



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**APLICACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE
COLOR EN LAS AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL**

Luis Arturo Méndez Escobar

Asesorado por Ing. Mario Estrada Asturias

Ing. Hans Schieber

Guatemala, julio de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**APLICACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE
COLOR EN LAS AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

LUIS ARTURO MÉNDEZ ESCOBAR

ASESORADO POR INGENIERO MARIO ESTRADA ASTURIAS
INGENIERO HANS SCHIEBER

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, JULIO DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Angel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

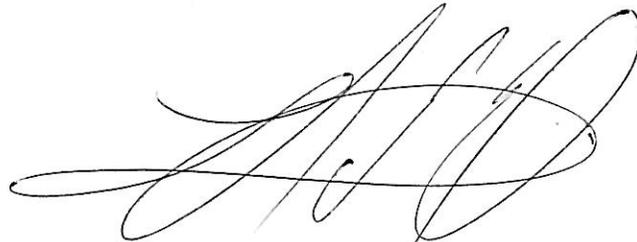
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
EXAMINADOR	Ing. Orlando Posadas Valdez
EXAMINADOR	Ing. Rodolfo Francisco Espinosa Smith
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**APLICACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE
COLOR EN LAS AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, en abril de 2008.

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and flourishes, positioned above the printed name.

Luis Arturo Méndez Escobar



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA.

Ciudad de Guatemala 23 de Enero de 2009

Ingeniero
WILLIAMS GUILLERMO ALVAREZ MEJIA
DIRECTOR DE LA ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
FACULTAD DE INGENIERIA
USAC

Respetable Señor Director:

Me dirijo a usted para informarle que a la presente fecha he revisado el informe final del trabajo de graduación titulado "APLICACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE COLOR EN LAS AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL", del estudiante universitario LUIS ARTURO MÉNDEZ ESCOBAR, con Número de carné 2003-12693, de quien estoy fungiendo como ASESOR.

Siendo que los aspectos metodológicos del trabajo en cuestión llenan los requisitos técnicos que ameritan su aprobación, sirva la presente para patentizar la no objeción del suscrito a efecto de que se autorice el trabajo mencionado y se proceda a continuar con los trámites subsiguientes.

Sin más por el momento, suscribo de usted

Id y enseñad a todos

JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS
Ingeniero Químico, colegiado 685
PROFESOR TITULAR



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 04 de Junio de 2009
Ref. EI.Q.343.2009

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-016-09-B-IF le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de INGENIERO QUÍMICO al estudiante universitario **LUIS ARTURO MÉNDEZ ESCOBAR**, identificado con carné No. **2003-12693**, titulado: "APLICACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE COLOR EN LAS AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL" el cual ha sido asesorado por el Ingeniero Químico Jorge Mario Estrada Asturias, como consta en el Acta.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice al estudiante **Méndez Escobar** proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑADA A TODOS"

Inga. Teresa Lisely de León Arana, M.Sc.

COORDINADORA
Tribunal que revisó el informe final
Del trabajo de graduación



ESCUELA DE
INGENIERIA QUIMICA

C.c.: archivo



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA.

El Director de la Escuela de Ingeniería Química Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía, M.Sc. Después de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el trabajo de graduación del estudiante **Luis Arturo Méndez Escobar** titulado: **“APLICACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE COLOR EN LAS AUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL”**, procede a la autorización del mismo, ya que reúne rigor, coherencia y calidad requeridos.


Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía M.Sc.
DIRECTOR ESCUELA INGENIERÍA QUÍMICA



Guatemala, julio de 2,009



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **APLICACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE COLOR EN LAS AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL**, presentado por el estudiante universitario **Luis Arturo Méndez Escobar**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Reinos
DECANO



Guatemala, julio de 2009

/cc

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Fuente inagotable de energía e inspiración para poder canalizar esta y alcanzar cualquier objetivo.
- Mis Padres** José Luis y Maritza, por el amor, apoyo y respaldo incondicional que me han otorgado siempre.
- Mi Hermano** Jose, Por su apoyo y ayuda.
- Mi familia** Por su cariño y solidaridad a lo largo de mi vida.
- Mis Amigos** Bendiciones que Dios ha puesto a lo largo de la vida por estar allí cuando los he necesitado y compartir conmigo tantos momentos inolvidables.
- Ing. Hans Schieber** Por su amistad, apoyo y ayuda en este proyecto; por compartir sus conocimientos y experiencias profesionales conmigo.
- Ing. Mario Estrada** Por su asesoría y amistad brindada a lo largo de este proyecto.

La Facultad de Ingeniería de mi Universidad

La Universidad de San Carlos de Guatemala

“CAROLINA ACADEMIA COACTEMALENSIS INTER CAETERAS ORBIS CONSPICUA”.

ACTO QUE DEDICO A

Mis Abuelos

José Luis Méndez Rosales y María Olga Consuelo Estrada Paz de Méndez

Por su amor, sabiduría y orientación en mi vida.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
HIPÓTESIS	XV
OBJETIVOS	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Características de las aguas residuales	2
1.1.1 Factores físicos	2
1.1.1.1 . Cambios térmicos	2
1.1.1.2. Color	2
1.1.1.3. Turbidez	2
1.1.2. Factores químicos	3
1.1.2.1. Orgánicos	3
1.1.2.2. Inorgánicos	4
1.1.3. Factores biológicos	4
1.2. Parámetros de medición	6
1.3. Colorante	7
1.3.1. Naturales	7
1.3.2. Artificiales	7
1.4. Coloide	8

1.5. Efecto del tamaño en la sedimentación	9
1.6. Coagulación	10
1.6.1 . Fuerzas de estabilidad	10
1.6.2. Fuerzas de inestabilidad	11
1.7. Floculación	11
1.8. Sedimentación	12
1.9. Celda electrolítica	12
1.9.1. Electrodo	12
1.9.2. Ánodo y cátodo	13
1.9.3. Celda primaria	13
1.9.4 Celda secundaria	13
1.10. Campo eléctrico	13
1.10.1. El concepto físico de campo	13
1.10.2. Campo eléctrico	14
1.11. Electrocoagulación	15
1.12. Aspectos técnicos de operación	18
1.13. Aspectos técnicos	18
1.14. Aplicaciones a la industria	19
1.15. Ventajas de la EC con métodos convencionales	19
1.15.1. Electrocoagulación vrs tratamiento fisicoquímico	20
1.15.1.1. Comparación general	20
1.15.1.2. Comparación técnico / económica	21
1.15.2. Electrocoagulación vrs tratamiento biológico	22
1.15.2.1. Comparación general	22
1.15.2.2 Comparación técnico / económica	23

2. METODOLOGÍA	25
2.1. Metodología de investigación	25
2.1.1. Localización	25
2.1.2. Recursos	26
2.2. Metodología experimental	27
2.2.1. Obtención de las muestras	27
2.2.2. Determinación de la cantidad de color	27
2.2.3. Diminución de la cantidad de color	28
2.3. Diseño experimental	29
2.4 Valoración económica	30
2.5 Requerimientos químicos para los baños de colorante	31
3. RESULTADOS	33
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	43
CONCLUSIONES	45
RECOMENDACIONES	47
BIBLIOGRAFÍA	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	53
Apéndice A	
Análisis Estadístico	54
Apéndice B	
Isométrico de la celda de electrocoagulación	57
Imagen del equipo Integrado	58

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Gráfica de diagrama de una celda de electrocoagulación	17
2.	Gráfica de localización geográfica de la empresa	25
3.	Gráfica cantidad de color vrs voltaje pastel	35
4.	Gráfica cantidad de color vrs voltaje medio	38
5.	Grafica cantidad de color vrs voltaje Intenso	41

TABLAS

I.	Efecto del tamaño de partícula en la sedimentación	9
II.	Aspectos técnicos de la electrocoagulación	18
III.	Comparación general EC vs tratamiento fisicoquímico	20
IV.	Comparación técnico económica	21
V.	Comparación general EC vs tratamiento biológico	22
VI.	Comparación técnico económica	23

VII.	Fórmula de preparación del baño de colorante	31
VIII.	Resultados color en muestra de colorante pastel con 5 V de diferencia	33
IX.	Resultados color en muestra de colorante pastel con 1 V de diferencia	34
X.	Resultados color en muestra de colorante medio con 5 V de diferencia	36
XI.	Resultados color en muestra de colorante medio con 1 V de diferencia	37
XII.	Resultados color en muestra de colorante intenso con 5 V de diferencia	39
XIII.	Resultados color en muestra de colorante intenso con 1 V de diferencia	40
XIV.	Resumen de resultados	42

LISTA DE SÍMBOLOS

DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda Química de oxígeno
NTU	Unidades nefelométricas de turbidez
°C	Grados Celsius
pH	Potencial de hidrógeno
ml	Mililitro
mg	Miligramo
l	Litro
cm ²	Centímetro cuadrado
m ²	Metro cuadrado
m ³	Metro cúbico
s	Segundo
min	Minuto
h	Hora
E	Intensidad de campo eléctrico
F	Fuerza de atracción entre cargas
q	carga de prueba
Kw-h	Kilowatt hora
V	Voltio
A	Amperio

GLOSARIO

Aguas Residuales: El agua residual de tipo ordinario o especial que ha recibido un uso y cuya calidad ha sido modificada por la incorporación de agentes contaminantes.

