contaminantes, el pH del agua residual y la conductividad.

Estos factores determinan y controlan las reacciones ocurridas en el sistema y la formación del coagulante.

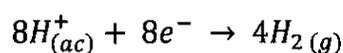
Para el caso en el cual el hierro actúa como ánodo, se han propuesto dos mecanismos que explican la formación in situ de dos posibles coagulantes. Estos pueden ser hidróxido ferroso $Fe(OH)_2$ o hidróxido férrico $Fe(OH)_3$. (RESTREPO MEJIA & ARANGO RUIZ, 2006)

Mecanismo 1: Formación del hidróxido férrico

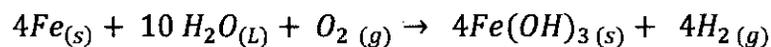
En el ánodo se presentan las siguientes reacciones de oxidación



En el cátodo ocurre la reacción:

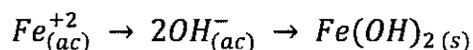
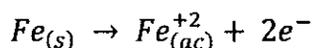


Reacción global:

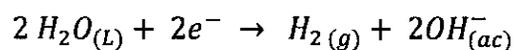


Mecanismo 2: Formación del hidróxido ferroso

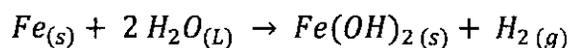
En el ánodo se dan las reacciones:



En el cátodo:



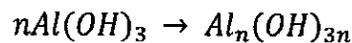
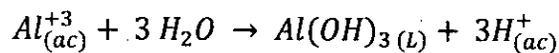
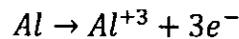
Reacción global:



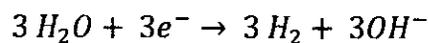
Luego de la formación de los hidróxidos de hierro los coloides se aglomeran, especialmente aquellos con carga negativa, y posteriormente otras partículas de contaminantes interactúan con estos aglomerados, siendo removidos por formación de complejos o atracciones electrostáticas. (RESTREPO MEJIA & ARANGO RUIZ, 2006)

Cuando el aluminio actúa como ánodo las reacciones son las siguientes:

En el ánodo:



En el cátodo:



Los iones Al^{+3} en combinación con los OH^{-} reaccionan para formar alguna especies monoméricas como $Al(OH)_2^{+}$, $Al_2(OH)_2^{+}$ y otras poliméricas, tales como $Al_6(OH)_{15}^{3+}$, $Al_7(OH)_{17}^{4+}$ que por procesos de precipitación forman el $Al(OH)_{3(s)}$, como se muestra en la reacción de ánodo. El $Al(OH)_{3(s)}$ es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso, que expone una gran área superficial con propiedades absorbentes y que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes. (RESTREPO MEJIA & ARANGO RUIZ, 2006)

2.2.12. Factores para proceso de electrocoagulación

Son muchos los factores que intervienen en el proceso de electrocoagulación y algunos de estos factores tienen mayor influencia sobre el proceso. A continuación, discutiremos aquellos que se relacionan más directamente con la eficiencia del mismo.

> pH

El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación, y esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar.

El pH durante el proceso puede incrementarse para aguas residuales ácidas, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo. En contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer y, dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso. (RESTREPO MEJIA & ARANGO RUIZ, 2006)

Se ha determinado en algunos casos que la mayor eficiencia en la remoción de un contaminante se da dentro de un rango específico de pH. En términos generales las mejores remociones se han obtenido para valores de pH cercanos a 7. Ejemplos de esta situación se pueden ver en la remoción de arsénico en aguas de consumo, donde el mayor porcentaje de remoción de arsénico se da en pH entre 6 y 8, y las mejores remociones de turbiedad y DQO en las aguas de la industria textil se dan en un pH de 7. (RESTREPO MEJIA & ARANGO RUIZ, 2006)

Las reacciones que se dan durante el proceso de electrocoagulación le dan al medio acuoso capacidad buffer. Especialmente en aguas residuales alcalinas, esta propiedad previene grandes cambios de pH con lo cual son menores las dosificaciones de sustancias químicas para regular el pH. (RESTREPO MEJIA & ARANGO RUIZ, 2006)

➤ **Densidad de corriente**

Como las variables eléctricas en el proceso de electrocoagulación son los parámetros que más influyen en la remoción del contaminante de un agua residual y están ligados a factores económicos, se debe prestar mayor atención a su estudio. (RESTREPO MEJIA & ARANGO RUIZ, 2006)

La eficiencia en la remoción y el consumo de energía se incrementan con el aumento en la densidad de corriente. Para algunas conductividades del medio acuoso el consumo de energía se incrementa proporcionalmente con los aumentos de conductividad, lo que conlleva a un consumo mayor de energía. (RESTREPO MEJIA & ARANGO RUIZ, 2006)

El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio Al^{+3} o hierros Fe^{+2} , liberados por los respectivos electrodos.

En general un aumento de la densidad de corriente genera un aumento en la remoción de contaminante. Una densidad de corriente demasiado grande produciría una disminución significativa en la eficiencia. La selección de la densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación, como pH y temperatura. (RESTREPO MEJIA & ARANGO RUIZ, 2006)

La energía eléctrica que se suministra a la celda electroquímica puede ser mediante corriente alterna (CA) o bien como corriente directa (CD). Las características propias del paso de cada una de las corrientes a través del medio acuoso generan diferentes respuestas electroquímicas entre las placas y el agua residual tratada. Cuando se suministra corriente directa se produce en el cátodo una impermeabilización, lo que causa una menor eficiencia en la remoción. (RESTREPO MEJIA & ARANGO RUIZ, 2006)

➤ **Conductividad**

Un incremento en la conductividad eléctrica genera a su vez un incremento en la densidad de corriente. Cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación y adicionalmente el incremento de la conductividad, manteniendo la densidad de corriente constante, se produce una disminución del voltaje aplicado. (RESTREPO MEJIA & ARANGO RUIZ, 2006)

La adición de algunos electrolitos tales como NaCl o CaCl₂ genera un aumento en la conductividad del agua residual. Se recomienda, sin embargo, que para un proceso de electrocoagulación normal se mantengan cantidades de Cl alrededor del 20%. (RESTREPO MEJIA & ARANGO RUIZ, 2006)

➤ **Temperatura**

Los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente se incrementa inicialmente hasta llegar a 60° C, punto donde se hace máxima para luego decrecer. (RESTREPO MEJIA & ARANGO RUIZ, 2006)

➤ **Tiempo**

El tiempo de residencia, indican algunos autores determina que, a mayor valor, mayor es la cantidad de sólidos formados, debido a que se favorece tanto los procesos de electrodos como la floculación y precipitación de los sólidos. Se producen más gases que al ascender, llevan las partículas de óxido a la superficie en forma de espuma y a su vez promueve el crecimiento de los flóculos y su posterior precipitación.

Un pequeño cambio del tiempo representa una gran influencia en la cantidad de sólidos obtenidos. Sin embargo, estos mismos autores señalan que sus variaciones resultan estadísticamente menos significativas que las variaciones de pH, ya que éste, está muy vinculado a la constante del producto de solubilidad (K_{ps}) la cual debe de disminuir al elevarse el mismo, lo que significa que los sólidos son más insolubles y por tanto se obtiene una mayor precipitación de los mismos en la medida que el pH aumenta. (PRIETO GARCIA, 2012)

2.2.13. Isotermas de adsorción

Para las corridas experimentales se utilizará las isotermas de adsorción de Langmuir y Freundlich las cuales describen el equilibrio de adsorción de los contaminantes en una superficie solida (coagulante).

Se determinará entre el equilibrio del cromo que se encuentra en la solución el cual es adsorbido por el coagulante (Floc generado en el proceso).

➤ **Isoterma de adsorción de Langmuir**

La adsorción se genera en una superficie homogénea y se forma una monocapa donde solo puede adherirse una molécula de adsorbato en el equilibrio. (CARRETO, 2017)

$$q = \frac{qm * b * C}{(1 + b * C)}$$

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{(qm * b)} * \frac{1}{C} + \frac{1}{qm}$$

C: concentración del adsorbato en equilibrio (mg/L)

Qm: capacidad máxima de adsorción (mg/g)

B: constante de Langmuir (L/mg)

➤ **Isoterma de adsorción de Freundlich**

La adsorción se genera en una superficie rugosa y no supone la formación de una monocapa, con una distribución exponencial en los puntos de adsorción. (CARRETO, 2017)

$$q = kf * c^{1/n}$$

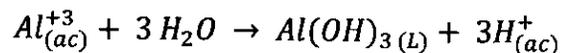
$$\log(q) = \log(kf) + \frac{1}{n} * \log(C)$$

kf: constante de capacidad de adsorción

n: constante de intensidad de adsorción.

➤ Ley de Faraday

Para su determinación, se establecerá la concentración de cromo total en equilibrio del floc, como en la solución en equilibrio; asumiendo que la cantidad total de cromo que deja de estar en la solución es transferida en su totalidad al floc generado durante el proceso, y a la vez por efecto de la corriente eléctrica la concentración de Al^{+3} liberado al ejecutar el método de electrocoagulación, se puede determinar la concentración del Hidróxido de Aluminio. (BARBOZA PALOMINO, 2011)



La ecuación de Faraday:

$$mAl^{+3} = \frac{PE \cdot I \cdot t}{F}$$

$m Al^{+3}$: es la masa de aluminio (gr)

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

I: intensidad de corriente (A)

t: es el tiempo (s)

F: constante de Faraday $96500 \frac{C}{mol}$

2.2.14. Reactores para proceso de electrocoagulación

Los reactores para la electrocoagulación pueden clasificarse en primera instancia como reactores tipo Bach o reactores de sistema continuo. La selección de uno de estos tipos de reactor depende de las características del contaminante y de su

concentración, así como de las cantidades de agua residual a tratar. (RESTREPO MEJIA & ARANGO RUIZ, 2006)

Una segunda clasificación de los reactores está dada en función de la flotación. Una vez que el contaminante ha sufrido el proceso de coagulación existen dos formas de separarlo del medio acuoso, a saber: flotación y sedimentación. Así pues, los reactores pueden diseñarse como reactores con sólo coagulación, o con coagulación y flotación. Son llamados reactores de sólo coagulación aquellos que no aprovechan la electrocoagulación para generar burbujas que separen los agregados (flóculos) del contaminante por flotación, mientras que los reactores en los que se aprovechan las burbujas generadas para realizar la flotación de los agregados del contaminante reciben el nombre de reactores de coagulación y flotación. (RESTREPO MEJIA & ARANGO RUIZ, 2006)

El reactor tipo Bach, encontramos que éste debe operar con un volumen determinado de agua residual para tratar en un ciclo. Tiene como desventaja que sus condiciones cambian con el tiempo, pero tiene también la ventaja de ser simple y de bajo costo para el tratamiento localizado de aguas. (RESTREPO MEJIA & ARANGO RUIZ, 2006)

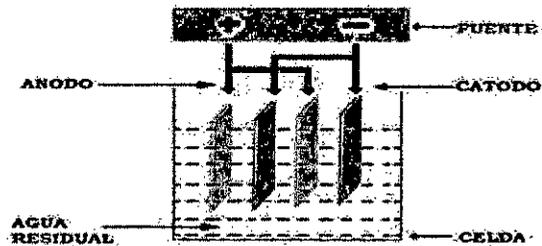
El reactor utilizado para realizar la electrocoagulación en una operación por Bach, en su forma más simple, está formado por una celda electroquímica con un ánodo y un cátodo dispuestos en forma vertical y conectada a una fuente de energía externa. (ARANGO RUIZ, 2005)

El material anódico se corroe eléctricamente debido a la oxidación, mientras que el cátodo permanece pasivo. El diseño formado por un par de electrodos no es el más adecuado a la hora del proceso ya que para obtener una adecuada disolución del metal se requiere de electrodos de gran área superficial, es por esta razón que se utilizan celdas con electrodos monopolares en paralelo o conectados en serie.

- **Monopolar:** Los electrodos están conectados en paralelo y sometidos al mismo potencial, lo cual genera mayor gasto de energía.
- **En Paralelo:** En la disposición monopolar en paralelo la corriente eléctrica se reparte entre todos los electrodos en relación a la resistencia de las células individuales. (M. Yousuf A. Mollah. SCHENNACH, 2001). (véase la figura N° 2.16) se aprecia la distribución de los electrodos.

FIGURA N° 2.16

REACTOR CON ELECTRODOS MONOPOLARES CONECTADOS EN PARALELO.



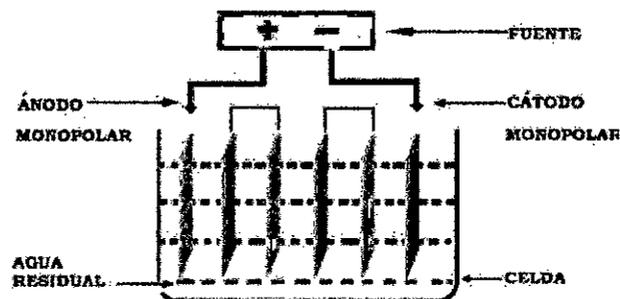
Fuente: (M. Yousuf A. Mollah. SCHENNACH, 2001)

- **En Serie:** La disposición electrodos monopolares en serie se observa que cada par de electrodos de sacrificio " está conectado internamente uno con el otro, y no tiene interconexiones con los electrodos externo. Esta disposición de electrodos

monopulares con celdas en serie es eléctricamente similar a una única célula con muchos electrodos e interconexiones. En disposición en serie de electrodos, se requiere una diferencia de potencial más alto se requiere para una corriente dada porque las células conectadas en serie tienen una mayor resistencia. (M. Yousuf A. Mollah. SCHENNACH, 2001)

FIGURA N° 2.17

REACTOR ELECTRODOS MONOPOLARES CONECTADOS EN SERIE

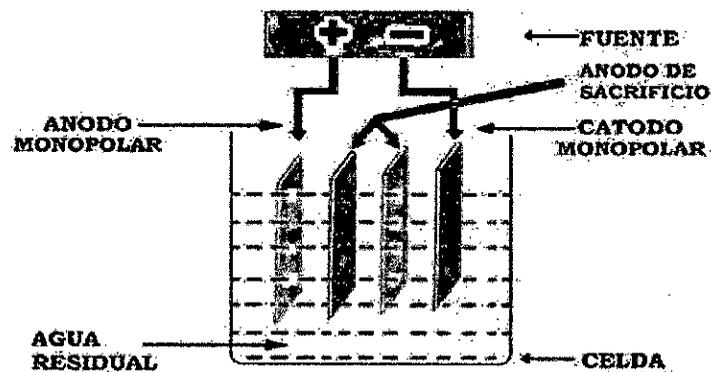


Fuente: (M. Yousuf A. Mollah. SCHENNACH, 2001)

