



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TESIS PREVIO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR PROTOTIPO
A NIVEL DE LABORATORIO UTILIZADO PARA EL TRATAMIENTO
DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN”**

**AUTORES: YAGUANA GALLEGOS, NANCY VICTORIA
ALMEIDA CARRERA, JUAN CARLOS**

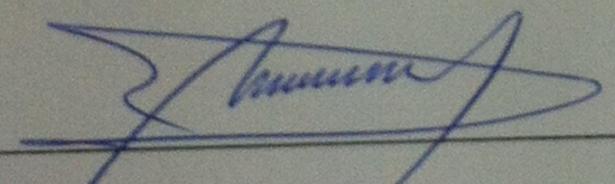
**DIRECTOR: LUIS H. CUMBAL, Ph.D
CODIRECTOR: Ing. ANÍBAL LÓPEZ**

SANGOLQUÍ

2015

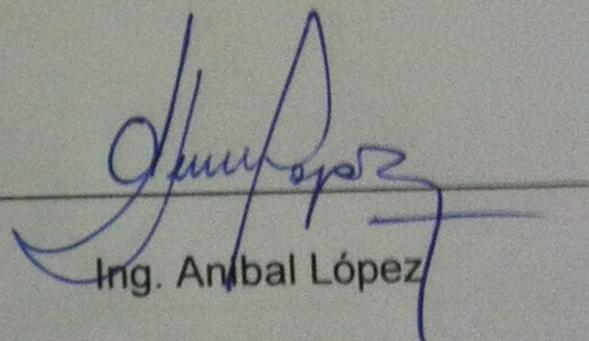
CERTIFICADO

Certificamos que el presente trabajo titulado "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR PROTOTIPO A NIVEL DE LABORATORIO UTILIZADO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN" fue realizado en su totalidad por la Srta. NANCY VICTORIA YAGUANA GALLEGOS y el Sr. JUAN CARLOS ALMEIDA CARRERA como requisito parcial a la obtención del título de INGENIERO MECATRONICO.



Luis H. Cumbal, Ph. D

DIRECTOR



Ing. Anibal López

CODIRECTOR

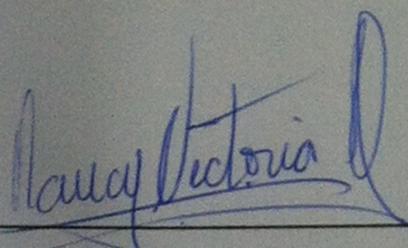
Sangolquí, Julio del 2015

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

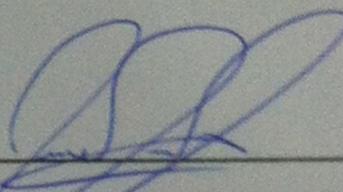
El presente proyecto titulado: "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR PROTOTIPO A NIVEL DE LABORATORIO UTILIZADO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN", ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación presente, así como también se ha respetado el derecho intelectual de terceros considerándolo en citas a pie de página y como fuentes en el registro bibliográfico.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance del proyecto en mención.

ELABORADO POR:



Nancy Victoria Yaguana Gallegos



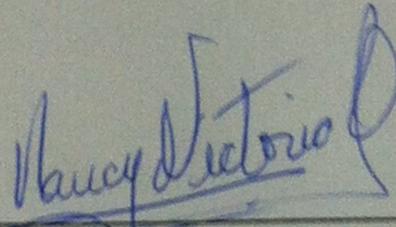
Juan Carlos Almeida Carrera

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

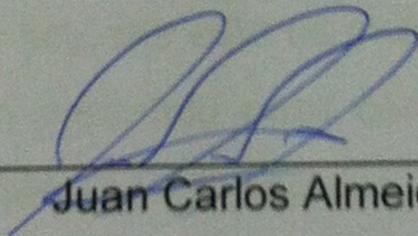
AUTORIZACIÓN

Nosotros, Nancy Victoria Yaguana Gallegos, y Juan Carlos Almeida Carrera

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la institución del proyecto de grado titulado: "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR PROTOTIPO A NIVEL DE LABORATORIO UTILIZADO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN", cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.