Agua residual de tipo especial: Agua residual generada por actividades municipales, industriales, servicios agrícolas, pecuarios, hospitalarios y todas aquellas que no sean de tipo ordinario.

Agua residual de tipo ordinario: El agua residual generada por las actividades domésticas, tales como servicios sanitarios, lavatorios, fregaderos, así como la mezcla de las mismas.

Caracterización de efluentes: Las características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales provenientes de descargas.

Caudal: Volumen por unidad de tiempo

Contaminación: La modificación o alteración adversa de la calidad física, química, biológica y radioactiva del cuerpo receptor proveniente de descargas de desechos líquidos.

Cuerpo receptor: El depósito de agua, embalse, cauce (río, quebrada, lago, laguna, manantial), humedal, zona marina, estero (mar, manglar, pantano) o sistema de alcantarillados en

donde se descargan aguas residuales; así como los terrenos en donde se infiltran dichas aguas.

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): La medida indirecta del contenido de materia orgánica en aguas residuales; que se determina por la cantidad de oxígeno utilizado en la oxidación bioquímica de la materia orgánica biodegradable durante un período de cinco días y a una temperatura de veinte grados centígrados.

Demanda química de oxígeno (DQO): La medida indirecta del contenido de materia orgánica e inorgánica oxidable en aguas residuales; que se determina por la cantidad de oxígeno utilizado en la oxidación de la materia orgánica e inorgánica oxidable.

Efluente: Las aguas residuales que se descargan en un cuerpo receptor o en la última unidad de conducción o tratamiento.

Ente generador: La persona individual o jurídica, titular de una obra, proyecto o cualquier tipo de actividad, responsable de generar, producir o administrar aguas residuales y de su vertido en un cuerpo receptor.

Instrumentos de evaluación ambiental: Los documentos técnicos definidos en el reglamento de evaluación, control y seguimiento ambiental, Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 y sus reformas, contenidos en los Acuerdos Gubernativos No. 424-2003 y 704-2003; los

cuales permiten realizar una identificación y evaluación sistemática de los impactos ambientales de un proyecto, obra, industria o cualquier otra actividad, desde la fase de construcción hasta la fase de abandono.

Lodos: La mezcla de aguas residuales y sólidos sedimentados, resultantes de los diversos procesos de tratamiento y manejo de las aguas residuales.

Lodos industriales: La mezcla de líquidos y sólidos, resultantes de los diversos procesos de tratamiento, transformación y producción en la industria, minería y similares.

Monitoreo: El sistema que recopila y analiza un conjunto de muestras con una frecuencia de tiempo determinada para vigilar y detectar cambios en el recurso hídrico.

Muestras compuestas: Dos o mas muestras simples que se tomen en intervalos determinados de tiempo y que han sido mezcladas en proporciones conocidas y apropiadas para obtener un resultado promedio representativo de sus características.

Muestra simple: Aquella tomada en una sola operación, de tal forma que el tiempo empleado en su extracción sea el transcurrido para obtener el volumen necesario, es decir, solo representa características del agua residual en ese momento.

- Parámetro:** La variable que identifica una característica de las aguas residuales asignándole un valor numérico
- Re uso:** El aprovechamiento de un efluente antes de su vertido.
- Tratamiento de aguas residuales:** Cualquier proceso físico, químico, biológico o una combinación de los mismos, utilizado para modificar las condiciones de las aguas residuales.
- Sedimentación:** Proceso por el cual el material sólido, transportado por una corriente de agua, se deposita en el fondo.

RESUMEN

El propósito principal de de este trabajo fue comprobar que el método de electrocoagulación es una forma fácil, segura y económica para eliminar el color de las aguas residuales de la industria textil.

Este trabajo se realizó en la empresa FABRICS S.A. la cual apoyó el estudio con todos los recursos, construyendo una celda de electrocoagulación y un rectificador de corriente alterna para el voltaje recomendado por las bibliografías.

La empresa trabaja con tres tipos de colorantes, pastel, medio e intenso por lo que se procedió a aplicarles el método propuesto en la celda construida a diferentes voltajes con tres repeticiones para cada uno resultando treinta y seis corridas en total.

Durante la realización del experimento se observó que el método es eficiente ya que se observó una disminución del color en las aguas residuales, lo que se comprobó con los análisis correspondientes, observándose una mayor disminución de color cuando se aplicaron 37 V, 39V y 40V las muestras con colorantes pastel, medio e intenso respectivamente.

El color en las aguas residuales tiene efectos negativos sobre el medio ambiente, ya que afecta la biodiversidad que existe en los cuerpos hídricos receptores de los efluentes industriales; por lo que al utilizar este método se esta contribuyendo al bienestar social.

HIPOTESIS

Es posible aplicar el método de electrocoagulación para la eliminación de color en las aguas residuales textiles para distintos voltajes utilizados.

Hipótesis Estadística

Hipótesis Nula

Ho

No existe diferencia significativa en la reducción del color de las aguas residuales en función de variaciones de voltaje en la electrocoagulación.

Hipótesis Alternativa

Hi

Existe diferencia significativa en la reducción del color de las aguas residuales en función de variaciones de voltaje en la electrocoagulación.

OBJETIVOS

General:

Evaluar la eliminación del color de las aguas residuales procedentes de los baños de tinción de una fábrica de textiles por medio del método de la electrocoagulación de los componentes del baño de tinción.

Específicos:

1. Evaluar la electrocoagulación más eficiente en función de variaciones de voltaje aplicado al desecho líquido.
2. Determinar los parámetros óptimos a través de seleccionar el voltaje más eficiente con base a la medida de color reducido en unidades Platino-Cobalto de agua tratada.
3. Evaluar estadísticamente, mediante un análisis de varianza simple (ANDEVA), si existe diferencia significativa entre los tratamientos experimentales.

INTRODUCCIÓN

El trabajo a realizar tiene como fin principal eliminar el color de las aguas residuales de la industria textil. Esto se quiere alcanzar debido a la importancia de conservar nuestro medio ambiente. Al aplicar las distintas ramas de la ingeniería para crear productos con valor agregado e incrementar el mercado siempre se obtendrán residuos, por lo que para evitar dañar nuestro entorno y a las personas que vivimos en él, estos residuos deben de pasar por un tratamiento previo a su desecho. La rama de la industria a la que se aplicará el método de electrocoagulación es una de las más grandes del país, la textil. Esta industria provee de empleo a varias comunidades, por lo que ayuda al desarrollo del país; pero también utiliza grandes cantidades de agua y si no se tratan adecuadamente puede ser una gran fuente de contaminación para los recursos hídricos de Guatemala.

El proceso de electrocoagulación consiste en la aplicación de un campo eléctrico por medio de electrodos a una porción del agua contaminada. Este campo generará la coagulación de los contaminantes, debido a la desestabilización de las cargas catiónicas y/o aniónicas de estos, causantes del color del agua utilizada durante el proceso de la elaboración de la tela haciendo bastante fácil su eliminación por medio de sedimentación.

Para la implementación de este método en la planta de producción de tela se hicieron primero pruebas en proceso batch a nivel piloto en un tanque de agua. Este debe contar con un canal de ingreso de agua contaminada donde esta pasara en medio de unos electrodos conectados a una fuente de energía que genere el campo eléctrico deseado para la coagulación de los agentes contaminantes. El tanque también debe contar con un canal de desecho del

agua ya tratada para el análisis posterior de ésta, para corroborar el funcionamiento del método ya utilizado por muchas empresas a nivel mundial.

1. MARCO TEÓRICO

Dentro de toda actividad industrial se utilizan materias primas para la elaboración de algún producto, éstas pueden utilizarse en su totalidad o no dependiendo del proceso, así mismo se pueden crear sub productos que no formaran parte del producto terminado. Tanto las materias primas restantes como los sub productos formados pueden tener características que dañen el medio ambiente por lo que es necesario tratarlos previo a su desecho para mantener una cultura de respeto al ecosistema que nos rodea.

Para el presente trabajo las aguas son desechadas en algún cuerpo de agua como ríos, lagos u océanos, por lo que se debe de tener especial cuidado para no contaminar el agua, ya que no sólo es un recurso vital para la vida del ser humano sino para la industria.

Contaminación es cuando en nuestro recurso hídrico la población incorpora materias extrañas, como microorganismos, productos químicos, residuos industriales y otros. Estas materias orgánicas e inorgánicas deterioran la calidad del agua y hacen inútil su consumo. Todo esto producido por la actividad de la población, se contaminan hasta convertirse en peligro para la salud humana y dañina para la vida.

1.1. Características de las aguas residuales:

Según Arenales Cifuentes, 2004 (Ref. 3)

Las aguas residuales de las diferentes industrias tienen cualidades distintas sin embargo los contaminantes y cambios que estas pueden tener se pueden dividir en tres:

1.1.1. Factores físicos

1.1.2. Factores químicos

1.1.3. Factores biológicos

1.1.1. Factores físicos:

Estos incluyen:

1.1.1.1. Cambios térmicos

Esta situación afecta en el nivel de vida acuática, o por ejemplo, lo de las aguas de las fábricas que son botadas después de ser usadas en un estado caliente

1.1.1.2. Color

Este es el principal problema en el tipo de la industria textil analizado, ya que se dedica al teñido de tela, este tipo de contaminante puede afectar la cantidad de oxígeno en el agua como consecuencia de la disminución de la luz que ingresa a los cuerpos receptores y que afectaría la fotosíntesis de las plantas acuáticas.