- **Configuración bipolar:** trabaja a menor intensidad y mayor voltaje que la monopolar. Las celdas bipolares tienen la ventaja de la sencillez de su disposición, ya que sólo es necesaria la conexión de dos electrodos (electrodos alimentadores), y por tanto el espacio entre los electrodos puede ser más pequeño. Sin embargo, el elevado potencial entre los electrodos alimentadores también origina que una parte de corriente fluya a través de la disolución causando un bypass de corriente a los electrodos bipolares y produciendo por tanto pérdidas de corriente, lo que debe ser tenido en cuenta a la hora de prever el efecto sobre la producción y el tiempo de vida de electrodos. (M. Yousuf A. Mollah. SCHENNACH, 2001)

FIGURA N° 2.18

REACTOR CON ELECTRODOS BIPOLARES CONECTADOS EN PARALELO



Fuente: (M. Yousuf A. Mollah. SCHENNACH, 2001)

2.2.15. Diseño del sistema de electrocoagulación

➤ Celda de electrocoagulación

La celda de electrocoagulación también conocida como cuba electrolítica, fundamenta su diseño en la distribución volumétrica, que contempla tres zonas:

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

El diseño de la celda para este caso es un reactor tipo Batch, consta de un paralelepípedo rectangular de 15 cm de ancho, 20 cm de largo y 20 cm de alto, con capacidad de volumen 6L, fabricado en acrílico de 4 mm de espesor, con el fin de que sea posible observar de forma clara, los cambios que ocurren en el proceso. (AGUILAR ASCON, 2015)

➤ **Geometría de los electrodos**

Los electrodos son las estructuras fundamentales en el proceso de electrocoagulación, ya que a partir de ellos ocurren las reacciones propias del proceso. Con base a la información obtenida por antecedentes de estudios realizados en la remoción de contaminantes de aguas residuales y la disponibilidad en el mercado, 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. (AGUILAR ASCON, 2015)

➤ **Distancia entre los electrodos**

La distancia entre los electrodos es determinada con base a los resultados obtenidos en fuentes bibliográficas, que indica que los mejores resultados son obtenidos a una distancia de 1 cm, dado que, a distancias superiores, el proceso es extenso y pueden presentarse atascamientos en la superficie de los electrodos, a distancias inferiores, no ocurren cambios significativos comparados con los resultados obtenidos a 1 cm. (AGUILAR ASCON, 2015)

➤ **Numero 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). (AGUILAR ASCON, 2015)

la separación entre dichos electrodos y el espesor de la cada uno de ellos, seda mediante la siguiente ecuación:

$$\# \text{ electrodos} = \frac{(\text{ancho de la celda}) - 2(\text{dist. electrodo cara lateral})}{(\text{dist. entre electrodos} + \text{espesor de la placa})}$$

➤ **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 30 amperios; las cuales serán monitoreados con un medidor (multímetro digital) de voltaje y amperaje respectivamente.

Para 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. (AGUILAR ASCON, 2015)

2.3. Definiciones de términos

- DQO (Demanda química de oxígeno): se define como la cantidad de oxígeno, expresada en miligramos por litro, que se consume en ciertas condiciones durante la oxidación de materia orgánica e inorgánica oxidable presente en el agua de desechos. (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1976)
- DBO₅ (demanda bioquímica de oxígeno): indica directamente la cantidad de oxígeno que utilizarán los agentes naturales para estabilizar la materia orgánica. (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1976)
- Turbidez: Presencia de sólidos suspendidos que están dispersos en ella, provocando una reducción de transparencia. Por lo tanto, la medición de turbidez indica el grado de opacidad o dispersión de la luz a causa de los sólidos suspendidos. (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1976)
- Color: Constituyente común de las aguas naturales. Por lo general es el resultado de la presencia de iones metálicos naturales y de ligninas y otros productos que se considera existentes en la suspensión coloidal. (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1976)
- Conductividad: es un método rápido y conveniente para medir la concentración de electrolitos. La conductancia específica de una solución diluida de un electrolito, es casi directamente proporcional a la concentración iónica de dicho electrolito y la conductividad total del agua es igual a la suma de las diferentes conductividades resultantes de los electrolitos presentes. (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1976)

- PH: es una medida de la actividad de los iones hidrogeno. se usa para indicar la acidez o basicidad de soluciones acuosas que incluyen aguas naturales y es el resultado de las propiedades de disociación de solutos. (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1976)
- Electroquímica: rama de la química que estudia la inter conversión de la energía eléctrica y energía química. (RAYMOND CHANG, 2010)
- Electrolisis: proceso en que se utiliza la energía eléctrica para que se lleve a cabo una reacción química no espontánea. (RAYMOND CHANG, 2010)
- Electrolito: sustancia que al disolverse en agua da origen a una solución que puede conducir la electricidad. (RAYMOND CHANG, 2010)
- Electrón: Partícula sub atómica que tiene una masa pequeña y una carga eléctrica unitaria negativa. (RAYMOND CHANG, 2010)
- Ion: átomo o grupo de átomos que tienen carga negativa o positiva. (RAYMOND CHANG, 2010)
- Ánodo: electrodo en que se lleva a cabo la oxidación. (RAYMOND CHANG, 2010)
- Cátodo: electrodo en que se lleva a cabo la reducción. (RAYMOND CHANG, 2010)
- Voltaje: El voltaje es la energía potencial de la carga eléctrica requerida para que el circuito trabaje. (FLOYD, 2007)
- Corriente: Energía proporcionada a los electrones, que les permite moverse a través de un material conductor. (FLOYD, 2007)

- Ampere: Es la cantidad de corriente que existe cuando cierto número de electrones pasa por un área de sección transversal dada en un segundo. (FLOYD, 2007)
- Fuente de voltaje: Una fuente de voltaje ideal puede proporcionar un voltaje constante para cualquier corriente requerida por un circuito. La fuente de voltaje ideal no existe, pero puede ser aproximada en la práctica. Las fuentes de voltaje pueden ser de cd (continua) o de ca (alterna). (FLOYD, 2007)
- Fuente de corriente: Una fuente de corriente ideal puede proporcionar una corriente constante para cualquier carga. la fuente de corriente ideal no existe, pero puede ser aproximada en la práctica. (FLOYD, 2007)
- ppm: Es una unidad de medida con la que se mide la concentración. (mg/L) Se refiere a la cantidad de unidades de una determinada sustancia (agente, etc) que hay por cada millón de unidades del conjunto. (WIKIPEDIA ENCICLOPEDIA LIBRE, 2001)
- Be: Escala Baume. es una escala usada en la medida de las concentraciones de ciertas soluciones Su ventaja es que permite evaluar la concentración de cualquier solución con una misma unidad (grados Baumé) y un mismo aparato (elareómetro Baumé), Se sigue empleando en la actualidad en la producción industrial de cerveza, vino, miel y ácidos concentrados. (SCRIBD, 2007)

III. VARIABLES E HIPÓTESIS

3.1. Variables de la investigación

3.1.1. Variable independiente

Electrocoagulación en aguas residuales de la industria curtiembre

3.1.2. Variables dependientes

Reducción del DQO y Cromo en el agua residual tratada

3.2. Operacionalización de variables

VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO DE RECOLECCIÓN DE DATOS
Reducción de la demanda química de oxígeno y Cromo en el agua residual tratada.	Parámetros de operación.	<ul style="list-style-type: none"> ➤ pH ➤ conductividad Eléctrica (ms/cm) ➤ Tiempo de remoción ➤ Intensidad (A) ➤ Tensión (V) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ potenciómetro ➤ conductímetro ➤ Cronometro ➤ Amperímetro ➤ Voltímetro
Parámetros fisicoquímicos	Parámetros de operación	<ul style="list-style-type: none"> ➤ pH ➤ conductividad Eléctrica (ms/cm) ➤ Cromo Hexavalente (mg/L) ➤ DQO (mg/L) ➤ Cromo (mg/L) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ potenciómetro ➤ conductímetro ➤ Cromo método colorímetro ➤ Colorimétrico ➤ Espectrometría de emisión atómica
VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO DE RECOLECCIÓN DE DATOS
Electrocoagulación en aguas residuales de la industria curtiembre	Parámetros de operación	<ul style="list-style-type: none"> ➤ DQO (mg/L) ➤ Cromo (mg/L) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Colorimétrico ➤ Espectrometría de emisión atómica

Fuente: Elaboración propia

3.3. Hipótesis

3.3.1. Hipótesis general

El tratamiento de aguas residuales de la industria curtiembre mediante el método de electrocoagulación reduce significativamente la demanda química de oxígeno y Cromo.

3.3.2. Hipótesis específica

- Las características fisicoquímicas de las aguas residuales de la industria curtiembre superan los Valores Máximos Admisibles.
- Los valores óptimos de los parámetros son: pH 6, tiempo de remoción de 10, 20, 30, 35 minutos, voltaje de 20 - 30, la intensidad de corriente de 10 - 20 amperios.

IV. METODOLOGÍA

4.1. Tipo de investigación

Los tipos de investigación que se han realizado en el presente trabajo de tesis son:

4.1.1. Por su finalidad

Es de tipo básica porque se inicia de un marco teórico, logrando conclusiones que se basan en hechos que se han observado y medido.

4.1.2. Por su diseño de investigación

Es de tipo experimental ya que se realiza mediante la observación, registros y análisis de las variables intervinientes de las corridas experimentales en el laboratorio.

4.1.3. Por su énfasis en la naturaleza de datos manejados

Es de tipo cualitativo debido a que se registran las variables de investigación y cuantitativo porque estas variables de investigación pueden ser medidas.

4.2. Diseño de la Investigación

4.2.1. Definición del escenario de investigación

La investigación se realizó en el laboratorio de Investigación y Desarrollo de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao.

4.2.2. Elección del método de diseño de equipo de laboratorio

Se realizó en función al volumen del agua residual que se recolectó de la industria de curtiembre y en base al número de corridas experimentales, para ello se utilizó un reactor Bach de 4.5 L capacidad, 5 electrodos de fierro y 5 electrodos de aluminio, una fuente variable de voltaje 30 V, con intensidad de corriente 20 A.

4.2.3. Determinación de la variable de diseño

Se determinó en base a referencias bibliográficas y de manera experimental se observó que en el proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria de curtiembre que algunos indicadores como el pH, conductividad, temperatura, concentración de contaminantes, son afectados por el paso de la intensidad corriente eléctrica, voltaje y por el tiempo remoción al cual se encuentran expuestos.

Para determinar el número de corridas experimentales se va utilizar el diseño factorial de dos niveles 2^n que nos permita obtener el máximo de su información con el número de corridas experimentales, donde 2^n nos indica el número de experiencias que deben efectuarse para distintos valores de las n variables, si cada variable es continua, los dos niveles son el inferior (-) y el superior (+).

Las variables cuantitativas de importancia que se controlará son:

- Tiempo de remoción (10 -20 min)
- Tiempo de remoción (30 – 35 min)
- Intensidad de corriente (10 A – 20 A)
- Voltaje de trabajo (20 V – 30 V)

Con $2^3 = 8$ corridas experimentales

TABLA N° 4.1
PRUEBAS EXPERIMENTALES

Numero de experienci	Variables			Vector de respuesta				
	T	I	V	Niveles			% de concentración de DQO	% de concentración de Cromo
1	10	10	20	-	-	-		
2	10	20	30	-	+	+		
3	20	10	20	+	-	-		
4	20	20	30	+	+	+		
5	30	10	20	-	-	-		
6	30	20	30	-	+	+		
7	35	10	20	+	-	-		
8	35	20	30	+	+	+		

Fuente: Elaboración propia

Donde:

T: Tiempo de trabajo

I: Intensidad de corriente

V: Voltaje de trabajo

Esto nos permitirá obtener el máximo de su información con el mínimo de experiencias que se van a realizar, con una tecnología adecuada. Dado que el volumen del reactor es de 4.5 litros, se utiliza como mínimo 50 litros de muestra.

4.2.4. Diseño del equipo del laboratorio

Para su diseño es necesario tener en cuenta algunos aspectos relacionados de la celda electroquímica, la geometría de los electrodos, el material del cual esta echo, la dimensión del equipo, el número de electrodos, entre otros, que contribuirán para obtener buenos resultados.

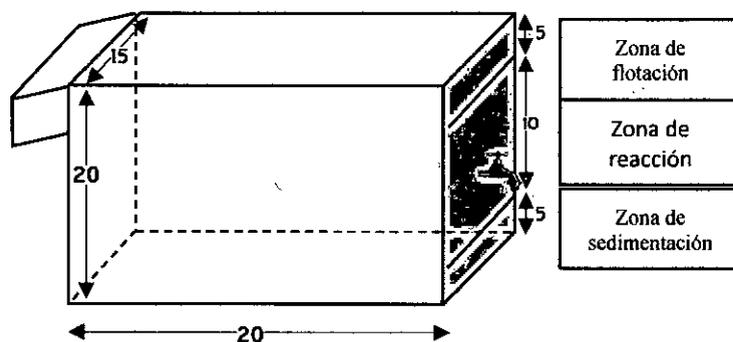
➤ Celda de electrocoagulación

Consta de tres zonas:

- Zona de flotación, donde se depositan los lodos de menor densidad.
- Zona de reacción, en la cual se encuentran sumergidos los electrodos y donde ocurre el proceso de electrocoagulación.
- Zona sedimentación, donde precipitación los lodos más densos.

la celda es un reactor tipo Batch, rectangular de 15 cm de ancho, 20 cm de largo y 20 cm de alto, con capacidad de volumen 4.5 L, fabricado en acrílico de 4 mm de espesor, para observar los cambios que ocurren en el proceso.

FIGURA N° 4.1
CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN



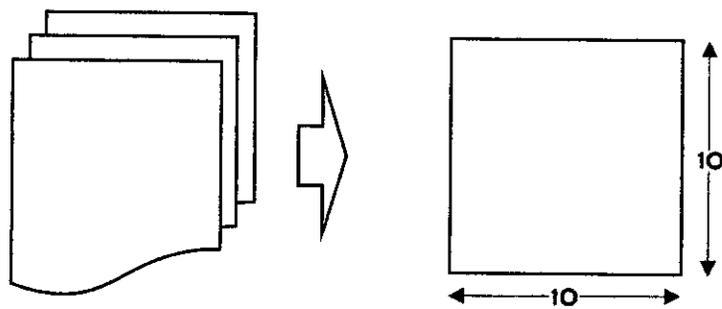
Fuente: Elaboración propia

➤ **Geometría de los electrodos**

los materiales que constituyen los electrodos son de aluminio en el caso del ánodo, y a hierro en el caso del cátodo. Son placas metálicas de 10 cm de ancho, 10 cm de largo y 0,3 cm de espesor.