Nancy Victoria Yaguana Gallegos



Juan Carlos Almeida Carrera

Sangolqui, Julio de 2015

DEDICATORIA

Nancy Victoria Yaguana Gallegos:

Con todo amor para las personas que han dado todo para que yo pueda lograr mis sueños, por ser mí guía, motivo e inspiración. Quiero agradecerles por todas sus enseñanzas, por mostrarme el verdadero valor de las cosas. Espero regresar un poquito de todo lo inmenso que me han otorgado. Para ustedes siempre mi corazón y agradecimiento.

Papá, Mamá, Rosy, Mary y Darío.

Juan Carlos Almeida Carrera:

A mis padres, Juan y Mónica, gracias a su dedicada tarea ahora se termina una nueva etapa en mi vida, ellos me han inculcado valores y principios que me han formado a ser la persona que ahora soy, por esto es muy grato recompensarlos con este trabajo como símbolo del ejemplo impartido para continuar luchando por mis ideales y así alcanzar mis metas personales y profesionales.

A mis hermanos, Andrea, Alexandra y Francisco, que gracias a sus consejos, experiencias, sonrisas y lágrimas; han estado ahí para apoyarme en todos los momentos de mi vida y que ante toda adversidad poder contar con ellos.

AGRADECIMIENTOS

Nancy Victoria Yaguana Gallegos:

Agradezco a Dios porque ha puesto a maravillosas personas en mi camino de las cuales he aprendido muchas cosas y a las cuales les debo lo que soy ahora. Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas aquellas personas que han contribuido de una u otra forma para que yo me moldeé como persona y profesional. Me han ayudado a forjar mi camino, siendo guía, tendiendo una mano amiga, o simplemente compartiendo los momentos buenos y malos.

Gracias a mis Maestros y amigos.

Juan Carlos Almeida Carrera:

En primer lugar a Dios, por su amor y enseñanzas que me guían todos los días, por darme sabiduría para la realización y culminación de este proyecto.

A mis padres, Juan y Mónica, que con sus esfuerzos, paciencia y sabiduría me han ayudado a conseguir este logro. A mis hermanos, Andrea, Alexandra y Francisco, que con su apoyo y enseñanzas supieron guiarme en mi formación personal y profesional.

A todos mis amigos, en especial, Lizzethe, Victoria, Natasha, Mijail y Héctor, me han brindado su apoyo y compañía en todo momento bueno y malo de mi vida.

A mis tíos, Marcelo y Fresia, a mis primos, Sebastián y Alan, que me han aconsejado y las enseñanzas que han sabido impartirme a lo largo de mi vida.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACION.....	i
DECLARACION DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	v
INDICE DE CONTENIDOS.....	vi
LISTADO DE TABLAS.....	xi
LISTADO DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
CAPITULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.2.JUSTIFICACIÓN.....	2
1.3.OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
CAPITULO 2.....	4
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1.ELECTROQUÍMICA.....	4
2.2.ELECTRÓLISIS	5
2.2.1. CELDAS GALVÁNICAS.....	6
2.3.ELECTROCOAGULACIÓN.....	7
2.3.1. HISTORIA.....	7
2.3.2. CARACTERÍSTICAS.....	8
2.3.3. PROCESO.....	9