1.1.1.3. Turbidez

La turbidez es una medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión, cuantos más

sólidos en suspensión haya en el agua, más sucia parecerá ésta y más alta será la turbidez. La turbidez es considerada una buena medida de la calidad del agua.

La turbidez se mide en NTU: Unidades Nefelométricas de Turbidez. El instrumento usado para su medida es el nefelómetro o turbidímetro, que mide la intensidad de la luz dispersada a 90 grados cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua.

1.1.2. Factores Químicos

Las actividades industriales generan contaminación al agua cuando hay presencia metales pesados tóxicos para los humanos tales como arsénico, plomo, mercurio y cromo. La actividad agrícola contamina cuando emplea fertilizantes que son arrastrados hacia las aguas, especialmente nitratos y nitritos. Además, el uso inadecuado de plaguicidas contribuye a contaminar el agua con sustancias tóxicas para los humanos. Que se pueden dividir en orgánicos e inorgánicos.

1.1.2.1. Orgánicos

Son compuestos disueltos o dispersos en el agua que provienen de desechos domésticos, agrícolas, industriales y de la erosión del suelo. Son desechos humanos y animales, de rastros o mataderos, de procesamiento de alimentos para humanos y animales, diversos productos químicos industriales de origen natural como aceites, grasas, breas y tinturas, y diversos productos

químicos sintéticos como pinturas, herbicidas, insecticidas, etc. Los contaminantes orgánicos consumen el oxígeno disuelto en el agua y afectan a la vida acuática.

1.1.2.2. Inorgánicos

El principal problema de este tipo de contaminantes es su efecto tóxico para el ser humano y los seres vivos que habitan en el agua, entre los principales contaminantes que pertenecen a este grupo se pueden mencionar los iones de metales pesados provenientes de teñido dependiendo de los colorantes utilizados.

1.1.2. Factores Biológicos

Existen diversos organismos que contaminan el agua. Las bacterias son uno de los principales contaminantes del agua. Los coliformes representan un indicador biológico de las descargas de materia orgánica. Las coliformes totales no son indicadores estrictos de contaminación de origen fecal, puesto que existen en el ambiente como organismos libres. Sin embargo, son buenos indicadores microbianos de la calidad de agua. La *Escherichia coli* es la única bacteria que sí se encuentra estrictamente ligada a las heces fecales de origen humano y de animales de sangre caliente. También contaminan el agua virus, algas, protozoos y hongos.

La calidad del agua se mide por la presencia y cantidad de contaminantes y para conocerse con exactitud es necesario realizar un análisis del agua en un laboratorio especializado.

1.2. Parámetros de medición para determinar las características de las aguas residuales, según Acuerdo Gubernativo 236-2006:

1. Temperatura (T) en grados Celsius.
2. Potencial de hidrogeno, un unidades pH.
3. Materia flotante, como presente o ausente.
4. Sólidos sedimentables; (ml/l).
5. Sólidos suspendidos totales; (mg/l).
6. Demanda bioquímica de oxígeno a veinte grados Celsius como miligramo de oxígeno por litro (mg de O₂/l).
7. Demanda química de oxígeno como miligramo de oxígeno por litro (mg de O₂/l).
8. Cianuros, (mg de Cn/l).
9. Cobre, (mg de Cu/l).
10. Cromo, (mg Cr hexavalente/l).
11. Mercurio, (mg de Hg/l).
12. Níquel, (mg de Ni/l).
13. Plomo, (mg de Pb/l).
14. Zinc, (mg de Zn/l).
15. Color, unidades de color como unidades de turbidez nefelométricas (UTN).

(Ref. 1)

1.3. Colorante

Se define como el producto capaz de dar color a la fibra textil, a lo largo de la industria textil se han utilizado dos tipos de colorantes, los colorantes naturales y los artificiales. Los colorantes naturales han sido de gran importancia en la historia del vestido, pero casi no se utilizan en la actualidad, su precio es elevado con respecto de los artificiales. Los artificiales poseen características superiores y una variedad grandísima; además la vida que se le ha logrado dar al color es casi similar a la del tejido.

1.3.1. Colorantes naturales

Que son de origen animal, vegetal y mineral.

1.3.2. Colorantes artificiales

Son los de mayor relevancia en el actual campo textil, un buen grupo proviene de los mismos en estado natural solo que ya sintetizados en un laboratorio. Obtener colorantes mediante métodos químicos se hace con la finalidad de conseguir productos con características específicas para los fines textiles que se les dará.

1.4. Coloide

En química un coloide, suspensión coloidal o dispersión coloidal es un sistema físico-químico compuesto por dos fases: una continua, normalmente fluida, y otra dispersa en forma de partículas; por lo general sólidas, de tamaño mesoscópico (a medio camino entre los mundos macroscópico y microscópico. Así, se trata de partículas que no son apreciables a simple vista, pero más grandes que cualquier molécula.

El nombre de coloide proviene de la raíz griega *kolos* que significa que puede pegarse. Este nombre hace referencia a una de las principales propiedades de los coloides: su tendencia espontánea a agregar o formar coágulos.

Aunque el coloide por excelencia es aquel en el que la fase continua es un líquido y la fase dispersa se compone de partículas sólidas, pueden encontrarse coloides cuyos componentes se encuentran en otros estados de agregación.

(Ref. 5)

1.5. Efecto del tamaño en la sedimentación

En el agua el pequeño tamaño de las partículas coloidales y la existencia de cargas negativas en su superficie ocasionan que las suspensiones coloidales gocen de una gran estabilidad, ocasionando que la sedimentación tarde bastante, el tiempo que las partículas coloidales permanecerán en suspensión esta en función de del tamaño y del peso específico de las partículas.

La siguiente tabla muestra la importancia del tamaño ya que se indican los tiempos que unas esferas de densidad 2,65, necesitarían para sedimentar 30 cm.

Tabla I Efecto del tamaño en la sedimentación

Diámetro de las partículas, mm.	Orden de tamaño	Área superficial total	Tiempo necesario para la sedimentación
10	Grava	3,142 cm ²	0,3 seg.
1	Arena gruesa	31,42 cm ²	3 seg.
0,1	Arena fina	314,2 cm ²	38 seg.
0,01	Limo	0,31 m ²	33 min.
0,001	Bacterias	3,14 m ²	55 h.
0.0001	Partículas coloidales	3.17 m ²	230 días
0.00001	Partículas coloidales	2.833 m ²	6.30 años
0.000001	Partículas coloidales	28.328 m ²	Mínimo de 63 años

Fuente: Referencia Electrónica 1

Puede verse que las velocidades de la materia coloidal son tan lentas, que en la práctica es imposible separarlas del agua por sedimentación; así, se hace necesario realizar las siguientes operaciones:

- Desestabilizar las partículas coloidales, especialmente por la neutralización de sus cargas, fenómeno conocido con el nombre de coagulación.
- Facilitar la unión entre partículas formando agregados de mayor volumen (flóculos) cuya velocidad de sedimentación es más elevada. Este fenómeno de agregación de partículas se denomina floculación.
- Conseguir la eliminación de las partículas floculadas, cuando esta se produce por sedimentación, el proceso se conoce como decantación.

1.6. Coagulación:

Es el proceso de desestabilización química de partículas coloidales realizadas por adicción de un coagulante al agua el cual neutraliza las cargas responsables de la estabilidad de las partículas cargadas que generan fuerzas de repulsión superficial las cuales están impidiendo la sedimentación por gravedad en tiempos cortos, de acuerdo al tamaño y naturaleza del coloide esta partícula puede demorar años para sedimentar naturalmente por la acción de la gravedad

(Ref. 2)

Es necesario considerar los factores que determinan que las partículas permanezcan en suspensión, así como también aquellos que producen la floculación. Por estabilidad se entiende la propiedad inherente de las partículas coloidales a permanecer en dispersión durante mucho tiempo, mientras que por inestabilidad se expresa la tendencia de dichas partículas a flocularse siempre que entren en contacto entre sí.

1.6.1. Fuerzas de estabilidad

Cuando se trabaja con coloides hidrófilos, el mantenimiento de la estabilidad se debe al fenómeno de hidratación, esto quiere decir que las

moléculas de agua son atraídas hacia a superficie de las partículas coloidales formando una barrera que impide el contacto entre estas, haciendo que no se formen los floculos.

1.6.2. Fuerzas de inestabilidad

Los factores que influyen en la inestabilidad de los coloides son fundamentalmente dos:

El movimiento browniano que es el movimiento aleatorio de moléculas que se encuentran en un medio fluido. Partículas del orden 10^{-6} m o menores en agua se encuentran en constante movimiento, la energía para dicho movimiento se obtiene de colisiones de las partículas con las del agua y la temperatura, lo que ayuda a la estabilidad, sin embargo supone una probabilidad de contacto entre las partículas coloidales por lo que estableciendo un gradiente hidráulico o generando turbulencia por agitación se puede incrementar esa posibilidad. El otro sería las fuerzas de London-Van der Waals que son una fuerza de cohesión entre átomos, y se sabe que es proporcional al radio de las partículas, que en el caso de los coloides sería una fuerza considerable como para atraer moléculas coloidales comenzando así el proceso de floculación que además se vería favorecido por el movimiento browniano.