FIGURA N° 4.2

GEOMETRÍA DE LOS ELECTRODOS



Fuente: Elaboración propia

FIGURA N° 4.3

PREPARACIÓN DE LOS ELECTRODOS



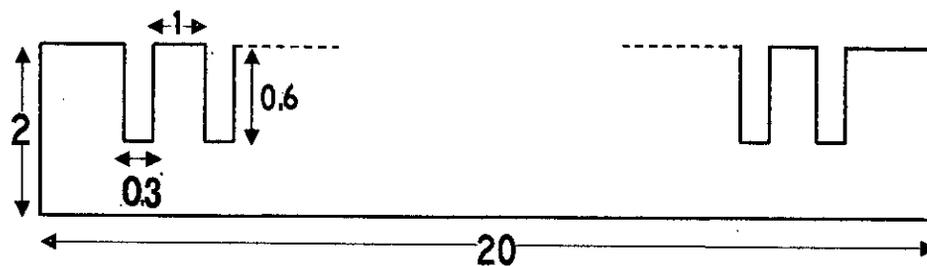
Fuente: Elaboración propia

➤ **Distancia entre los electrodos**

Con el fin de mantener la distancia de 1 cm entre electrodo y electrodo, fue necesaria la construcción de una estructura de acrílico en forma rectangular, de 2cm de ancho y 20 cm de largo, con ranuras de 0,3 cm de espesor, para que los electrodos sean soportados y separados a la distancia establecida.

FIGURA N° 4.4

DISTANCIA ENTRE LOS ELECTRODOS



Fuente: Elaboración propia

➤ **Numero 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, se da mediante la siguiente ecuación:

$$\# \text{ electrodos} = \frac{(\text{ancho de la celda}) - 2(\text{dist. electrodo cara lateral})}{(\text{dist. entre electrodos} + \text{espesor de la placa})}$$

➤ **Fuente regulable de voltaje**

Es una fuente regulada de corriente continua (DC), con un rango de intensidad de corriente entre 0 y 30 amperios; las cuales serán medidas con un multímetro digital de voltaje y amperaje respectivamente.

Para 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.

FIGURA N° 4.5

FUENTE REGULABLE DE VOLTAJE



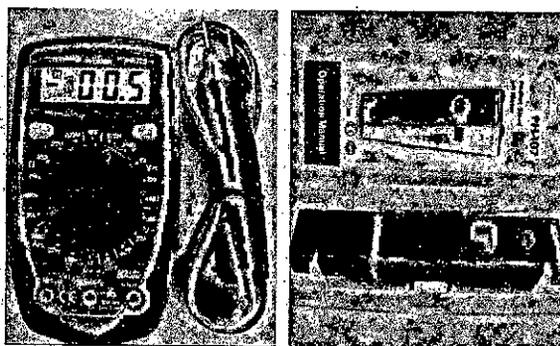
Fuente: Elaboración propia

➤ **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.

FIGURA N° 4.6

MULTÍMETRO Y POTENCIÓMETRO



Fuente: Elaboración propia

4.3. Población y muestra

➤ **Población**

El agua residual de la industria de curtiembre de la zona industrial de la panamericana norte, ubicado en el distrito de los Olivos de la ciudad de Lima metropolitana.

➤ **Muestra**

50 litros de aguas residuales de la industria de curtiembre de la zona industrial de la panamericana norte, ubicado en el distrito de los Olivos de la ciudad de Lima metropolitana.

4.4. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

4.4.1. Técnica de recolección de datos

➤ **Equipos y materiales**

TABLA N° 4.2

MATERIALES PARA EL PROCESO ELECTROCOAGULACIÓN

Materiales	Cantidad
Vasos precipitados de 100 ml	3
Probetas de 100 ml	2
placa de hierro	5
cables conectores con pinzas	10
placa de aluminio	5
fuentes reguladora	1

Fuente: Elaboración propia

TABLA N° 4.3

INSUMOS Y REACTIVOS

Insumos y reactivos	Cantidad
Solución de soda caustica 10N	125 ml
Ácido sulfúrico diluido 1:1 al 85%	50 ml

Fuente: Elaboración propia

4.4.2. Instrumentos para recolección de datos

- determinación de pH mediante el potenciómetro
- determinación de la conductividad mediante un conductímetro
- determinación del Cromo mediante Espectrometría de emisión atómica
- determinación del DQO mediante el método Colorimétrico

TABLA N° 4.4

INSTRUMENTOS PARA TRATAMIENTO DE ELECTROCOAGULACION

Equipos	Cantidad
Fuente Reguladora de corriente	1
Potenciómetro, Hysis	1
Conductímetro, Hanna	1
Bomba de succión capacidad (10L/min)	1
Cronometro con temporizador	1
Multímetro	1
Termómetro	1
Colorímetro	1
espectrofotómetro	1

Fuente: Elaboración propia

4.5. Procedimientos de recolección de datos

Para la recolección de datos en base al tema investigado se realizó análisis fisicoquímicos, cuantitativos y matemáticos a la muestra de agua residual de la industria de curtiembre evaluada, para el análisis fisicoquímico inicial y final el laboratorio acreditado Environmental Testing Laboratory S.A.C. Realizo el análisis fisicoquímicos y cuantitativos de la muestra evaluada, los cálculos matemáticos y las corridas experimentales son evaluados en el laboratorio de la facultad de ingeniería química, de la Universidad Nacional del Callao.

➤ Recolección de muestra

Las muestras de agua residual de la industria de curtiembre recolectada para la parte experimental de laboratorio, fue de un efluente no tratado del proceso del curtido y de pelambre cuyas características son elevadas carga orgánica, sulfuros y sulfatos, cuya procedencia es en la zona industrial de la panamericana norte, ubicado en el distrito de los Olivos de la ciudad de Lima metropolitana.

FIGURA N° 4.7

VISTA SATELITAL DE PROCEDENCIA DE LA MUESTRA



Fuente: Google Earth

FIGURA N° 4.8

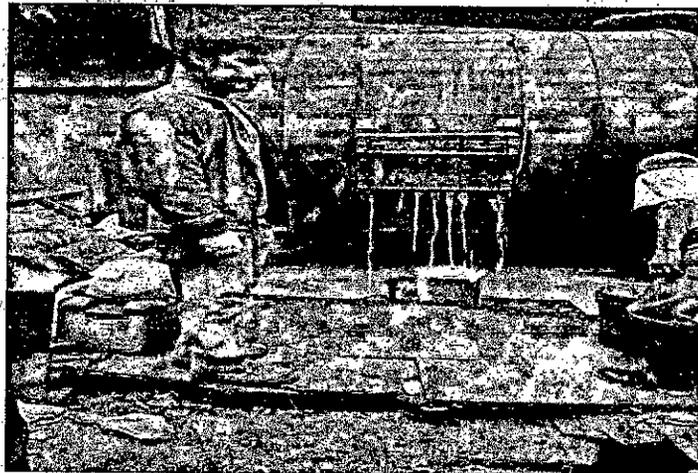
ZONA INDUSTRIAL DE LA PANAMERICANA NORTE



Fuente: Elaboración propia

FIGURA N° 4.9

TOMA LA MUESTRA DE AGUA RESIDUAL DE LA INDUSTRIA DE CURTIEMBRE



Fuente: Elaboración propia

➤ **Análisis inicial**

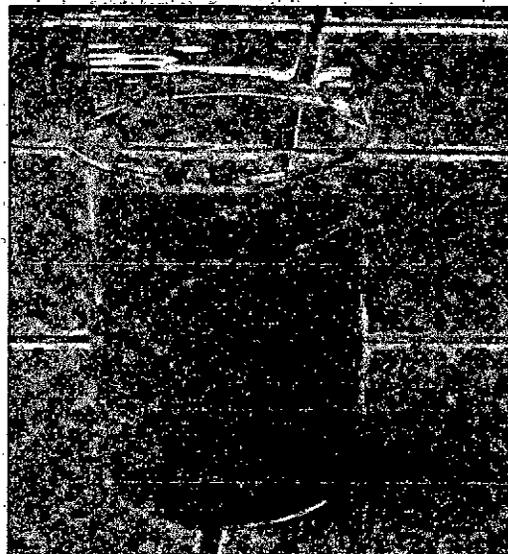
a) Para el análisis inicial

La muestra recolectada fue llevada a la facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao, para realizar la medición del Ph, conductividad eléctrica y preservación de los parámetros fisicoquímicos.

La muestra de agua residual tratada fue analizada por el laboratorio Environmental Testing Laboratory S.A.C., laboratorio acreditado por la Dirección de Acreditación del Instituto de Calidad-INACAL.

FIGURA N° 4.10

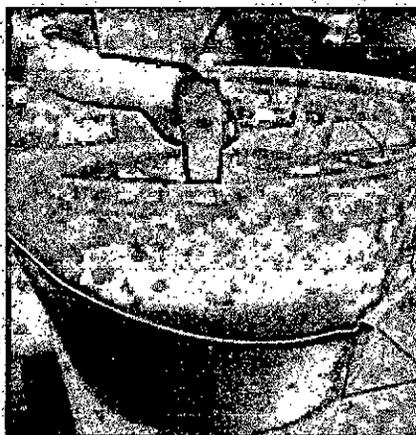
IMAGEN DE LA MUESTRA INICIAL



Fuente: Elaboración propia

FIGURA N° 4.11

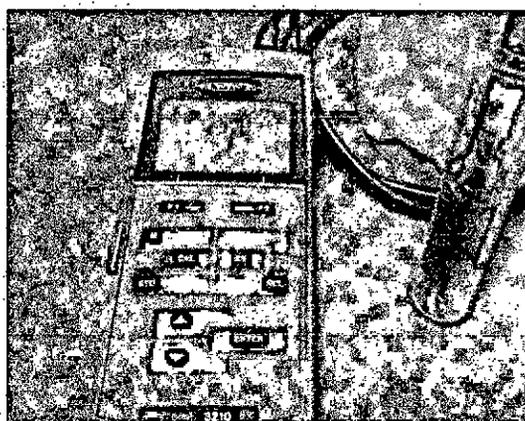
MEDICIÓN DEL PH EN EL LABORATORIO



Fuente: Elaboración propia

FIGURA N° 4.12

MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN EL LABORATORIO



Fuente: Elaboración propia

- La muestra inicial del agua residual de la industria de curtiembre presenta color turbio con bastante carga orgánica y de sólidos suspendidos, con una alta concentración de la Demanda Química de Oxígeno de 1153 mg/l. además de presentar el Cromo Hexavalente $< 0,010$ mg/l valor indetectable para el límite de cuantificación del método (L.C.M) en el laboratorio acreditado Envirotest, el Cromo total presenta una elevada concentración de 57,79 mg/l.
- La medición del pH inicial es de 6, conductividad eléctrica inicial es de 26 mS/cm siendo un valor elevado por tal motivo no se agregó el cloruro de sodio (NaCl), la temperatura inicial es de 19,5 C°.
- Según los datos recogidos de la muestra inicial del agua residual industrial de la industria Curtiembre, proveniente del proceso del pelambre y curtido de la empresa. Donde se monitoreo en la planta y llevado al laboratorio de la Facultad de Ingeniería Química para preservar la muestra, luego se trasladó en un cooler a una temperatura fría de 4 C ° al laboratorio acreditado Envirotest SAC.

TABLA N° 4.5

CONDICIONES INICIALES DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICO

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO	MÉTODO
pH	---	6	Potenciómetro
Conductividad eléctrica	mS/cm	26	Conductímetro
Temperatura	C°	19,5	Termómetro
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	1153	Colorimétrico
Cromo Hexavalente	mg/l	<0,010	Colorimétrico
Cromo total	mg/l	57,79	Espectrometría de Emisión Atómica

Fuente: Elaboración propia

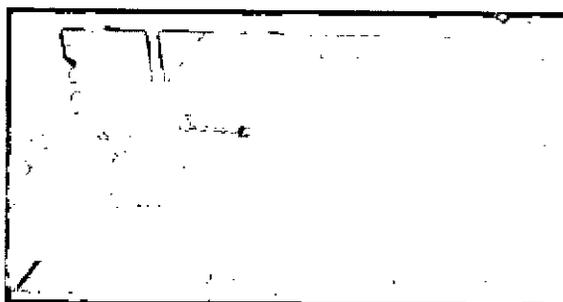
➤ **Sedimentación**

a) Para el pre - tratamiento de la muestra:

- ✓ Después de realizar los análisis fisicoquímicos de la muestra inicial, se realiza un pre tratamiento con el fin de sedimentar la mayor cantidad de solidos suspendidos que pueda interferir en el proceso de electrocoagulación.
- ✓ Se homogeniza la muestra y se toma 4 volúmenes de 250 ml en cada vaso precipitados para buscar el pH óptimo de pre - tratamiento.

FIGURA N° 4.13

MUESTRA DISTRIBUIDA EN 4 VASOS



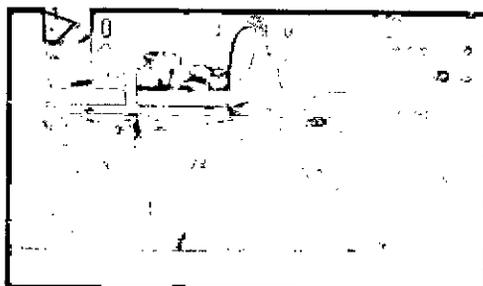
Fuente: Elaboración propia

✓ Se busca regular el pH de cada muestra, agregando a cada vaso precipitado gotas de NaOH (1:1 diluido a 50ml), el primer vaso se mantuvo con pH de condiciones inicial 5.9 y el resto de vasos hasta regular la muestra a pH de 8, 10,12 respectivamente. Con la finalidad de buscar el medio donde se encuentra la mayor sedimentación de solidos suspendidos y carga orgánica.

✓ Para ver en qué medio clarifica mejor a temperatura ambiente, se espera 30 minutos y se observa donde ocurre la mayor sedimentación, siendo esta en un pH de 12.

FIGURA N° 4.14

MODIFICACIÓN DE LOS PH



Fuente: Elaboración propia

✓ Luego de obtener el pH óptimo de 12, se procede a realizar la sedimentación de toda la muestra de trabajo.

FIGURA N° 4.15

SEDIMENTACIÓN DE LA MUESTRA DEL AGUA RESIDUAL DE CURTIEMBRE



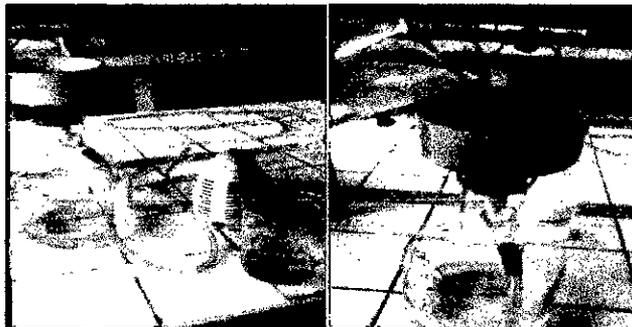
Fuente: Elaboración propia

➤ **Filtración**

A continuación, se procede a filtrar la muestra recibida con la bomba de vacío y el papel de filtro, para separar la parte sólida y quedarnos con la muestra filtrada.