1.7. Floculación

Es el proceso en el que se efectúan las colisiones de partículas desestabilizadas favoreciendo la agregación (cohesión) entre ellas, logrando formar aglomerados de partículas coloidales que unidas entre sí alcanzan un

peso que las hace sedimentables por gravedad. Se utilizan medios hidráulicos o mecánicos.

(Ref. 2)

1.8. Sedimentación

La sedimentación es el proceso por el cual el material sólido, transportado por una corriente de agua, se deposita en el fondo del río, embalse, canal artificial, o dispositivo construido especialmente para tal fin.

La sedimentación de sólidos en líquidos está gobernada por la Ley de Stokes, que indica que las partículas sedimentan más fácilmente cuando mayor es su diámetro, su peso específico comparado con el del líquido, y cuando menor es la viscosidad del líquido. Por ello, cuando se quiere favorecer la sedimentación se trata de aumentar el diámetro de las partículas, haciendo que se agreguen unas a otras.

1.9. Celda electrolítica

Dispositivo que consta de un líquido conductor llamado electrolítico además de dos electrodos de composición similar. Tiene la capacidad de conducir corriente. Se usa en electrocoagulación, electro deposición, electro formación, producción de gases y realización de muchos procedimientos

1.9.1. Electrodo

Un electrodo es un conductor utilizado para hacer contacto con una parte no metálica de un circuito, por ejemplo un semiconductor, un electrolito, un gas (en una lámpara de neón), etc.

A nivel químico, se entiende por electrodo, cada una de las superficies donde se produce un proceso redox.

1.9.2. Ánodo y cátodo

Un electrodo en una celda electroquímica se refiere a cualquiera de los dos conceptos, sea ánodo o cátodo. El ánodo es definido como el electrodo al cual los electrones vienen de la celda y ocurre la oxidación, y el cátodo es definido como el electrodo en el cual los electrones entran a la celda y ocurre la reducción. Cada electrodo puede convertirse en ánodo o cátodo dependiendo del voltaje que se aplique a la celda

1.9.3. Celda primaria

Una celda primaria es un tipo especial de celda electroquímica en la cual la reacción no puede ser revertida, y las identidades del ánodo y cátodo son, por lo tanto, fijas. El ánodo siempre es el electrodo negativo. La celda puede ser descargada pero no recargada.

1.9.4. Celda secundaria

Una celda secundaria, una batería recargable por ejemplo, es una celda en que la reacción es reversible. Cuando la celda está siendo cargada, el ánodo se convierte en el electrodo positivo (+) y el cátodo en el negativo (-). Cuando la celda está siendo descargada, se comporta como una celda primaria o voltaica, con el ánodo como electrodo negativo y el cátodo como positivo.

1.10. Campo eléctrico

1.10.1. El concepto físico de campo

Las cargas eléctricas no precisan de ningún medio material para ejercer su influencia sobre otras, de ahí que las fuerzas eléctricas sean consideradas fuerzas de acción a distancia. Cuando en la naturaleza se da una situación de

este estilo, se recurre a la idea de campo para facilitar la descripción en términos físicos de la influencia que uno o más cuerpos ejercen sobre el espacio que les rodea.

La noción física de campo se corresponde con la de un espacio dotado de propiedades medibles. En el caso de que se trate de un campo de fuerzas éste viene a ser aquella región del espacio en donde se dejan sentir los efectos de fuerzas a distancia. Así, la influencia gravitatoria sobre el espacio que rodea la Tierra se hace visible cuando en cualquiera de sus puntos se sitúa, a modo de detector, un cuerpo de prueba y se mide su peso, es decir, la fuerza con que la Tierra lo atrae. Dicha influencia gravitatoria se conoce como campo gravitatorio terrestre. De un modo análogo la física introduce la noción de campo magnético y también la de campo eléctrico o electrostático.

(Ref. 4)

1.10.2. Campo eléctrico

El campo eléctrico asociado a una carga aislada o a un conjunto de cargas es aquella región del espacio en donde se dejan sentir sus efectos. Así, si en un punto cualquiera del espacio en donde está definido un campo eléctrico se coloca una carga de prueba, se observará la aparición de fuerzas eléctricas, es decir, de atracciones o de repulsiones sobre ella.

La fuerza eléctrica que en un punto cualquiera del campo se ejerce sobre la carga unidad positiva, tomada como elemento de comparación, recibe el nombre de intensidad del campo eléctrico y se representa por la letra E

$$E = F/q$$

Donde F es la fuerza de atracción calculada mediante la ley de Coulomb entre la carga central Q y la carga de prueba q empleada como elemento detector del campo.

1.11. Electrocoagulación

La electrocoagulación pertenece a una rama de la electroquímica, que es la encargada de estudiar las reacciones químicas que producen efectos eléctricos y los fenómenos químicos causados por la acción de las corrientes o voltajes en medios acuosos (solución). Estos medios deben cumplir con una característica fundamental, ser conductores eléctricos.

Este fenómeno ocurre en una “*celda de electrocoagulación*” que esta compuesta por electrodos inmersos en un dieléctrico y una fuente de poder de corriente directa.

El fundamento teórico de la electrocoagulación, consiste en la desestabilización y coagulación simultanea de las partículas coloidales, haciendo pasar un campo eléctrico a través de los electrodos de un material conductor como aluminio, hierro o cobre, siendo el ánodo (+) el que aporta la especie catiónica como Fe^{+3} o Al^{+3} (agentes coagulantes) el que se unirá por enlaces iónicos a los coloides cargados opuestamente.

La coagulación se produce gracias a un fenómeno llamado electrolisis, el cual genera reacciones de óxido-reducción en sus ánodos y cátodos respectivamente, producto de la energía eléctrica aplicada al conjunto de placas puestas alternadamente (+ - +) en el interior de la celda de electrocoagulación.

Dentro de esta celda de electrocoagulación los electrodos se desgastan debido a la migración de especies catiónica al cátodo por el campo eléctrico.

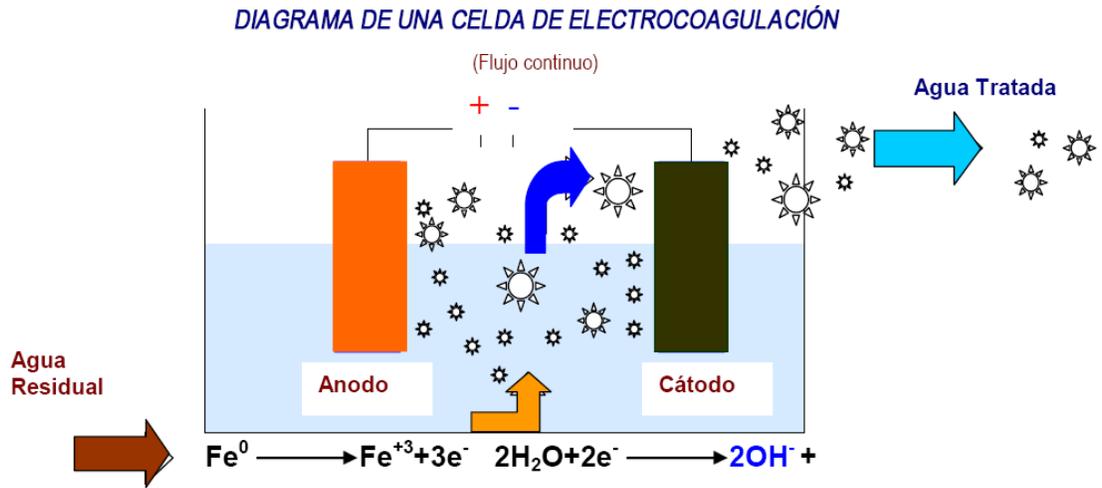
En la electrocoagulación la coagulación y desestabilización ocurren al mismo tiempo, a diferencia de la alternativa química, donde los coágulos se forman debido a la unión de coloides, formando masas de tamaño considerable para luego separarlas del agua con la adición de mas químicos como sulfatos de aluminio, cloruro férrico, etc.

Es importante mencionar que el agua residual a la que se le aplicara el método de electrocoagulación esta sometida a una electrolisis, la cual se ve favorecida por la presencia de sales en disolución, que permiten la conducción de electricidad y que están presentes en todas las aguas residuales e industriales. Debido a esto se produce un desprendimiento de hidrógeno y oxígeno gaseoso, en sus respectivos electrodos.

Estos gases provocan tres fenómenos:

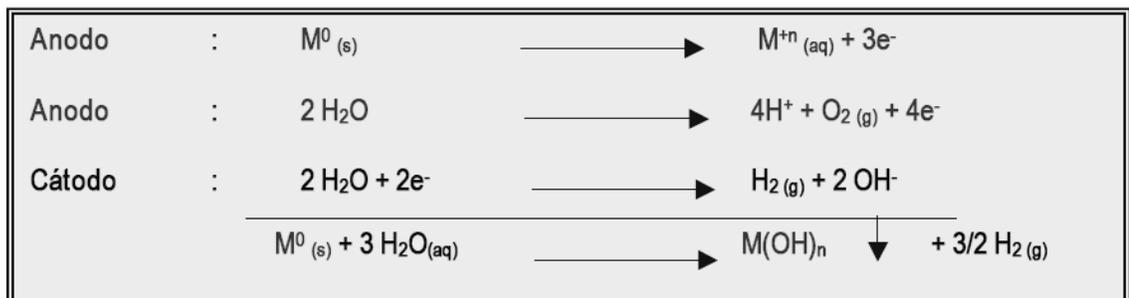
- Ocasiona una auto-limpieza, debido a la velocidad de flujo que ocasiona una fuerza de arrastre considerable, capaz de remover las películas de coloides depositadas en los electrodos.
- Debido a las burbujas de gas se producen corrientes ascendentes y descendentes ocasionando una mejor superficie de contacto, aumentando la desestabilización, es como una agitación espontanea.
- Debido a que los floculos se saturan de gases este método permite no solo la separación por sedimentación sino por flotación.

Figura 1 Diagrama de una celda de Electrocoagulación



Fuente: Referencia electrónica 5

Todos los fenómenos que ocurren en una celda electrolítica se representan en forma general a través de la siguiente reacción redox.



1.12. Aspectos técnicos de operación

Las condiciones de operación de un sistema de electrocoagulación se encuentran directamente relacionadas con las condiciones del medio, es decir variables como: flujo, pH, carga contaminante, cantidad de sólidos suspendidos y disueltos y especialmente la conductividad. En general este proceso requiere de aplicaciones bajas de voltaje, pero depende en gran manera del amperaje el cual es variable, y es de acuerdo a las características químicas del agua.

1.13. Aspectos técnicos de la electrocoagulación:

Tabla II Aspectos técnicos de la electrocoagulación

DETALLE	CARACTERISTICAS
Consumo de energía	Se encuentra entre [0.5-0.8]Kwh/m ³
Desgaste de electrodos	Reemplazo promedio de dos veces por año
Condiciones de operación	Funciona en forma automática, mediante controles electrónicos que regulan la corriente y voltaje.
Producción de lodos	La cantidad y humedad (96 a 97%) del lodo es menor que los sistemas químicos y biológicos convencionales.

Fuente: Referencia electrónica 3

1.14. Aplicaciones de la electrocoagulación a los diferentes sectores de la industria

- Papelera
- Pesquero
- Maderero
- Industria alimentaria
- Industria textil
- Industria ganadera
- Industria química
- Industria de galvanoplastia
- Industria minera
- Aguas servidas domésticas

1.15. Ventajas comparativas de la electrocoagulación con los sistemas de tratamiento convencionales

1.15.1. Electrocoagulación vs tratamiento físicoquímico

1.15.1.1. Comparación General

La siguiente tabla muestra la relación existente entre la electrocoagulación y un tratamiento físicoquímico.

Tabla III Relación entre la electrocoagulación y un tratamiento físicoquímico

DETALLE	ELECTROCOAGULACIÓN	FÍSICOQUIMICO
Superficie	Representa entre [50-60]% de un sistema físicoquímico	Requiere de gran superficie
Tiempo de residencia de la reacción	Necesita de 10 a 60 segundos en la celda	Tiempo de reacción química de 45 a 90 segundos
Obras civiles	Son unidades compactas que no requieren obras civiles	Requieren de grandes obras civiles
Costos de inversión	Requiere una inversión mayor en equipamiento	Representa una inversión de [70 a 80] % de la EC
Costos de operación (energía)	Entre [0.0-0.8] Kwh/m ³ en energía	De 5 a 10% menor que el sistema de EC
Químicos	Representan [10-20]% de un sistema físicoquímico	Requiere de grandes cantidades de productos químicos
Lodos	Su generación es menor con una humedad entre [96-97]%	Mayor generación de lodos con humedad entre [98-99]%

Fuente: Referencia electrónica 3

1.15.1.2. Comparación técnico/económica

Tabla IV Comparación técnico/económica

DETALLE	ELECTROCOAGULACIÓN	FÍSICOQUÍMICOS
Relación de energía	[0.020-0.032 US\$/m ³	[0.25-0.30]US\$/m ³
Relación de químicos	No usa químicos	[0.25-0.35] US\$/m ³
Tiempo de residencia de la reacción	[10-60] seg en la celda	Reacción química de 45-90 segundos
Tiempo de residencia de la sedimentación	15-20 min. En el estanque de sedimentación (*)	45-60 min. En el estanque de sedimentación (*)

Fuente: Referencia electrónica 3

1.15.2. Electrocoagulación vs tratamiento biológico

1.15.2.1. Comparación general

La siguiente tabla muestra la relación existente entre la electrocoagulación y un tratamiento biológico.

Tabla V Relación entre la electrocoagulación y un tratamiento biológico

DETALLE	ELECTROCOAGULACIÓN	BIOLÓGICO
Superficie	Representa entre [50-60]% de un sistema biológico	Requiere de gran superficie
Tiempo de residencia de la reacción	Necesita de 10 a 60 segundos en la celda	Tiempo mínimo de 24 horas en el estanque de aireación
Obras civiles	Son unidades compactas que no requieren obras civiles	Requiere grandes obras
Costos de inversión	Representa el 50% de la inversión del sistema biológico	Gran inversión en equipo y obras civiles
Costos de operación (energía)	Entre [0.5-0.8] Kwh/m ³	De [5-10]% menor que en EC
Químicos	Solo para ajustes de pH	Los usa en etapa de desinfección
Lodos	Su generación es menor, con una humedad entre [96-97]%	Mayor generación de lodos con una humedad entre [98-99]%

Fuente: Referencia electrónica 3

1.15.2.2. Comparación técnico/económica

Tabla VI Comparación técnico/económica

DETALLE	ELECTROCOAGULACIÓN	BIOLÓGICO
Relación de energía	[0.020-0.032] US\$/m ³	[0.30-0.35]US\$/m ³
Relación de químicos	No usa químicos	[0.008-0.009]US\$/m ³
Tiempo de residencia de la reacción	[10-60] segundos en la celda	24 horas en el estanque de aireación
Tiempo de residencia de la sedimentación	15-20 minutos en el estanque de sedimentación	3-4 horas en el estanque de sedimentación

Fuente: Referencia electrónica 3

2. METODOLOGÍA

2.1 Metodología de investigación

2.1.1. Localización

La empresa de textiles FABRICS, S.A. de donde se tomó la muestra se encuentra en el Kilómetro 19.5 Carretera a San José Pinula, Callejón La Floresta, Municipio de San José Pinula, Departamento de Guatemala. Las coordenadas geográficas de la ubicación de la empresa son:

Latitud 14° 32' 45.35" Norte y

Longitud 90° 25' 57.00" Oeste.

Figura 2 Localización geográfica de la empresa



Fuente: Ref. Electrónica 4

2.1.2. Recursos

Infraestructura física:

Laboratorio de control de calidad de la empresa FABRICS S.A.

Humanos:

Investigador: Luis Arturo Méndez Escobar

Asesor: Ing. Qco. Hans Schieber

Asesor: Ing Qco. Mario Estrada

Personal analistas de laboratorio

Personal capta las muestras

Físicos:

Equipo:

Estanque de vidrio

Cátodo y ánodo de hierro

Alambre de cobre AGW 14

Conectores

Fuente de poder

Rectificador de corriente alterna a directo

Materiales:

Cristalería

Tubos de ensayo para guardar las muestras.

Instrumentos de medición:

Voltímetro

Amperímetro

2.2. Metodología experimental

2.2.1. Obtención de las muestras:

La toma de las muestras se hizo en la fábrica FABRICS S.A. San José Pinula. La fábrica trabaja las 10 horas diarias, de lunes a viernes, teniendo un horario de descarga de 8 a 18 horas con un caudal de 14.11 m³/hora; la Fábrica está dedicada a la elaboración de tela de tipo circular, incluyendo procesos de hilado, teñido y blanqueado de telas, siendo un 95% algodón y 5% tela sintética.

2.2.2. Determinación de la cantidad de color:

Para ello se envió a un laboratorio y se utilizaron las unidades platino cobalto. Este procedimiento se hizo con muestras de agua antes del tratamiento y después del tratamiento con electrocoagulación.

Alcance:

El método es eficaz para medir la cantidad de color en una muestra de agua.

Principio:

La presencia de partículas coloidales en aguas residuales disminuyen la claridad del agua, después de hacer pasar el agua por tratamiento de electrocoagulación la muestra debe de ser mas clara.

Aparatos:

Espectrofotómetro

Muestra:

La muestra se obtuvo del tanque de desecho de las aguas residuales de la empresa de textiles.

2.2.3. Disminución de la cantidad de color:

Para ello se utilizó el método de electrocoagulación.

Alcance:

El método elimina en gran parte el color de aguas residuales.

Principio:

Partículas coloidales que son las causantes del color en aguas residuales se desestabilizan, coagulan y sedimentan luego de haber sido sometidas a un campo eléctrico.

Aparatos:

Se diseñó y construyó una celda de electrocoagulación, esta consiste en un tanque de vidrio (por ser aislante) con dos placas de cobre en los extremos conectados a un rectificador que transformara la corriente alterna en directa y creara un campo eléctrico.

Muestra:

La muestra es obtenida del tanque de desecho de las aguas residuales de la empresa de textiles.