FIGURA N° 4.16

FILTRACION DEL AGUA RESIDUAL PRE TRATADA



Fuente: Elaboración propia

Luego realizar el filtrado de todas las muestras, lo almacenamos en recipientes, para que pase a la siguiente etapa de tratamiento.

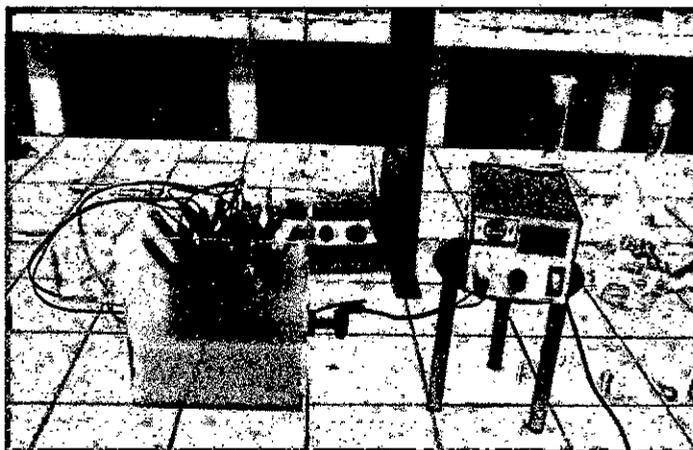
➤ **Electrocoagulación**

a) Para el proceso de electrocoagulación:

- ✓ Acondicionaremos el reactor Batch, con los electrodos en serie con un distanciamiento de 1 cm.
- ✓ Conectar los electrodos en paralelo con la fuente reguladora
- ✓ Vertemos los 4.5 litros de muestra filtrada, en el reactor Batch acondicionado.

Luego de realizar el pretratamiento el cual precipito la mayor cantidad de solidos suspendidos y carga orgánica se modificó el pH 12 a 6 agregando ácido sulfúrico para que ingrese al reactor electro coagulador. Luego proseguimos hacer las 8 corridas experimentales.

FIGURA N° 4.17
EQUIPO DE ELECTROCOAGULACIÓN A NIVEL LABORATORIO



Fuente: Elaboración propia

- **Corrida experimental N° 01**

En esta primera corrida experimental, la muestra ingresa al reactor con pH=6, con las variables de 20 voltios, 10 amperios y con una densidad de corriente de 200 A/m² distribuido en cada electrodo, luego de un tiempo de remoción de 10 minutos, se recoge en 2 frascos esterilizado el cual se codifica como M-1 y a la vez es recogida en un vaso precipitado para determinar el pH y su conductividad eléctrica.

FIGURA N° 4.18

DETERMINACIÓN DEL PH DE LA MUESTRA M-1



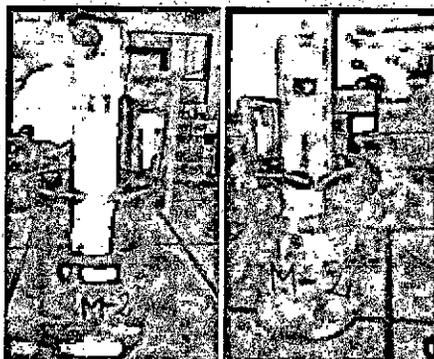
Fuente: Elaboración propia

- **Corrida experimental N° 02**

En esta segunda corrida experimental, la muestra ingresa al reactor con pH=6, con las variables de 20 voltios, 10 amperios y con una densidad de corriente de 200 A/m² distribuido en cada electrodo, luego de un tiempo de remoción de 20 minutos, se recoge en 2 frascos esterilizado el cual se codifica como M-2 y a la vez es recogida en un vaso precipitado para determinar el pH y su conductividad eléctrica.

FIGURA N° 4.19

DETERMINACIÓN DEL PH Y CONDUCTIVIDAD DE LA MUESTRA M-2



Fuente: Elaboración propia

- **Corrida experimental N° 03**

En esta tercera corrida experimental, la muestra ingresa al reactor con $\text{pH}=6$, con las variables de 20 voltios, 10 amperios y con una densidad de corriente de 200 A/m^2 distribuido en cada electrodo, luego de un tiempo de remoción de 30 minutos, se recoge en 2 frascos esterilizado el cual se codifica como M-3 y a la vez es recogida en un vaso precipitado para determinar el pH y su conductividad eléctrica.

FIGURA N° 4.20

DETERMINACION DEL PH Y CONDUCTIVIDAD DE LA MUESTRA M-3



Fuente: Elaboración propia

- **Corrida experimental N° 04**

En esta cuarta corrida experimental, la muestra ingresa al reactor con pH=6, con las variables de 20 voltios, 10 amperios y con una densidad de corriente de 200 A/m² distribuido en cada electrodo, luego de un tiempo de remoción de 35 minutos, se recoge en 2 frascos esterilizado el cual se codifica como M-4 y a la vez es recogida en un vaso precipitado para determinar el pH y su conductividad eléctrica.

FIGURA N° 4.21

DETERMINACION DEL PH Y CONDUCTIVIDAD DE LA MUESTRA M-4



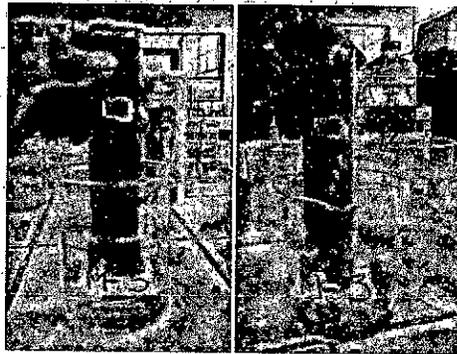
Fuente: Elaboración propia

- **Corrida experimental N° 05**

En esta quinta corrida experimental, la muestra ingresa al reactor con pH=6, con las variables de 30 voltios, 20 amperios y con una densidad de corriente de 400 A/m² distribuido en cada electrodo, luego de un tiempo de remoción de 10 minutos, se recoge en 2 frascos esterilizado el cual se codifica como M-5 y a la vez es recogida en un vaso precipitado para determinar el pH y su conductividad eléctrica.

FIGURA N° 4.22

DETERMINACION DEL PH Y CONDUCTIVIDAD DE LA MUESTRA M-5



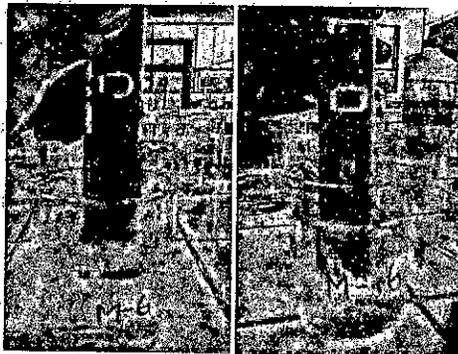
Fuente: Elaboración propia

- **Corrida experimental N° 06**

En esta sexta corrida experimental, la muestra ingresa al reactor con pH=6, con las variables de 30 voltios, 20 amperios y con una densidad de corriente de 400 A/m² distribuido en cada electrodo, luego de un tiempo de remoción de 20 minutos, se recoge en 2 frascos esterilizado el cual se codifica como M-6 y a la vez es recogida en un vaso precipitado para determinar el pH y su conductividad eléctrica.

FIGURA N° 4.23

DETERMINACION DEL PH Y CONDUCTIVIDAD DE LA MUESTRA M-6



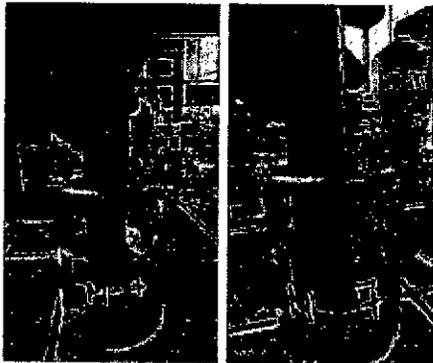
Fuente: Elaboración propia

- **Corrida experimental N° 07**

En esta séptima corrida experimental, la muestra ingresa al reactor con pH=6, con las variables de 30 voltios, 20 amperios y con una densidad de corriente de 400 A/m² distribuido en cada electrodo, luego de un tiempo de remoción de 30 minutos, se recoge en 2 frascos esterilizado el cual se codifica como M-7 y a la vez es recogida en un vaso precipitado para determinar el pH y su conductividad eléctrica.

FIGURA N° 4.24

DETERMINACION DEL PH Y CONDUCTIVIDAD DE LA MUESTRA M-7



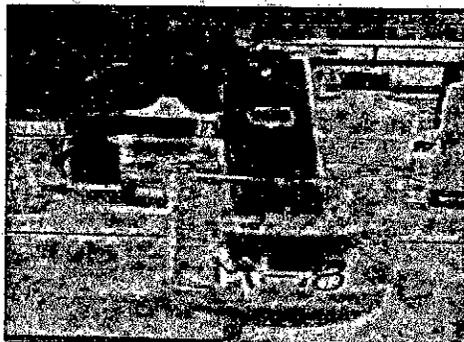
Fuente: Elaboración propia

- **Corrida experimental N° 08**

En esta octava corrida experimental, la muestra ingresa al reactor con pH=6, con las variables de 30 voltios, 20 amperios y con una densidad de corriente de 400 A/m² distribuido en cada electrodo, luego de un tiempo de remoción de 35 minutos, se recoge en 2 frascos esterilizado el cual se codifica como M-8 y a la vez es recogida en un vaso precipitado para determinar el pH y su conductividad eléctrica.

FIGURA N° 4.25

DETERMINACION DEL PH Y CONDUCTIVIDAD DE LA MUESTRA M-8



Fuente: Elaboración propia

➤ Etapa de filtro de arena y carbón activado

Después de hacer las corridas experimentales fue necesario hacer pasar en un filtro de arena y carbón activado, para poder separar el floc,

FIGURA N° 4.26

FILTRO DE ARENA Y CARBÓN



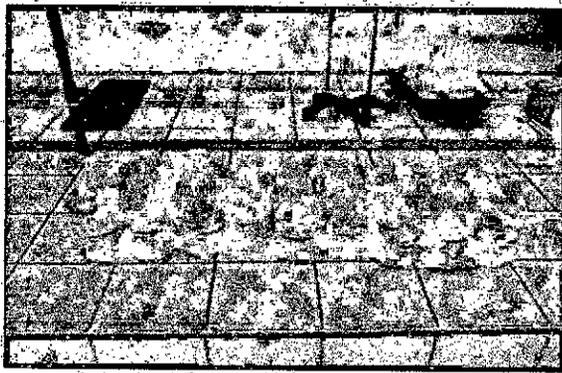
Fuente: Elaboración propia

➤ **Análisis final**

Terminada la filtración se procedió a preparar las muestras para su traslado y posterior análisis del cromo y DQO adicionalmente se analizó el agua residual pre tratada.

FIGURA N° 4.27

**MUESTRAS FINALES TOMADAS PARA EL ANALISIS DE CROMO Y DOQ EN
LABORATORIO.**



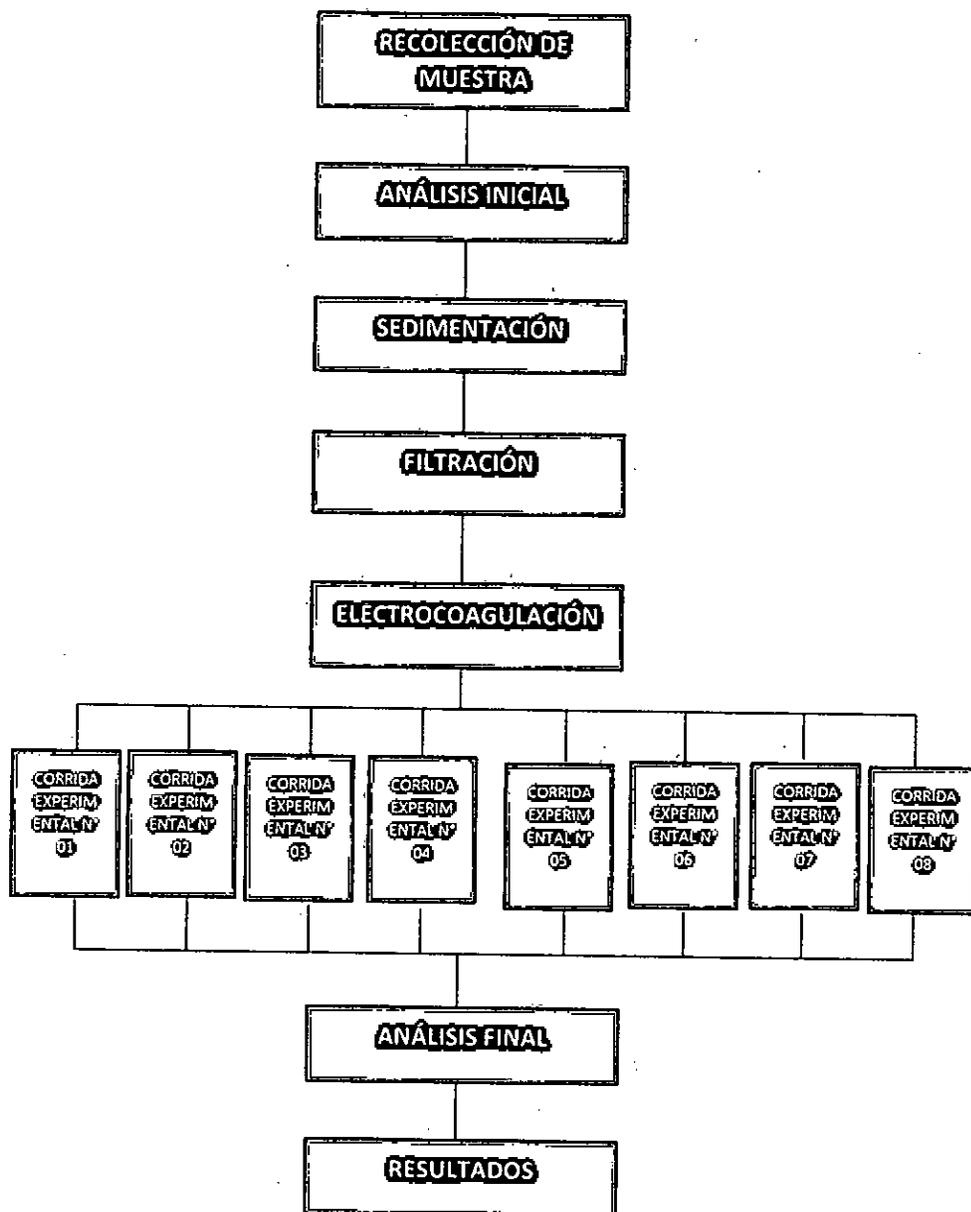
Fuente: Elaboración propia

4.6. Procesamiento estadístico y análisis de datos

Se utiliza gráficos estadísticos en excel el cual nos ayuda analizar mejor los datos.