Procedimiento:

1. Se construye la celda de electrocoagulación.
2. Se introduce una muestra del agua residual en la celda.
3. Se aplican un voltaje durante 2 minutos y se deja sedimentar de 15 a 20 minutos.
4. Se guarda la muestra para su posterior análisis.
5. Se repite el paso tres a diferentes voltajes.
6. Por ser un fenómeno también dependiente de la corriente, si no hay suficiente corriente se agregaran mas sales a la muestra de agua para aumentarla.

2.3. Diseño Experimental:

- Número de corridas:

Se hicieron tres corridas para cada muestra, para descartar cualquier variación en el resultado debido a factores ajenos a las variables que nos interesan.

- Parámetros:

Voltaje: se hicieron tres corridas a diferentes voltajes hasta encontrar el más eficiente donde se halla eliminado en mayor cantidad el color.

Corriente: por tener bastantes sales las aguas residuales, se tuvo una corriente favorable para el experimento

Cantidad de color: debido al voltaje aplicado este disminuye después del tratamiento.

Porcentaje de colorante en tela: se hicieron para los utilizados en la fábrica.

2.4. Valoración económica del proyecto

- Asesoría de dos profesionales de la ingeniería química

Q 15,000 /asesor

2 x Q15,000 = Q30,000

3 meses x Q30,000= Q90,000

- Análisis en laboratorios

Q 500.00

- Estanque de vidrio

Q400.00

- Cátodo y ánodo de cobre

Q 200.00

- Alambre AGW 14

Q30.00

- Conectores

Q15.00

- Rectificador de corriente alterna a directa

Q150.00

- Consumo de energía eléctrica

Q200.00

Costo total Q91,495.00

2.5. Requerimientos químicos para los baños de colorante en función del tipo

- Densidad de corriente

$$j = 0.3384 \text{ A/dm}^2$$

- Formula de preparación del baño del colorante:

Tabla VII Reactivos y características del baño de tinción

		Color Black VSF 1000		
		Pastel	Medio	Intenso
CONDICIÓN	Relación de Baño (Agua/Tela)	1:7	1:7	1:7
	Colorante	< 1 %	1%-2%	>3%
	Sulfato de Sodio	15 g/l	60 g/l	90g/l
	Soda Ash	7 g /l	15g/l	25g/l
	pH del baño	9	10	12

Fuente: Planta de Producción FABRICS S.A.

3. RESULTADOS

Tabla VIII Remoción de color pastel a diferentes voltajes aplicados con diferencia de 5 V

Color inicial (Pt-Co)	Voltaje aplicado (V)	Color final después de 2 min de aplicación de V y 20 min de sedimentación					
		Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3	
		Color (Pt-Co)	% Remoción	Color (Pt-Co)	% Remoción	Color (Pt-Co)	% Remoción
1453	30	288	80.18	285	80.38	289	80.11
1453	35	206	85.82	203	86.03	204	85.96
1453	40	221	84.79	224	84.58	218	84.99
1453	45	259	82.17	263	81.90	261	82.03

Tabla IX Remoción de color pastel a diferentes voltajes aplicados con diferencia de 1 V

Color inicial (Pt-Co)	Voltaje aplicado (V)	Color final después de 2 min de aplicación de V y 20 min de sedimentación					
		Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3	
		Color (Pt-Co)	% Remoción	Color (Pt-Co)	% Remoción	Color (Pt-Co)	% Remoción
1453	36	198	86.37	197	86.44	201	86.16
1453	37	193	86.71	190	86.92	194	86.65
1453	38	201	86.16	203	86.02	200	86.23
1453	39	213	85.34	210	85.54	214	85.27

Figura 3 Cantidad de color vs voltaje colorante pastel

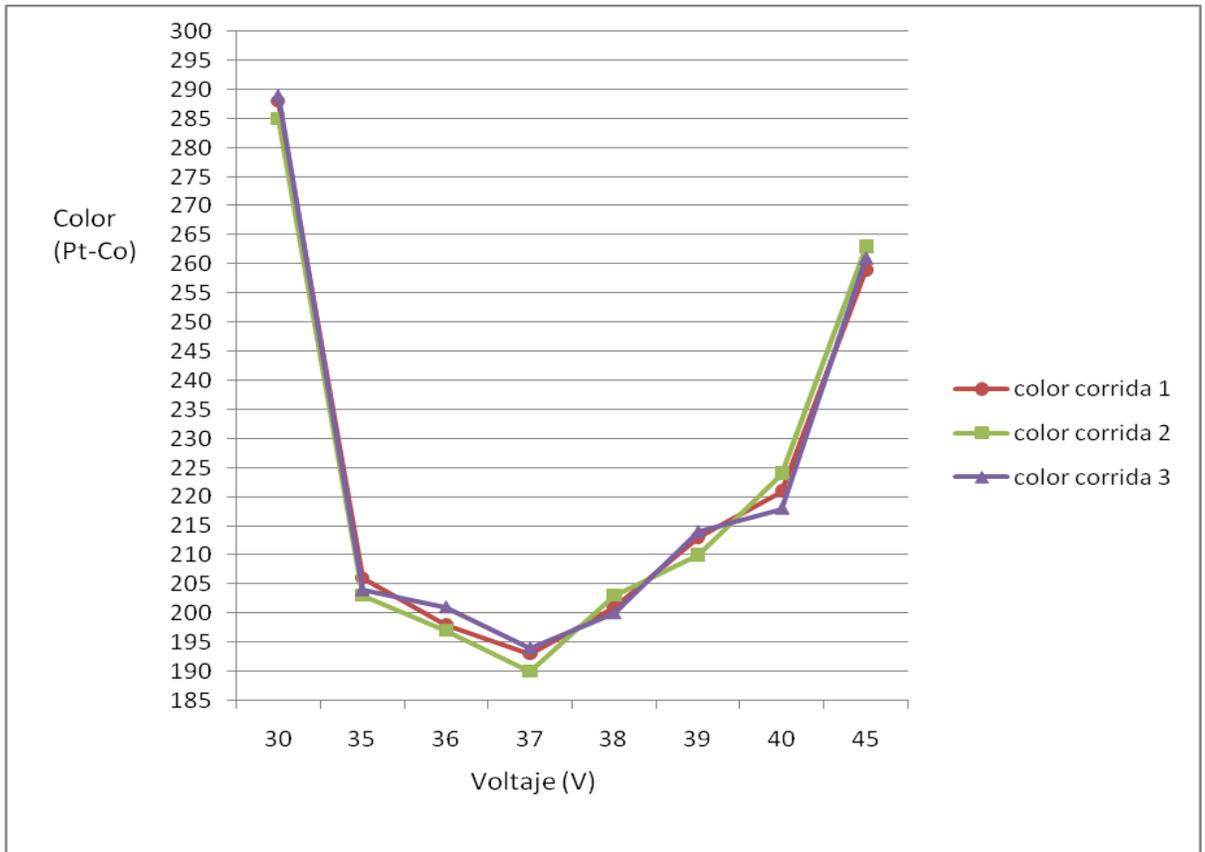


Tabla X Remoción de color medio a diferentes voltajes aplicados con diferencia de 5 V

Color inicial (Pt-Co)	Voltaje aplicado (V)	Color final después de 2 min de aplicación de V y 20 min de sedimentación					
		Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3	
		Color (Pt-Co)	% Remoción	Color (Pt-Co)	% Remoción	Color (Pt-Co)	% Remoción
1716	30	364	78.78	367	78.61	365	78.73
1716	35	321	81.29	318	81.46	320	81.35
1716	40	298	82.63	295	82.80	301	82.46
1716	45	332	80.65	329	80.82	334	80.54

Tabla XI Remoción de color medio a diferentes voltajes aplicados con diferencia de 1V

Color inicial (Pt-Co)	Voltaje aplicado (V)	Color final después de 2 min de aplicación de V y 20 min de sedimentación					
		Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3	
		Color (Pt-Co)	% Remoción	Color (Pt-Co)	% Remoción	Color (Pt-Co)	% Remoción
1716	36	313	81.75	315	81.64	314	81.70
1716	37	304	82.28	306	82.16	305	82.22
1716	38	296	82.75	298	82.63	295	82.80
1716	39	284	83.44	282	83.57	285	83.39