V. RESULTADOS

GRAFICO N° 5.1
MÉTODO DE ELECTROCOAGULACIÓN A NIVEL LABORATORIO



Fuente: Elaboracion propia

5.1. Cálculo de la normalidad del NaOH

$$N = \frac{\# \text{ n de equivalente gramos}}{V \text{ solución (L)}}$$
$$\# \text{ n de equivalente gramos} = \frac{W}{\frac{M}{\theta}}$$

Donde

V: volumen de la fiola

N: normalidad del NaOH

W: masa en gramos

M: peso molecular

θ : carga del ion de una base, ácido o sal

$$\# \text{ n de equivalente gramos} = \frac{50 \text{ gr}}{\frac{40 \text{ gr/grmol}}{1}} = 1.25 \text{ gr-mol}$$

$$N = \frac{1.25 \text{ gr-mol}}{0.125 \text{ Litros}} = 10N$$

5.2. Relación de ácido sulfúrico y agua

Se llevo a una relación 1:1 donde se diluyo 25 ml de agua en 25 ml de ácido sulfúrico

5.3. Cálculo de la cantidad de Al^{+3} e hidroxido de aluminio en cada etapa

Aplicando la ecuación de Faraday para calcular el Al^{+3} en cada tiempo del proceso

$$m \text{ Al}^{+3} = \frac{PE * I * t}{96500 \text{ C/mol}}$$

m Al^{+3} : masa del aluminio (gr)

PE: es el peso equivalente de Al ($27/3=9$)

I: es la intensidad de corriente (A)

T: es el tiempo (s)

F: es la constante de Faraday (96500 C /mol)

1. Corrida experimental N°1

$$m Al^{+3} = \frac{9 \frac{gr}{mol} * 10 A * 600 s}{96500 C/mol} = 0.5595$$

2. Corrida experimental N°2

$$m Al^{+3} = \frac{9 \frac{gr}{mol} * 10 A * 1200 s}{96500 C/mol} = 1.1191$$

3. Corrida experimental N°3

$$m Al^{+3} = \frac{9 \frac{gr}{mol} * 10 A * 1800 s}{96500 C/mol} = 1.6787$$

4. Corrida experimental N°4

$$m Al^{+3} = \frac{9 \frac{gr}{mol} * 10 A * 2100 s}{96500 C/mol} = 1.9585$$

5. Corrida experimental N°5

$$m Al^{+3} = \frac{9 \frac{gr}{mol} * 20 A * 600 s}{96500 C/mol} = 1.1191$$

6. Corrida experimental N°6

$$m_{Al^{+3}} = \frac{9 \frac{gr}{mol} * 20 A * 1200 s}{96500 C/mol} = 2.2383$$

7. Corrida experimental N°7

$$m_{Al^{+3}} = \frac{9 \frac{gr}{mol} * 20 A * 1800 s}{96500 C/mol} = 3.3575$$

8. Corrida experimental N°8

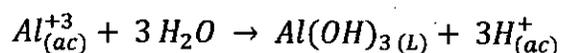
$$m_{Al^{+3}} = \frac{9 \frac{gr}{mol} * 20 A * 2100 s}{96500 C/mol} = 3.9170$$

TABLA N° 5.1
CANTIDAD GENERADA DE AL⁺³ EN GRAMOS

MUESTRA	Intensidad (A)	t(min)	t(seg)	m Al ⁺³ (gr)
M-1	10	10	600	0.5596
M-2	10	20	1200	1.1192
M-3	10	30	1800	1.6788
M-4	10	35	2100	1.9585
M-5	20	10	600	1.1192
M-6	20	20	1200	2.2383
M-7	20	30	1800	3.3575
M-8	20	35	2100	3.9171

Fuente: Elaboracion propia

En la reaccion quimica



➤ **Calculo del Al(OH)₃ de la corrida experimental N° 01**

$$0.5596 \text{ gr } Al^{+3} \times \frac{1 \text{ mol } Al(OH)_3}{1 \text{ mol } Al^{+3}} \times \frac{1 \text{ mol } Al^{+3}}{27 \text{ gr } Al^{+3}} \times \frac{78 \text{ gr } Al(OH)_3}{1 \text{ mol } Al(OH)_3} = 1.6166 \text{ gr } Al(OH)_3$$

➤ **Calculo del Al(OH)₃ de la corrida experimental N° 02**

$$1.1192 \text{ gr } Al^{+3} \times \frac{1 \text{ mol } Al(OH)_3}{1 \text{ mol } Al^{+3}} \times \frac{1 \text{ mol } Al^{+3}}{27 \text{ gr } Al^{+3}} \times \frac{78 \text{ gr } Al(OH)_3}{1 \text{ mol } Al(OH)_3} = 3.2332 \text{ gr } Al(OH)_3$$

➤ **Calculo del Al(OH)₃ de la corrida experimental N° 03**

$$1.6788 \text{ gr } Al^{+3} \times \frac{1 \text{ mol } Al(OH)_3}{1 \text{ mol } Al^{+3}} \times \frac{1 \text{ mol } Al^{+3}}{27 \text{ gr } Al^{+3}} \times \frac{78 \text{ gr } Al(OH)_3}{1 \text{ mol } Al(OH)_3} = 4.8497 \text{ gr } Al(OH)_3$$

➤ **Calculo del Al(OH)₃ de la corrida experimental N° 04**

$$1.9585 \text{ gr } Al^{+3} \times \frac{1 \text{ mol } Al(OH)_3}{1 \text{ mol } Al^{+3}} \times \frac{1 \text{ mol } Al^{+3}}{27 \text{ gr } Al^{+3}} \times \frac{78 \text{ gr } Al(OH)_3}{1 \text{ mol } Al(OH)_3} = 5.6580 \text{ gr } Al(OH)_3$$

➤ **Calculo del Al(OH)₃ de la corrida experimental N° 05**

$$1.1192 \text{ gr } Al^{+3} \times \frac{1 \text{ mol } Al(OH)_3}{1 \text{ mol } Al^{+3}} \times \frac{1 \text{ mol } Al^{+3}}{27 \text{ gr } Al^{+3}} \times \frac{78 \text{ gr } Al(OH)_3}{1 \text{ mol } Al(OH)_3} = 3.2332 \text{ gr } Al(OH)_3$$

➤ **Calculo del Al(OH)₃ de la corrida experimental N° 06**

$$2.2383 \text{ gr } Al^{+3} \times \frac{1 \text{ mol } Al(OH)_3}{1 \text{ mol } Al^{+3}} \times \frac{1 \text{ mol } Al^{+3}}{27 \text{ gr } Al^{+3}} \times \frac{78 \text{ gr } Al(OH)_3}{1 \text{ mol } Al(OH)_3} = 6.4663 \text{ gr } Al(OH)_3$$

➤ **Calculo del Al(OH)₃ de la corrida experimental N° 07**

$$3.3575 \text{ gr } Al^{+3} \times \frac{1 \text{ mol } Al(OH)_3}{1 \text{ mol } Al^{+3}} \times \frac{1 \text{ mol } Al^{+3}}{27 \text{ gr } Al^{+3}} \times \frac{78 \text{ gr } Al(OH)_3}{1 \text{ mol } Al(OH)_3} = 9.6995 \text{ gr } Al(OH)_3$$

➤ **Calculo del Al(OH)₃ de la corrida experimental N° 08**

$$3.9171 \text{ gr } Al^{+3} \times \frac{1 \text{ mol } Al(OH)_3}{1 \text{ mol } Al^{+3}} \times \frac{1 \text{ mol } Al^{+3}}{27 \text{ gr } Al^{+3}} \times \frac{78 \text{ gr } Al(OH)_3}{1 \text{ mol } Al(OH)_3} = 11.3161 \text{ gr } Al(OH)_3$$

5.4. Cálculo de las isoterma de adsorción

TABLA N° 5.2

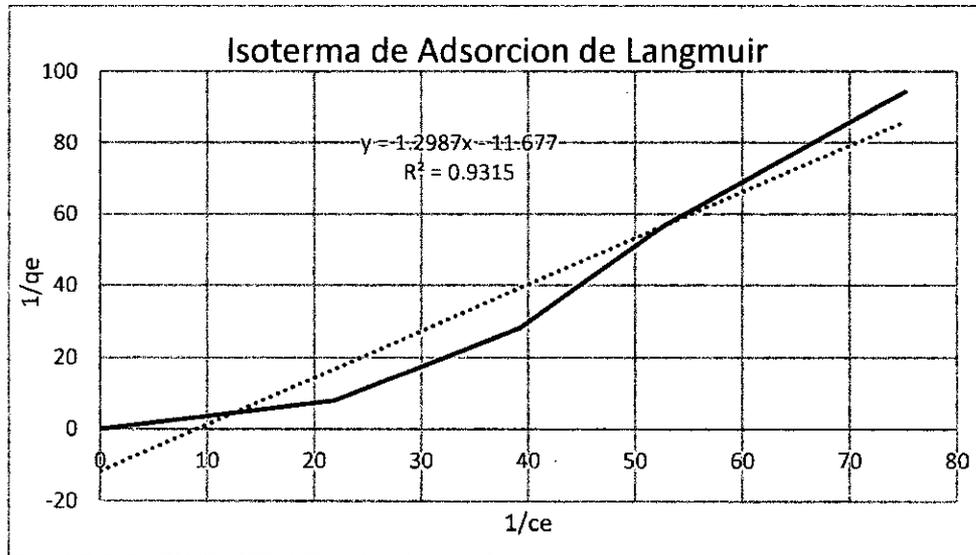
CALCULO DE LAS ISOTERMA DE ADSORCIÓN DE LANGMUIR

Resultados del primer nivel con intensidad 10A, voltaje 20V							
T (min)	Cr(mg/l)	1/ce	Cr (mg)	AlOH ₃ (gr)	qe (mg/gr)	1/ce	1/qe
0	57.79	0.01730	260.05	0	--	0.0173040	--
10	0.0457	21.8818	0.2056	1.61	0.1277329	21.881838	7.8288354
20	0.0255	39.2156	0.1147	3.23	0.0355263	39.215686	28.148148
30	0.019	52.6315	0.0855	4.84	0.0176652	52.631578	56.608187
35	0.0133	75.1879	0.0598	5.65	0.0105929	75.187969	94.402673

Fuente: Elaboracion propia

FIGURA N° 5.1

CURVA DE LAS ISOTERMA DE ADSORCIÓN DE LANGMUIR



Fuente: Elaboracion propia

TABLA N° 5.3

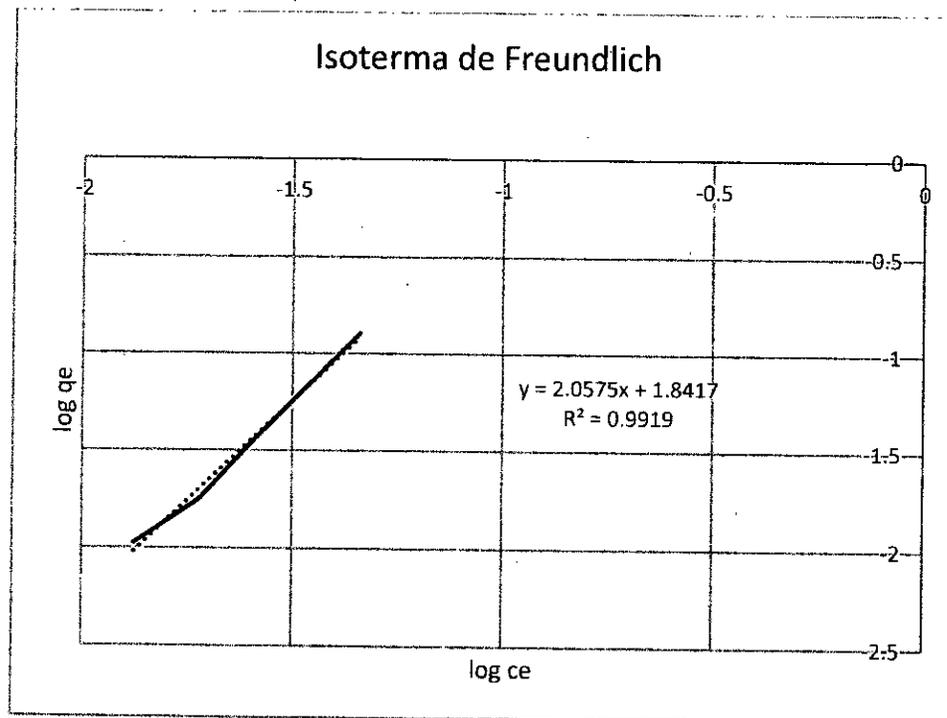
CALCULO DE LAS ISOTERMA DE ADSORCIÓN DE FREUNDLICH

Resultados del primer nivel con intensidad 10A, voltaje 20V						
t (min)	Cr (mg/l)	Cr (mg)	AlOH ₃ (gr)	qe (mg/g)	Log(ce)	Log(qe)
0	57.79	260.055	0	--	4.056815	--
10	0.0457	0.20565	1.61	0.12773292	-1.340083	-0.893697
20	0.0255	0.11475	3.23	0.03552632	-1.593459	-1.449449
30	0.019	0.0855	4.84	0.01766529	-1.721246	-1.752879
35	0.0133	0.05985	5.65	0.01059292	-1.876148	-1.974984

Fuente: Elaboracion propia

FIGURA N° 5.2

CURVA DE LA ISOTERMA DE ADSORCIÓN DE FREUNDLICH



Fuente: Elaboracion propia

De acuerdo con la correlación que se observa el mejor coeficiente de desviación pertenece a la isoterma de Freundlich con un resultado del 0.9919

$$\log(q) = \log(kf) + \frac{1}{n} * \log(C)$$

$$\text{Log kf} = 1.8417$$

Donde la constante de capacidad de adsorción (kf) es 69.4544

$$\frac{1}{n} = 2.0575$$

Donde la constante de intensidad de adsorción (n) es 0.4860

$$q = 69.4544 * c^{1/0.486}$$

TABLA N° 5.4

**RESULTADO DE LA ADSORCION DE LA ISOTERMA VS RESULTADOS
EXPERIMENTALES**

Q(ecuación)	Qe (mg/g)
0.12147233	0.12773292
0.03657263	0.03552632
0.01996344	0.01766529
0.00958351	0.01059292

Fuente: Elaboracion propia

TABLA N° 5.5

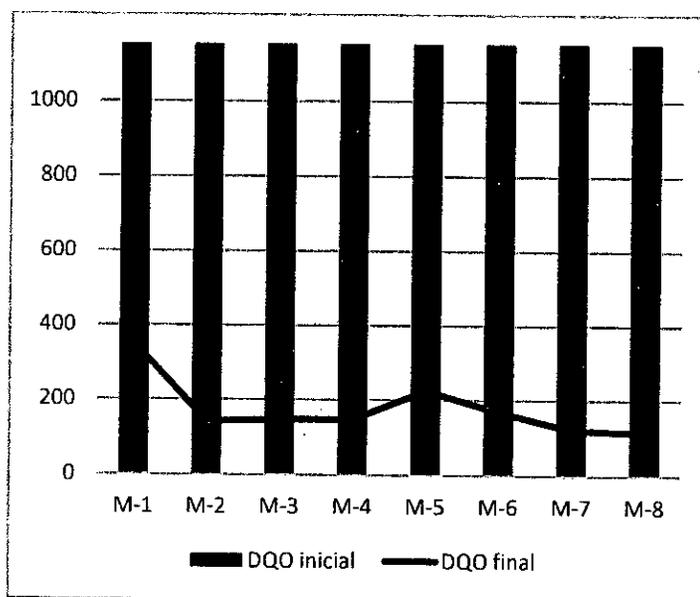
RESULTADOS DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO

MUESTRA	DQO inicial	DQO final
M-1	1153	350.3
M-2	1153	141
M-3	1153	147.7
M-4	1153	147.7
M-5	1153	224.7
M-6	1153	167.8
M-7	1153	120.9
M-8	1153	114.2

Fuente: Elaboración propia

GRAFICO N° 5.2

DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO DESPUÉS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN



Fuente: Elaboración propia

TABLA N° 5.6

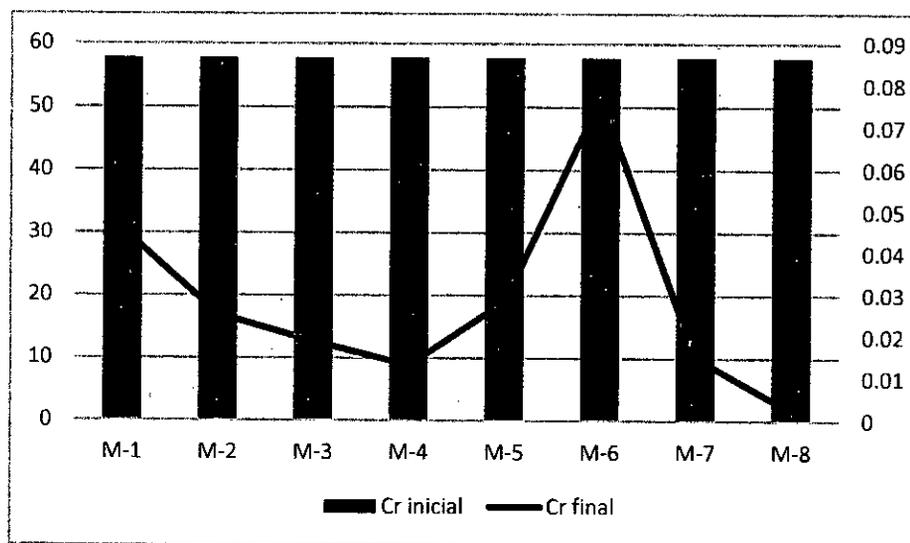
RESULTADOS DEL CROMO INICIAL Y EL CROMO FINAL

MUESTRA	CROMO inicial	CROMO final
M-1	57.79	0.0457
M-2	57.79	0.0255
M-3	57.79	0.019
M-4	57.79	0.0133
M-5	57.79	0.0285
M-6	57.79	0.0773
M-7	57.79	0.0151
M-8	57.79	0.0023

Fuente: Elaboración propia

GRAFICO N° 5.3

CROMO DESPUÉS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN



Fuente: Elaboración propia

TABLA N° 5.7

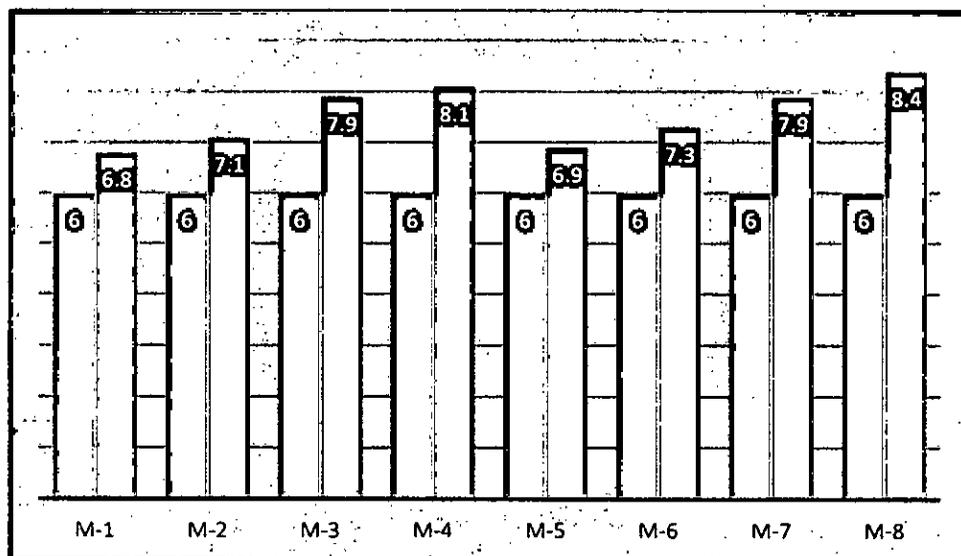
VARIACIÓN DEL PH DESPUÉS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN

MUESTRA	PH inicial	PH final
M-1	6	6.8
M-2	6	7.1
M-3	6	7.9
M-4	6	8.1
M-5	6	6.9
M-6	6	7.3
M-7	6	7.9
M-8	6	8.4

Fuente: Elaboración propia

GRAFICO N° 5.4

VARIACIÓN DEL PH DESPUÉS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN



Fuente: Elaboración propia

TABLA N° 5.8

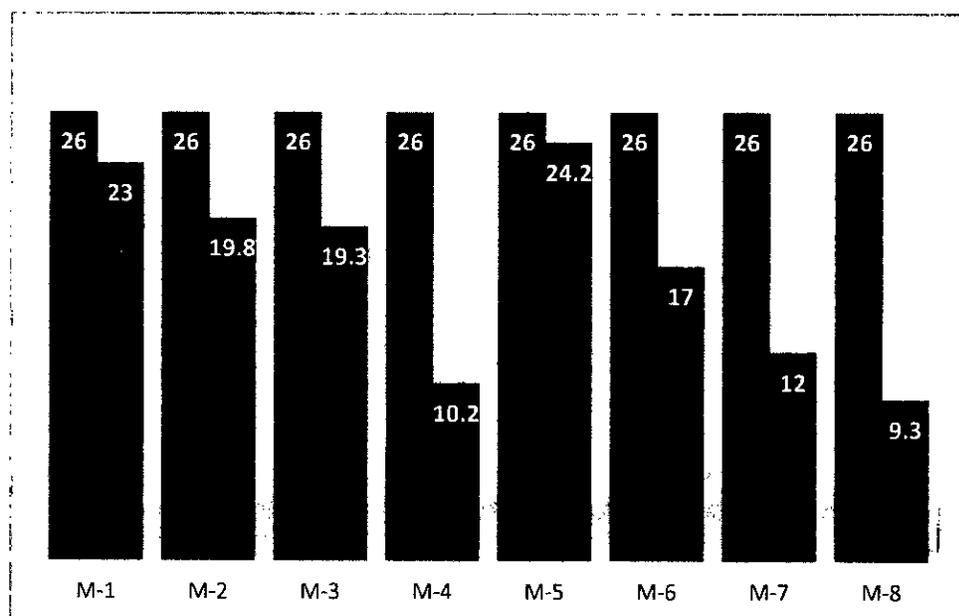
VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DESPUÉS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN

MUESTRA	CE (ms/cm) inicial	CE (ms/cm) final
M-1	26	23
M-2	26	19.8
M-3	26	19.3
M-4	26	10.2
M-5	26	24.2
M-6	26	17
M-7	26	12
M-8	26	9.3

Fuente: Elaboración propia

GRAFICO N° 5.5

VARIACIÓN DE CONDUCTIVIDAD DESPUÉS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN



Elaboración propia

TABLA N° 5.9

REMOCIÓN DEL CROMO Y DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO

MUESTRA	% REMOCIÓN DQO	% REMOCIÓN CROMO
M-1	69.62%	99.92%
M-2	87.77%	99.96%
M-3	87.19%	99.97%
M-4	87.19%	99.98%
M-5	80.51%	99.95%
M-6	85.45%	99.87%
M-7	89.51%	99.97%
M-8	90.10%	99.99%

Fuente: Elaboración propia

➤ **Calculo del Rendimiento de remoción de cromo y Demanda Química de Oxígeno**

a) Rendimiento de remoción de cromo total:

$$\% R_{\text{Cromo}} = \frac{\text{Cromo inicial} - \text{Cromo Final}}{\text{Cromo inicial}} * 100\%$$

b) Rendimiento de remoción de Demanda Química de Oxígeno:

$$\% R_{\text{DQO}} = \frac{\text{DQO inicial} - \text{DQO Final}}{\text{DQO inicial}} * 100\%$$

➤ **Corrida experimental N° 01**

$$\% R_{\text{Cromo}} = \frac{57.79 - 0.0457}{57.79} * 100\% = 99.9209$$

$$\% R_{\text{DQO}} = \frac{1153 - 350.3}{1153} * 100\% = 69.6183$$

➤ **Corrida experimental N° 02**

$$\% R_{\text{Cromo}} = \frac{57.79 - 0.0255}{57.79} * 100\% = 99.9558$$

$$\% R_{\text{DQO}} = \frac{1153 - 141.0}{1153} * 100\% = 87.7710$$

➤ **Corrida experimental N° 03**

$$\% R_{\text{Cromo}} = \frac{57.79 - 0.0190}{57.79} * 100\% = 99.9671$$

$$\% R_{\text{DQO}} = \frac{1153 - 147.7}{1153} * 100\% = 87.1899$$

➤ **Corrida experimental N° 04**

$$\% R_{\text{Cromo}} = \frac{57.79 - 0.0133}{57.79} * 100\% = 99.9769$$

$$\% R_{\text{DQO}} = \frac{1153 - 147.7}{1153} * 100\% = 87.1899$$

➤ **Corrida experimental N° 05**

$$\% R_{\text{Cromo}} = \frac{57.79 - 0.0285}{57.79} * 100\% = 99.9506$$

$$\% R_{\text{DQO}} = \frac{1153 - 224.7}{1153} * 100\% = 80.5117$$

➤ **Corrida experimental N° 06**

$$\% R_{\text{Cromo}} = \frac{57.79 - 0.0773}{57.79} * 100\% = 99.8662$$

$$\% R_{\text{DQO}} = \frac{1153 - 167.8}{1153} * 100\% = 85.4466$$

➤ **Corrida experimental N° 07**

$$\% R_{\text{Cromo}} = \frac{57.79 - 0.0151}{57.79} * 100\% = 99.9738$$

$$\% R_{\text{DQO}} = \frac{1153 - 120.9}{1153} * 100\% = 89.5143$$

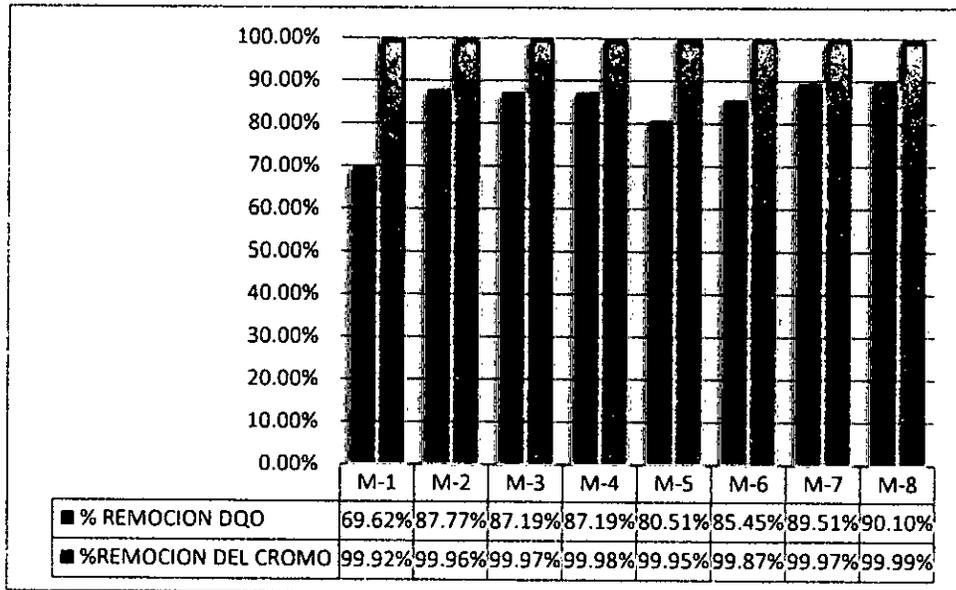
➤ **Corrida experimental N° 08**

$$\% R_{\text{Cromo}} = \frac{57.79 - 0.0023}{57.79} * 100\% = 99.9960$$

$$\% R_{\text{DQO}} = \frac{1153 - 114.2}{1153} * 100\% = 90.0954$$

GRAFICO N° 5.6

PORCENTAJE DE REMOCIÓN DEL CROMO Y DQO



Fuente: Elaboración propia

5.5. Análisis económico

Para poder determinar la estimación de costos, se analiza cada corrida experimental y se selecciona el menor costo en energía eléctrica y con un volumen de 0.0045 m³, sabiendo que 1KWh cuesta 0.4226 soles.

$$C_{ENERGIA} = \frac{V * I * t}{volumen} * \frac{0.4226 \text{ soles}}{1KWh}$$

V: corresponde al voltaje en voltios (v)

I: corresponde a la intensidad de la fuente (A)

t: corresponde al tiempo de remoción en horas

Volumen: corresponde al volumen del reactor electrocoagulador en m³

Calculo del costo de energía en la corrida experimental N° 01

$$C_{ENERGIA1} = \frac{20V \cdot 10A \cdot 0.16h \cdot 0.4226 \text{ soles}}{0.0045 \text{ m}^3 \cdot 1KWh} = 3.13 \frac{\text{soles}}{\text{m}^3}$$

Calculo del costo de energía en la corrida experimental N° 02

$$C_{ENERGIA2} = \frac{20V \cdot 10A \cdot 0.33h \cdot 0.4226 \text{ soles}}{0.0045 \text{ m}^3 \cdot 1KWh} = 6.26 \frac{\text{soles}}{\text{m}^3}$$

Calculo del costo de energía en la corrida experimental N° 03

$$C_{ENERGIA3} = \frac{20V \cdot 10A \cdot 0.5h \cdot 0.4226 \text{ soles}}{0.0045 \text{ m}^3 \cdot 1KWh} = 9.39 \frac{\text{soles}}{\text{m}^3}$$