Figura 4 Cantidad de color vs voltaje colorante medio

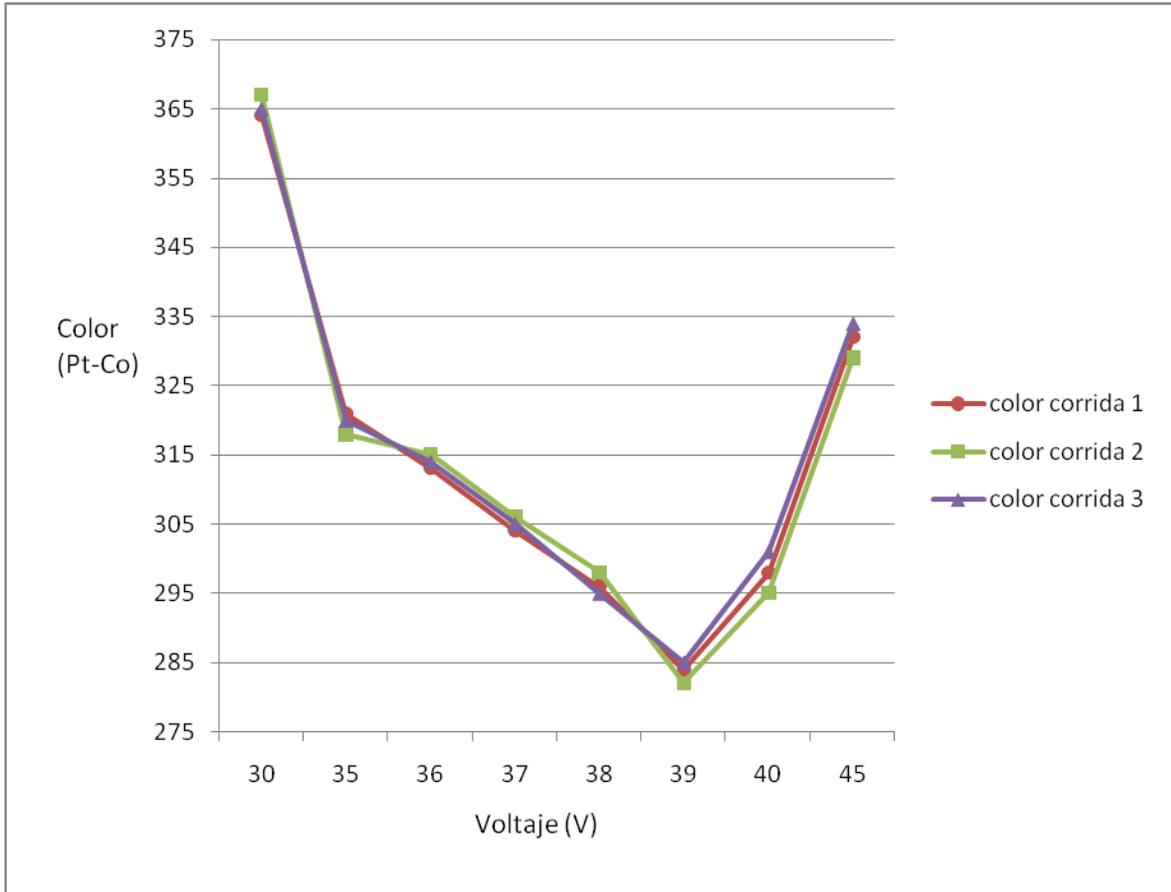


Tabla XII Remoción de color intenso a diferentes voltajes aplicados con diferencia de 5 V

Color inicial (Pt-Co)	Voltaje aplicado (V)	Color final después de 2 min de aplicación de V y 20 min de sedimentación					
		Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3	
		Color (Pt-Co)	% Remoción	Color (Pt-Co)	% Remoción	Color (Pt-Co)	% Remoción
1864	30	412	77.90	414	77.79	409	78.06
1864	35	372	80.04	375	79.88	374	79.94
1864	40	347	81.38	344	81.55	349	81.28
1864	45	391	79.02	389	79.13	394	78.86

Tabla XIII Remoción de color intenso a diferentes voltajes aplicados con diferencia de 1V

Color inicial (Pt-Co)	Voltaje aplicado (V)	Color final después de 2 min de aplicación de V y 20 min de sedimentación					
		Corrida 1		Corrida 2		Corrida 3	
		Color (Pt-Co)	% Remoción	Color (Pt-Co)	% Remoción	Color (Pt-Co)	% Remoción
1864	36	366	80.36	368	80.26	363	80.53
1864	37	360	80.68	358	80.79	361	80.63
1864	38	358	80.79	355	80.95	358	80.79
1864	39	352	81.12	348	81.33	354	81.00

Figura 5 Cantidad de color vs voltaje colorante intenso

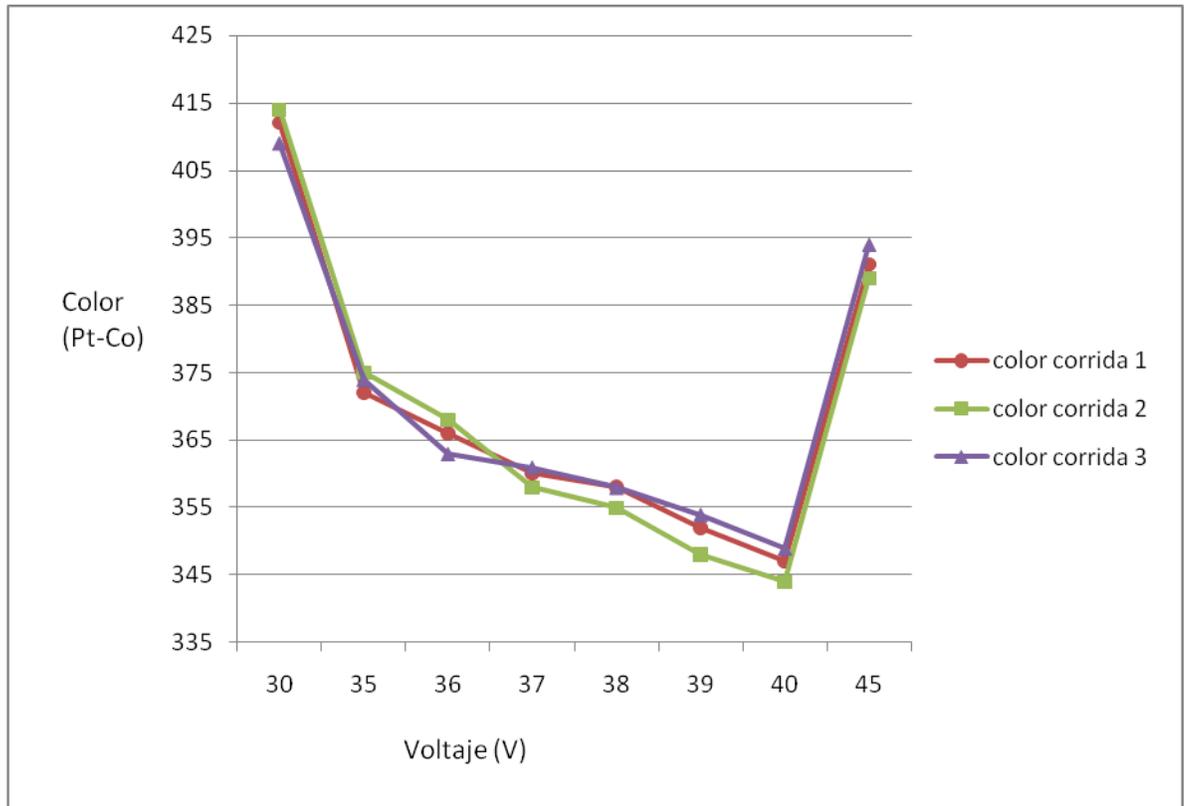


Tabla XIV Resumen de resultados

Cantidad de color en el agua antes de aplicársele voltaje (Pt-Co)	Cantidad de Color en Muestras											
	V	Color (Pt-Co) Pastel				Color (Pt-Co) Medio				Color (Pt-Co) Intenso		
		1	2	3		1	2	3		1	2	3
	V											
1453	30	288	285	289	1716	364	367	365	1864	412	414	409
1453	35	206	203	204	1716	321	318	320	1864	372	375	374
1453	36	198	197	201	1716	313	315	314	1864	366	368	363
1453	37	193	190	194	1716	304	306	305	1864	360	358	361
1453	38	201	203	200	1716	296	298	295	1864	358	355	358
1453	39	213	210	214	1716	284	282	285	1864	352	348	354
1453	40	221	224	218	1716	298	295	301	1864	347	344	349
1453	45	259	263	261	1716	332	329	334	1864	391	389	394

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La medición de color se hizo en unidades platino cobalto los cuales son una medida del color que le confieren al agua los materiales contaminantes; se utilizó esta medida debido a que el acuerdo gubernativo que rige el desecho de aguas residuales industriales esta en estas.

Para obtener los datos presentados se realizaron análisis a las porciones de agua sin ser tratadas, para determinar la intensidad de el color en las aguas provenientes del proceso, luego se introdujeron en la celda construida y se le aplicó diferentes voltajes desde los 30 V hasta los 45 V debido a que las bibliografías consultadas incluyendo estudios similares recomiendan voltajes bajos, no mayores de 50 V; de cinco en cinco, con tres repeticiones para cada una, para descartar cualquier variación, resultando 12 corridas en total, para cada tipo de agua analizada.

Se analizaron tres tipos de agua, donde se usan colores pastel, colores medios y colores intensos, ya que son los utilizados por la empresa FABRICS S.A. donde se realizó el estudio.

Posteriormente se escogieron los voltajes que disminuyeron en mayor porcentaje el color de las muestras de agua, como puede verse en las tablas VII, IX y XI. Seguidamente se aplicaron los voltajes intermedios siendo estos para los tres tipos de colorantes, 36V, 37V, 38V y 39V; cuyos resultados aparecen en las tablas VIII, X y XII respectivamente.

Se pudo concluir con base en los datos obtenidos de los análisis que los 37 V son el voltaje más eficiente para el colorante pastel, 39 V para el colorante medio y 40 V para el colorante intenso, debido a que a dichos voltajes aplicados se obtienen los mayores porcentajes de remoción.