Calculo del costo de energía en la corrida experimental N° 04

$$C_{ENERGIA4} = \frac{20V \cdot 10A \cdot 0.58h \cdot 0.4226 \text{ soles}}{0.0045 \text{ m}^3 \cdot 1KWh} = 10.95 \frac{\text{soles}}{\text{m}^3}$$

Calculo del costo de energía en la corrida experimental N° 05

$$C_{ENERGIA5} = \frac{30V \cdot 20A \cdot 0.16h \cdot 0.4226 \text{ soles}}{0.0045 \text{ m}^3 \cdot 1KWh} = 9.39 \frac{\text{soles}}{\text{m}^3}$$

Calculo del costo de energía en la corrida experimental N° 06

$$C_{ENERGIA6} = \frac{30V \cdot 20A \cdot 0.33h \cdot 0.4226 \text{ soles}}{0.0045 \text{ m}^3 \cdot 1KWh} = 18.78 \frac{\text{soles}}{\text{m}^3}$$

Calculo del costo de energía en la corrida experimental N° 07

$$C_{ENERGIA7} = \frac{30V \cdot 20A \cdot 0.5h \cdot 0.4226 \text{ soles}}{0.0045 \text{ m}^3 \cdot 1KWh} = 28.17 \frac{\text{soles}}{\text{m}^3}$$

Calculo del costo de energía en la corrida experimental N° 08

$$C_{ENERGIA8} = \frac{30V \cdot 20A \cdot 0.58h \cdot 0.4226 \text{ soles}}{0.0045 \text{ m}^3 \cdot 1KWh} = 32.86 \frac{\text{soles}}{\text{m}^3}$$

Se selecciona el costo de la primera corrida experimental, por ser el más rentable

resultando $3.13 \frac{\text{soles}}{\text{m}^3}$

❖ **Costos de materiales, equipos y análisis de laboratorio**

TABLA N° 5.10

COSTO DE MATERIALES Y EQUIPOS

MATERIALES	COSTO (SOLES)
Celda de acrílico	200
Electrodos	100
Cables conectores con pinzas	30
Potenciómetro	70
Conductímetro	130
Multímetro	60
Fuente regulable	500
Insumos químicos (NaOH y H ₂ SO ₄)	65
Carbón activado	80
COSTO TOTAL	1235

Fuente: Elaboración propia

TABLA N° 5.11

CALCULO DEL COSTO DEL ANÁLISIS EN LABORATORIO

MATERIALES	COSTO (SOLES)
Análisis de ensayo total	2000
movilidad	100
COSTO TOTAL	2100

Fuente: Elaboración propia

$$C_{ANALISIS}=2100 \text{ soles}$$

$$C_{MATERIALES}=1235 \text{ soles}$$

$$C_{ENERGIA} = 3.13 \frac{\text{soles}}{\text{m}^3} * 0.0045 \text{m}^3 = 0.014 \text{ soles}$$

$$\text{Costo total} = \text{costo análisis} + \text{costo materiales} + \text{costo energía}$$

$$\text{Costo total} = 2100 + 1235 + 0.014 = 3335.014 \text{ soles}$$

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Contratación de hipótesis con los resultados

1. Se comprueba que el tratamiento de aguas residuales de la industria curtiembre mediante el método de electrocoagulación reduce significativamente la demanda química de oxígeno y Cromo. Usando electrodo de hierro y aluminio, controlando las variables de intensidad de corriente y voltaje, se logró efectuar un diseño experimental de 2 niveles con el cual se comprobó, observando el vector respuesta de % remoción del DQO y del % remoción del cromo.
2. Con el conocimiento de características fisicoquímicas iniciales de la muestra agua residual de la industria de curtiembre, se comprueba que superan los Valores Máximos Admisibles. Para el caso del cromo supera en 477.9% y para la demanda química de oxígeno supera en un 15.3% de dicha norma. Y para el cromo hexavalente no se detectó puesto en el análisis fisicoquímico inicial presenta valor por debajo de los límites de cuantificación del método.
3. Partiendo con un Ph de 6 dentro el reactor electrocoagulación, el efecto de la intensidad de corriente sobre los electrodos, en especial sobre el ánodo de sacrificio, se produce el fenómeno de la electroquímica donde se liberan los iones Al^{+3} y forme el $Al(OH)_3$, para el caso del agua se produce la reducción formándose el gas H_2 y a la vez se libera dentro la solución el ion $(OH)^-$ Conforme

pase el tiempo la muestra tiende a la alcalinidad. Ver tabla N° V.4, además al momento de hacer las 8 corridas experimentales se puede apreciar que en todas hay muy buena remoción del cromo y DQO. Ver tabla N° V.6, siendo el más óptimo al trabajar con una densidad de corriente de 200 A/cm² con una intensidad de corriente de 20 Amperios, distribuido en sus 10 electrodos con un tiempo de trabajo de 35 minutos y 30 Voltios el cual da un % de remoción del cromo de 99.99% y el % de remoción del DQO es del 90.10%.

6.2 Contratación de los resultados con otros estudios similares

1. (ARIAS CEPEDA, 2013), obtuvo un 95% de remoción del cromo y un 70% de remoción del DQO, para lo cual determino que sus variables optimas son con un pH inicial (5 a 7), con una intensidad de corriente (2,1 A a 3,6 A) con un tiempo de trabajo de 20 minutos utilizando en el proceso dos tipos de corriente eléctrica; la alterna y la continua.

VII. CONCLUSIONES

1. Se realizó el tratamiento de aguas residuales de la industria de curtiembre mediante el método de electrocoagulación el cual se redujo la demanda química de oxígeno a 114,2 mg/l y el cromo a 0,0023 mg/l.
2. Se determinaron las características físico-químicas del agua residual de la industria de curtiembre las cuales presenta una concentración de cromo de 57,79 mg/l y la concentración de la demanda química de oxígeno de 1153 mg/l.
3. Se determinó que los parámetros óptimos para el tratamiento de las aguas residuales de la industria de curtiembre mediante el método de electrocoagulación para la reducción de la demanda química de oxígeno y cromo, que tienen influencia significativa en la reducción son, la intensidad de corriente de 20 A con 30 V caída de tensión y un tiempo de trabajo de 35 minutos dando una remoción de 90.1 % de la demanda química de oxígeno y 99.99 % de remoción de cromo.
4. Concluimos que las características físicoquímicas de nuestra agua residual industrial de la industria de curtiembre cumplen con la norma valores máximos admisibles del D.S N° 021-2009-VIVIENDA. Ya que no supera los valores admisibles de dicha norma, argumentada en base a los informes de ensayo obtenidos en análisis por espectrometría.

VIII. RECOMENDACIONES

1. Reemplazar el tipo de electrodo de hierro con material de acero inoxidable para evitar la formación de óxidos los cuales pueden interferir en el método de electrocoagulación.
2. La carga orgánica y los sólidos suspendidos son los que interfieren en el proceso de electrocoagulación, por ello se recomienda que antes de realizar el tratamiento del agua es necesario modificar el pH, para poder determinar en qué medio es donde ocurre la máxima sedimentación y poder separarlos, para que en la siguiente etapa no interfiera con el método y por ende nos dé una mala remoción.
3. Realizar un pre - tratamiento previo mediante el uso de diferentes sustancias con características de floculantes (opuntia ficus-indica), para reducir la carga orgánica y no interfiera en el proceso de electrocoagulación.
4. Después de terminado el método de electrocoagulación, es necesario hacer separar en un filtro de arena, para tener un agua residual ligeramente clara con escasos sólidos suspendido
5. Caracterizar el agua residual inicial del curtido para identificar qué tipos de metales pesados existen que puedan interferir en el proceso de electrocoagulación.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGUILAR ASCON, E. A. (2015). Evaluacion de la Eficiencia de una Celda de Electrocoagulacion a Escala laboratorio Para el Tratamiento de Agua.Tesis Tiulacion. Universidad Nacional Mayor de San Marcos . Lima.
2. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (1976). Manual del Agua (Tercera Edición ed.). Balderas, México: Limusa.
3. ARANGO RUIZ, Á. (2005). La Electrocoagulación: Una Alternativa para el Tratamiento de Aguas Residuales. Lasallista de Investigación. vol.2, :49-56.
4. ARIAS CEPEDA, W. G. (2013). Remoción de Cromo (III) y DQO a Través de Electrocoagulación en Aguas Residuales de la Industria Curtiembre Haciendo uso Racional de la Energía.Tesis Msestria.Colombia. Universidad Libre. Obtenido de <http://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7834/AriasCepedaWilliamGerman2013.pdf?sequence=1>
5. AUQTIC. (2017). Aguas Residuales De Curtiembres: Tratamiento Primario y Secundario. Recuperado el 25 de Abril de 2017, de <http://cueronet.com/auqtic/links.htm>
6. BARBOZA PALOMINO, G. I. (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 maestria.Lima. Universidad Nacional de Ingeniería. Obtenido de http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/338/1/barboza_pg.pdf

7. BARRERA DIAZ, C. E. (2014). Aplicaciones Electroquímica al Tratamiento de Aguas Residuales. Cuauhtémoc, México: Reverte S.A.
8. CARRANZA NORIEGA, R. (2002). Tecnología Industrial. Callao: Universidad Nacional del Callao.
9. CARRETO, A. (6 de julio de 2017). Apuntes Científicos. Adsorción. Obtenido de <<http://apuntescientificos.org/adsorcionqbp.html>>
10. D.S N°02-2009-VIVIENDA. (2009). Valores Máximos Admisibles (VMA) de las Descargas de Aguas Residuales no Domésticas en el sistema de Alcantarillado Sanitario. Recuperado el 15 de Mayo de 2017, de http://www3.vivienda.gob.pe/direcciones/Documentos/DS_2009_021.pdf
11. DOMÍNGUEZ, Samantha Y BETANCOURT, Estefania. (28 de Marzo de 2017). Electrocoagulación. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos99/electrocoagulation/electrocoagulation.shtml#articulo>
12. ESPIGARES GARCÍA, M. y. (18 de Abril de 2017). Aspectos Sanitarios del Estudio de las Aguas. Obtenido de http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf
13. FLOYD, T. L. (2007). Principios de Circuitos Eléctricos (Octava Edición ed.). México: Pearson Educación.

14. IVONNE LINARES, H. (2011). Oxidación de Materia Orgánica Persistente en Aguas Residuales Industriales Mediante Tratamientos Electroquímicos. Revista Avances en Ciencias e Ingeniería, vol. 2(Nº1), :21-36. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/3236/323627681003.pdf>
15. M. Yousuf A. Mollah. SCHENNACH, R. R. (2001). Electrocoagulation (EC) - science and applications. Elsevier Science B.V, 33-40.
16. MERA RIVERA, J. (2010). Gestion Ambiental Para Minimizar la Contaminacion Generada por la Industria de Curtiembre en el Distrito de el Porvenir.Trujillo. Tesis Tiulacion. Universidad Nacional de Trujillo . Trujillo.
17. METCALF & AMP, EDDY INC. (1996). Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. México: Mc Graw Hill Interamericana.
18. N°01-2015-VIVIENDA, D. (2015). Modifica Artículos de Valores Máximos Admisibles (VMA) de las Descargas de Aguas Residuales no Domesticas en el sistema de Alcantarillado Sanitario. Recuperado el 19 de Mayo de 2017, de <http://sial.segat.gob.pe/normas/modifica-diversos-articulos-decreto-supremo-no-021-2009-vivienda-que>
19. OÑA PAZMIÑO, B. G. (16 de Octubre de 2013). Tratamiento Avanzado de Aguas Residuales del Proceso de Lavado y Tinturado de Jeans en la Empresa “Mundocolor” Mediante Electrocoagulación.Tesis de Grado.Ecuador. Escuela Superior Politécnica. Obtenido de <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/3015/1/85T00278.pdf>

20. PEREZ CUASQUER, G. J. (16 de Junio de 2015). Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria Textil Mediante Procesos Electroquímicos. Tesis de título. Quito. Universidad Central de Ecuador. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/4518/1/T-UCE-0017-116.pdf>
21. PINEDO OCHOA, R. S. (2012). Impactos Ambientales Generados por la Curtiembre d-leyse, en el Distrito de el Porvenir, Provincia Trujillo, Region la Libertad. Tesis Titulacion. Tingo Maria: Universidad Nacional Agraria de la Selva.
22. PRIETO GARCIA, F. (Diciembre de 2012). Electrocoagulación: Una Alternativa para Depuración de Lactosuero Residual. AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica, vol.5 (Nº3), :71-72.
23. RAMALHO, R. S. (1990). Tratamiento de Aguas Residuales. Barcelona, España: Reverte, S.A.
24. RAYMOND CHANG, W. C. (2010). Química (Décima Edición ed.). México: Mc grawhill Interamericana Editores S.A.
25. RESTREPO MEJIA, A. P., & ARANGO RUIZ, Á. y. (2006). La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. Producción + Limpia, volumen 1(Nº2), :59-74.
26. SCRIBD. (2007). Recuperado el 8 de Mayo de 2017, de <https://es.scribd.com/doc/44017815/Escala-Baume>

BIBLIOGRAFÍA

1. Aguas Residuales De Curtiembres, Tratamiento Primario y Secundario. Consultado el 25 de abril de 2017. Disponible en: <http://cueronet.com/auqtic/links.htm>
2. Apuntes Científicos. Adsorción. Consultado el 22 de abril de 2017. Disponible en: <http://apuntescientificos.org/adsorcionqbp.html>
3. Aspectos Sanitarios del Estudio de las Aguas. Consultado el 24 mayo de 2017. Disponible en: http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf
4. Electrocoagulación. Consultado el 18 mayo de 2017. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos99/electrocoagulacion/electrocoagulacion.shtml.articul>
5. Escala-Baume. Consultado el 20 junio de 2017. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/44017815/Escala-Baume>
6. Modifica Artículos de Valores Máximos Admisibles (VMA) de las Descargas de Aguas Residuales no Domesticas en el sistema de Alcantarillado Sanitario.