Como puede notarse, adicionalmente a su efectividad desde el punto de vista técnico, todos los resultados, independientemente del voltaje y de la intensidad de color, cumplen con el máximo permisible del acuerdo gubernativo 236-2006; por lo que se concluyó que la electrocoagulación es un método útil y eficiente para la eliminación del color en las aguas residuales de la industria textil.

Observando también que el porcentaje de remoción del color es inversamente proporcional a la concentración del colorante, es decir para las menores concentraciones de colorante, tal como en el caso del color pastel, se obtuvo el mayor porcentaje de remoción, siendo de 86.92%; seguido del color medio, donde se obtuvo 83.57% y finalmente, para la mayor concentración, es decir el color intenso se obtuvo un máximo de 81.55% de remoción.

No obstante, puede notarse que para todas las concentraciones, en general se obtienen eficiencias de remoción mayores al 80%, que hacen de la electrocoagulación un método eficiente para el tratamiento del efluente en cuestión.

CONCLUSIONES

1. A partir de los voltajes utilizados respectivamente para las tres concentraciones de colorante evaluadas, el flujo eléctrico se utilizó para la eliminación del colorante por floculación así como en la electrolisis del agua.
2. Se logró la evaluación de la técnica de electrocoagulación en baños residuales de tinción dentro del rango de voltaje aplicado.
3. El rango de voltaje que permite la electrocoagulación en el período experimental establecido fue de 37 a 40V.
4. Para tensiones de voltaje mayores a 40 V en el período de tiempo establecido, se observó una reducción de la electrocoagulación.
5. La eficiencia de electrocoagulación de colorante en baños residuales fue inversamente proporcional a la concentración respectiva.
6. El máximo voltaje para la remoción efectiva de colorante fue de 37V, 39V y 40V respectivamente para las tres concentraciones del colorante utilizado.
7. Existe diferencia significativa en la reducción del color de las aguas residuales en función de variaciones de voltaje en la electrocoagulación.

RECOMENDACIONES

1. Realizar estudios sobre la aplicación de la electrocoagulación en proceso continuo, puesto que el presente se limitó a proceso tipo lote.
2. Dado que la efectividad de la electrocoagulación es influenciada por la temperatura, se recomienda hacer futuros estudios que tomen como variable dicha característica.
3. Realizar estudios sobre tratamiento de las aguas residuales de las industrias guatemaltecas utilizando la técnica de electrocoagulación.
4. Innovar en la industria buscando constantemente métodos para el tratamiento de las aguas residuales que sean más eficientes, para optimizar recursos y tiempo.
5. Ejercer la Ingeniería Química con una cultura de respeto al medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Chang, Raymond. **Química**. Séptima Edición. Editorial McGraw-Hill. México 2002.
2. Frank N. Kemmer. Manual del agua su naturaleza, tratamiento y aplicaciones 1979 McGraw-Hill 6-1;8-1;9-1;10-1;19-1;33-1
3. Geankoplis, C. J. **Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias**. Tercera edición. Editorial CECSA. México 1999.
4. Kern, Donald Q. **Procesos de Transferencia de Calor**. Editorial CECSA. México 2001.
5. Treybal, Robert E. **Transferencia de Masa**. Segunda Edición. México: Editorial McGraw-Hill.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acuerdo Gubernativo No.236-2006 Guatemala 17 de febrero del 2006.
“Reglamento de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores”
2. American Water Work Association, Agua su calidad y tratamiento, 1968,
unión tipográfica Editorial hispanoamericana, pág 137,170,194
3. Arenales Cifuentes Sergio Leonel. Trabajo de graduación Depuración de
color en el efluente de aguas residuales de la industria textil de algodón
mediante el método de floculación aniónica, Trabajo de Graduación de
Ingeniería Química de la Universidad Rafael Landivar de Guatemala,
Facultad de Ingeniería 2004. Pág 9-13
4. Halliday, Resnick, Walker, Fundamentals of Physics, sexta edición ,
2001, Mc Graw-Hill, capítulo 29
5. Keith J Laidler; John H Meiser, Fisicoquímica, 2003, CECSA,330,856,892

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

1. Universidad Nacional de Colombia Virtual
<http://www.virtual.unal.edu.co>
2. <http://personal.redestb.es/jorgecd/campo%20electrico.html>
3. www.ecofield.com
4. [Googleearth.com](http://www.googleearth.com)
5. http://www.teorema.com.mx/articulos.php?id_sec=42&id_art=1879&id_ejemplar=74
6. <http://edym.powweb.com/CD-tex/2p/tintura/cap12.htm>
7. <http://www.globalwater.cl>
8. <http://www.lenntech.com/espanol/tratamiento-de-aguas-residuales.htm>
9. <http://potablewater.iespana.es/coagulacion-floculacion.htm>
10. http://www.dipinnova.com/component/option,com_sobi2/sobi2Task,sobi2Details/catid,0/sobi2Id,158/Itemid,399/

APÉNDICE A

Los análisis estadísticos que se realizaron se basaron en un análisis de varianza (ANDEVA), para el que se utilizó el programa Excel de Microsoft Office.

ANDEVA COLOR PASTEL

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	3	862	287.3333333	4.33333333
Columna 2	3	613	204.3333333	2.33333333
Columna 3	3	596	198.6666667	4.33333333
Columna 4	3	577	192.3333333	4.33333333
Columna 5	3	604	201.3333333	2.33333333
Columna 6	3	637	212.3333333	4.33333333
Columna 7	3	663	221	9
Columna 8	3	783	261	4

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	24140.95833	7	3448.708333	788.27619	4.30848E-19	2.6571966
Dentro de los grupos	70	16	4.375			
Total	24210.95833	23				

ANDEVA COLOR MEDIO

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	3	1096	365.3333333	2.33333333
Columna 2	3	959	319.6666667	2.33333333
Columna 3	3	942	314	1
Columna 4	3	915	305	1
Columna 5	3	889	296.3333333	2.33333333
Columna 6	3	851	283.6666667	2.33333333
Columna 7	3	894	298	9
Columna 8	3	995	331.6666667	6.33333333

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	13644.625	7	1949.232143	584.769643	4.64952E-18	2.6571966
Dentro de los grupos	53.33333333	16	3.333333333			
Total	13697.95833	23				

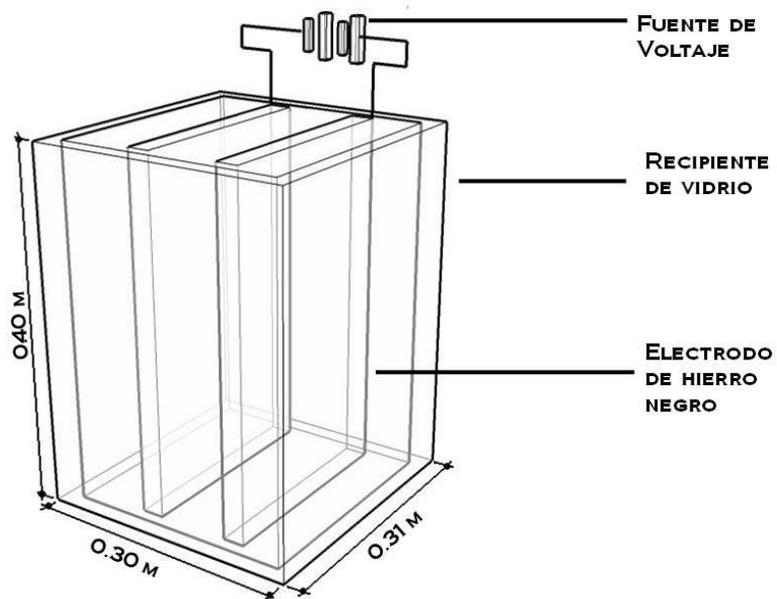
ANDEVA COLOR INTENSO

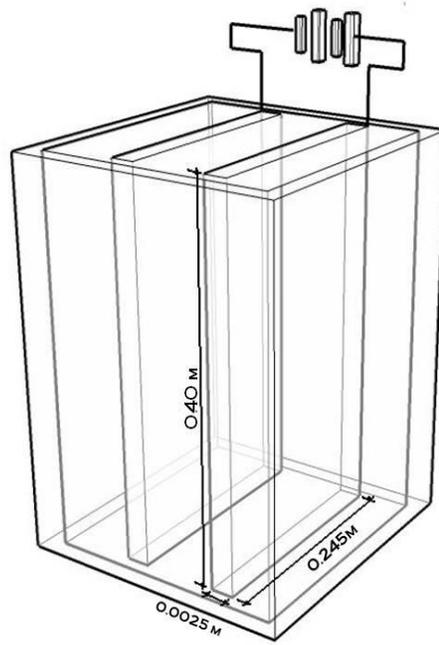
RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	3	1235	411.6666667	6.33333333
Columna 2	3	1121	373.6666667	2.33333333
Columna 3	3	1097	365.6666667	6.33333333
Columna 4	3	1079	359.6666667	2.33333333
Columna 5	3	1071	357	3
Columna 6	3	1054	351.3333333	9.33333333
Columna 7	3	1040	346.6666667	6.33333333
Columna 8	3	1174	391.3333333	6.33333333

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	10172.95833	7	1453.279762	274.635546	1.87828E-15	2.6571966
Dentro de los grupos	84.66666667	16	5.291666667			
Total	10257.625	23				

APÉNDICE B

ISOMÉTRICO DE LA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN
Dimensiones de la celda





Equipo Integrado