Consultado el 10 de junio de 2017.. Disponible en:
<http://sial.segat.gob.pe/normas/modifica-diversos-articulos-decreto-supremo-no-021-2009-vivienda-que>

7. Oxidación de Materia Orgánica Persistente en Aguas Residuales Industriales Mediante Tratamientos Electroquímicos. Consultado el 4 junio de 2017. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/3236/323627681003.pdf>
8. Reducción de la Carga de Contaminantes de las Aguas Residuales de la Planta de Tratamiento de Totorá - Ayacucho Empleando la Técnica de Electrocoagulación. Consultado el 18 de abril del 2017. Disponible en: http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/338/1/barboza_pg.pdf
9. Remoción de Cromo (III) y DQO a Través de Electrocoagulación en Aguas Residuales de la Industria Curtiembre Haciendo uso Racional de la Energía. Consultado el 25 de marzo de 2017. disponible en: <http://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7834/AriasCepedaWilliamGerman2013.pdf?sequence=1>
10. Tratamiento Avanzado de Aguas Residuales del Proceso de Lavado y Tinturado de Jeans en la Empresa “Mundo color” Mediante Electrocoagulación. Consultado

el 5 de mayo de 2017. Disponible en:
<http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/3015/1/85T00278.pdf>

11. Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria Textil Mediante Procesos Electroquímicos. Consultado el 15 de junio de 2017. Disponible en:
<http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/4518/1/T-UCE-0017-116.pdf>

12. Valores Máximos Admisibles (VMA) de las Descargas de Aguas Residuales no Domesticas en el sistema de Alcantarillado Sanitario. Consultado el 15 de mayo de 2017. Disponible en:
http://www3.vivienda.gob.pe/direcciones/Documentos/DS_2009_021.pdf

ANEXOS

1. Matriz de consistencia

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA CURTIEMBRE MEDIANTE EL MÉTODO DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA REDUCCIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO Y CROMO

PROBLEMA PRINCIPAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO DE RECOLECCIÓN DE DATOS
¿Cómo debe ser el tratamiento de aguas residuales de la industria curtiembre mediante el método de electrocoagulación para la reducción de la demanda química de oxígeno y Cromo?	Realizar el tratamiento de aguas residuales de la industria curtiembre mediante el método de electrocoagulación para la reducción de la demanda química de oxígeno y Cromo.	El tratamiento de aguas residuales de la industria curtiembre debe ser mediante el método de electrocoagulación que reduce significativamente la demanda química de oxígeno y Cromo.	Electrocoagulación en aguas residuales de la industria curtiembre	Parámetros de operación.	<ul style="list-style-type: none"> ➤ DQO (mg/L) ➤ Cromo (mg/L) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Colorimétrico ➤ Espectrometría de emisión atómica
SUB-PROBLEMAS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPÓTESIS ESPECIFICAS	VARIABLES DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO DE RECOLECCIÓN DE DATOS
¿Cuáles son las características físico químicas de las aguas residuales de la industria curtiembre?	Determinar las características físico químicas de las aguas residuales de la industria curtiembre	Las características físicas de las aguas residuales de la industria curtiembre son: pH, conductividad. Y las químicas son : cromo, demanda química de oxígeno, los cuales superan los Valores Máximos Admisibles del D.S N° 021-2009-VIVIENDA	Parámetros químicos	Parámetros de operación	<ul style="list-style-type: none"> ➤ pH ➤ conductividad eléctrica (ms/cm) ➤ DQO (mg/L) ➤ Cromo (mg/L) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Potenciómetro ➤ Conductímetro ➤ Colorimétrico ➤ Espectrometría de emisión atómica
¿Cuáles son los parámetros óptimos para el tratamiento de las aguas residuales mediante el método de electrocoagulación para reducir la demanda química de oxígeno y Cromo?	Determinar los parámetros óptimos para el tratamiento de las aguas residuales mediante el método de electrocoagulación para reducir la demanda química de oxígeno y Cromo.	Los parámetros óptimos son: pH: 6 tiempos de remoción (min): 10, 20, 30, 35 Tensión (V): 20-30 Intensidad (A): 10-20	Reducción de la demanda química de oxígeno y Cromo en el agua residual tratada	Parámetros de operación	<ul style="list-style-type: none"> ➤ pH ➤ Conductividad eléctrica (ms/cm) ➤ Intensidad (A) ➤ Tensión (V) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Potenciómetro ➤ Conductímetro ➤ Amperímetro ➤ Voltímetro

2. Análisis de ensayo inicial

INFORME DE ENSAYO N° 171626 CON VALOR OFICIAL

Nombre del Cliente : ELMER HUMBERTO SILVA SALAZAR
 Dirección : Universidad Nacional del Callao
 Solicitado Por : Sr. Elmer Silva
 Referencia : Cotización N° 0501G-17R01
 Proyecto : Tratamiento de Agua Residual de la Industria Curtiembre Mediante el Método de Electrocoagulación
 Procedencia : Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao
 Muestreo Realizado Por : El cliente
 Cantidad de Muestra : 1
 Producto : Agua Residual Industrial
 Fecha de Recepción : 2017/06/27
 Fecha de Ensayo : 2017/05/27 al 2017/06/09
 Fecha de Emisión : 2017/06/09

La muestra fue recepcionada en buenas condiciones

I. Resultados

Código de Laboratorio		171626-01	
Código de Cliente		M-INICIAL	
Fecha de Muestreo		27/05/2017	
Hora de Muestreo (h)		11:30	
Ubicación Geográfica (WGS 84)		N 8065810 E 0299447	
Tipo de Producto		Agua Residual Industrial	
Tipo Ensayo	Unidad	L.D.M.	Resultados
Metales Totales (ICP-AES)			
Ag	Plata	mg/L	0,0014 <0,0014
Al	Aluminio	mg/L	0,0077 <0,0077
As	Arsénico	mg/L	0,001 <0,001
B	Boro	mg/L	0,0012 0,6128
Ba	Bario	mg/L	0,0004 0,2008
Be	Berilio	mg/L	0,0002 <0,0002
Ca	Calcio	mg/L	0,0035 502,1
Cd	Cadmio	mg/L	0,00005 <0,00005
Ce	Cerio	mg/L	0,0098 <0,0098
Co	Cobalto	mg/L	0,0007 <0,0007
Cr	Cromo	mg/L	0,0023 57,79
Cu	Cobre	mg/L	0,0005 0,3544
Fe	Hierro	mg/L	0,0052 3,132
K	Potasio	mg/L	0,0453 72,17
Li	Litio	mg/L	0,0006 <0,0006
Mg	Magnesio	mg/L	0,0107 158,3
Mn	Manganeso	mg/L	0,0004 0,5374
Mo	Molibdeno	mg/L	0,0018 <0,0018
Na	Sodio	mg/L	0,0074 >1000
Ni	Níquel	mg/L	0,0015 <0,0015
P	Fósforo	mg/L	0,0237 <0,0237
Pb	Plomo	mg/L	0,0004 <0,0004
Sb	Antimonio	mg/L	0,0015 <0,0015
Se	Selenio	mg/L	0,001 <0,001
Si	Silicio	mg/L	0,0051 19,03
Sn	Estaño	mg/L	0,0026 <0,0026
Sr	Estroncio	mg/L	0,0002 4,358
Ti	Titanio	mg/L	0,0021 <0,0021
Tl	Talio	mg/L	0,0002 <0,0002
V	Vanadio	mg/L	0,0005 <0,0005
Zn	Zinc	mg/L	0,0008 0,0482

Leyenda: L.C.M. = Límite de cuantificación del método, L.D.M. = Límite de detección del método, "—" = No Analizado,
 "<" = Menor que el L.C.M. o L.D.M. indicado, ">" = Mayor al rango lineal permitido por la técnica analítica.

* : Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA

INFORME DE ENSAYO Nº 171626 CON VALOR OFICIAL

Código de Laboratorio	171626-01		
Código de Cliente	M-INOCIAL		
Fecha de Muestreo	27/05/2017		
Hora de Muestreo (h)	11:30		
Ubicación Geográfica (WGS 84)	N 8865810 E 0269447		
Tipo de Producto	Agua Residual Industrial		
Tipo Ensayo	Unidad	L.C.M.	Resultados
Fisicoquímicos			
Cromo Hexavalente	mg/L	0,010	<0,010
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5.0	1153

Leyenda: L.C.M. = Límite de cuantificación del método, L.D.M. = Límite de detección del método, <L.C.M. o L.D.M. indicado = Resultado cuantificable, "ND" = No Analizado.
 >L.C.M. = Mayor al rango lineal permitido por la técnica analítica <L.D.M. = Límite de Detección de Método.

II - Métodos y Referencias

Tipo Ensayo	Norma Referencia	Título
Fisicoquímicos		
Cromo Hexavalente	SM 3500 Cr - B, 22nd. Ed. 2012	Chromium, Colorimetric Method
Demanda Bioquímica de Oxígeno	SM 5210 B, 22nd. Ed. 2012	Biochemical Oxygen Demand, 5-Days BOD Test
Metales (ICP-AES)		
Metales	EPA Method 200.7, Rev. 4.4, 1994	Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry

SIGLAS: "SM": Standard methods for the examination of Water and Wastewater APHA, AWWA, WEF 22nd Ed. 2012
 "EPA": U.S. Environmental Protection Agency, Methods for Chemical Analysis

III - Observaciones

El parámetro Cr Total (ICP-AES) se reporta como no acreditado por estar fuera del alcance.

Alfonso Vilca M.
GCSSA
C.Q.P. Nº 587

Los resultados presentados corresponden sólo a la muestra indicada, según la cadena de custodia correspondiente.
 Estos resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto.
 El tiempo de custodia de la muestra es de un mes calendario desde el ingreso de la muestra al Laboratorio.
 El tiempo de perecibilidad de la muestra está en función a lo declarado en los métodos normalizados de ensayo y rige desde la toma de muestra.
 Está prohibida la reproducción parcial del presente documento, salvo autorización de Envirotest S.A.C.

** FIN DEL INFORME **

3. Análisis de ensayo final

INFORME DE ENSAYO Nº 172407 CON VALOR OFICIAL

Nombre del Cliente : ELMER HUMBERTO SILVA SALAZAR
 Dirección : Universidad del Caño
 Solicitado Por : ELMER HUMBERTO SILVA SALAZAR
 Referencia : Cotización Nº 06056-17R01
 Proyecto : Tratamiento de Agua Residual de la Industria Curtiembre mediante el método de Electrocoagulación
 Procedencia : Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Caño
 Muestreo Realizado Por : ELMER HUMBERTO SILVA SALAZAR
 Cantidad de Muestra : 9
 Producto : Agua Residual
 Fecha de Recepción : 2017/07/20
 Fecha de Ensayo : 2017/07/20 al 2017/08/03
 Fecha de Emisión : 2017/08/03

La muestra fue recepcionada en buenas condiciones

I. Resultados

Código de Laboratorio	172407-01	172407-02	172407-03	172407-04	172407-05	172407-06		
Código de Cliente	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6		
Fecha de Muestreo	19/07/2017	19/07/2017	19/07/2017	19/07/2017	19/07/2017	19/07/2017		
Hora de Muestreo (h)	10:00	11:00	13:00	13:50	14:30	15:30		
Ubicación Geográfica (WGS 84)	E 0269447 N 8665810							
Tipo de Producto	Agua Residual Industrial							
Tipo Ensayo	Unidad	LCM	Resultados					
Físicoquímicos								
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5,0	350,3	141,0	147,7	147,7	224,7	167,8

Leyenda: L.C.M. = Límite de cuantificación del método, L.D.M. = Límite de detección del método. * < L.C.M. o L.D.M. indicado = Resolución cuantificable, "-" = No Analizado.
 > = Mayor al rango lineal permitido por la técnica analítica. ** = Límite de Detección de Método.

Código de Laboratorio	172407-07	172407-08	172407-09		
Código de Cliente	M-7	M-8	M-9		
Fecha de Muestreo	19/07/2017	19/07/2017	19/07/2017		
Hora de Muestreo (h)	18:00	19:30	09:00		
Ubicación Geográfica (WGS 84)	E 0269447 N 8665810	E 0269447 N 8665810	E 0269447 N 8665810		
Tipo de Producto	Agua Residual Industrial	Agua Residual Industrial	Agua Residual Industrial		
Tipo Ensayo	Unidad	LCM	Resultados		
Físicoquímicos					
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5,0	120,9	114,2	449,1

Leyenda: L.C.M. = Límite de cuantificación del método, L.D.M. = Límite de detección del método. * < L.C.M. o L.D.M. indicado = Resolución cuantificable, "-" = No Analizado.
 > = Mayor al rango lineal permitido por la técnica analítica. ** = Límite de Detección de Método.

Código de Laboratorio	172407-01	172407-02	172407-03	172407-04	172407-05	172407-06			
Código de Cliente	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6			
Fecha de Muestreo	19/07/2017	19/07/2017	19/07/2017	19/07/2017	19/07/2017	19/07/2017			
Hora de Muestreo (h)	10:00	11:00	13:00	13:50	14:30	15:30			
Ubicación Geográfica (WGS 84)	E 0269447 N 8665610								
Tipo de Producto	Agua Residual Industrial								
Tipo Ensayo	Unidad	L.D.M.	Resultados						
Metales Totales (ICP-AES)									
Cr	Cromo	mg/L	0,0023	0,0457	0,0255	0,0190	0,0133	0,0285	0,0773

Leyenda: L.C.M. = Límite de cuantificación del método, L.D.M. = Límite de detección del método, "-" = No Analizado.

* < Menor que el L.C.M. o L.D.M. Indicado, * > Mayor al rango lineal permitido por la técnica analítica

INFORME DE ENSAYO N° 172407 CON VALOR OFICIAL

Código de Laboratorio	172407-07	172407-08	172407-09			
Código de Cliente	M-7	M-8	M-9			
Fecha de Muestreo	19/07/2017	19/07/2017	19/07/2017			
Hora de Muestreo (h)	18:00	19:30	09:00			
Ubicación Geográfica (WGS 84)	E 0269447 N 8665610	E 0269447 N 8665610	E 0269447 N 8665610			
Tipo de Producto	Agua Residual Industrial	Agua Residual Industrial	Agua Residual Industrial			
Tipo Ensayo	Unidad	L.D.M.	Resultados			
Metales Totales (ICP-AES)						
Cr	Cromo	mg/L	0,0023	0,0151	<0,0023	0,1048

Leyenda: L.C.M. = Límite de cuantificación del método, L.D.M. = Límite de detección del método, "-" = No Analizado.

* < Menor que el L.C.M. o L.D.M. Indicado, * > Mayor al rango lineal permitido por la técnica analítica

II - Métodos y Referencias

Tipo Ensayo	Norma Referencial	Título
Físicoquímicos		
Cromo Hexavalente	SM 3500 Cr - B, 22nd Ed 2012	Chromium Colorimetric Method
Metales (ICP-AES)		
Metales Totales (ICP-AES) (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Sb, Se, Si, Sn, Sr, Tl, Ti, V and Zn)	EPA Method 200.7, Rev. 4.4., 1994	Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry

ISOLAR "SM", Standard methods for the examination of Water and Wastewater APHA, AWWA, WEF 22nd Ed 2012

Alfonso Vilca M.
GCSSA
C.Q.P. N° 587

Los resultados presentados corresponden sólo a la muestra indicada, según la cadena de custodia correspondiente

Estos resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto

El tiempo de custodia de la muestra es de un mes calendario desde el ingreso de la muestra al Laboratorio

El tiempo de perecibilidad de la muestra está en función a lo declarado en los métodos normalizados de ensayo y rige desde la toma de muestra

Está prohibida la reproducción parcial del presente documento, salvo autorización de Emisores S.A.C.

"" FIN DEL INFORME ""