2.3.4. EFECTOS DE VARIOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN.....	11
2.3.5. TIPOS DE REACTORES EN LA ELECTROCOAGULACIÓN	17
2.3.6. VENTAJAS	20
2.3.7. DESVENTAJAS.....	20
2.3.8. COMPARACIÓN CON OTROS MÉTODOS	21
2.4. ANÁLISIS DE COSTO	23
2.5. DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA CAD	24
2.6. INGENIERIA ASISTIDA POR COMPUTADORA CAE	24
2.7. INSTRUMENTACION MECATRONICA	25
2.7.1. SENSORES.....	25
2.8. ACTUADORES ELECTRICOS	29
2.8.1. MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA.....	29
2.8.2. BOMBAS HIDRAÚLICAS	30
2.9. MICROCONTROLADORES.....	31
2.9.1. TIPOS DE MICROCONTROLADORES.....	31
2.10. INTERFACES GRAFICAS.....	32
2.10.1. INTERFAZ HUMANO MAQUINA (HMI).....	32
2.10.2. TIPOS DE HMI.....	33
2.10.3. SOFTWARE PARA PROGRAMACION HMI.....	33
CAPITULO 3.....	35
3. MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	35
3.1. DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES.....	35
3.1.1. UNIDAD DE ELECTROCOAGULACIÓN.....	35
3.2. TÉCNICAS ANALÍTICAS	36
3.2.1. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	36

3.2.2. DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO ₅)	37
3.2.3. MEDIDA DE POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH).....	39
3.2.4. MEDIDA DE CONDUCTIVIDAD	40
3.2.5. MEDIDA DE TURBIDEZ	41
3.3. PRODUCTOS UTILIZADOS	43
3.3.1. AGUA RESIDUAL TEXTIL.....	43
3.4. ENSAYOS DE LABORATORIO	44
3.4.1. ENSAYOS PRELIMINARES BACH.....	45
3.4.2. PROCEDIMIENTOS OPERATIVOS.....	46
3.5. DISEÑO ESTADÍSTICO.....	47
3.5.1 DISEÑO EXPERIMENTAL	48
3.5.2 MODELO ESTADÍSTICO	49
3.5.3 ERROR ALEATORIO Y ERROR EXPERIMENTAL	50
3.5.4 ANÁLISIS	50
CAPITULO 4.....	51
4. RESULTADOS	51
4.1. ENSAYOS DE LABORATORIO	51
4.1.1. PRUEBA PILOTO	51
4.1.2. PRUEBA DE LABORATORIO UNO	52
4.1.3. PRUEBA DE LABORATORIO DOS	54
4.1.4. PRUEBA DE LABORATORIO TRES.....	54
4.1.5. PRUEBA DE LABORATORIO CUATRO	56
4.1.6. PRUEBA DE LABORATORIO CINCO.....	57
4.1.7. PRUEBA DE LABORATORIO SEIS.....	58

4.2. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE TURBIDEZ , COLOR REAL, Y VARIACIÓN DE PH	59
4.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS ENSAYOS DE REMOCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE ANÁLISIS.....	60
4.3.1. ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA).....	60
4.3.2. PRUEBA DE TUKEY	62
4.3.3. IDENTIFICACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS MEJORES ENSAYOS DE REMOCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE ANÁLISIS.	63
4.4. ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL	64
4.5. DISCUSIÓN	66
CAPITULO 5.....	71
5. DISEÑO DEL EQUIPO DE ELECTROCOAGULACION.....	71
5.1. DISEÑO DE COMPONENTES MECÁNICOS.....	71
5.1.1. DISEÑO DEL TANQUE REACTOR.....	71
5.1.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE REMOCIÓN DE LODOS	74
5.1.3. DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE AGUA RESIDUAL	75
5.1.4. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE DEL PROTOTIPO.....	77
5.1.5. DISEÑO Y SELECCIÓN DE TUBERÍA.....	79
5.1.6. SELECCIÓN DE BOMBA	80
5.2. DISEÑO DE LOS COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS ..	84
5.2.1. SELECCIÓN INSTRUMENTOS DE MEDICION.....	84
5.2.2. SELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR	89
5.2.3. SELECCIÓN DE ACTUADORES	90
5.2.4. DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO PCB.....	96

5.3. OPERACIONALIDAD TEÓRICA DE VOLTAJE E INTENSIDAD DEL REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN	100
5.3.1. VOLTAJE.....	100
5.3.2. INTENSIDAD	101
6. RESULTADOS	102
6.1. ANÁLISIS DE COSTO	108
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	110
7.1 CONCLUSIONES.....	110
7.2 RECOMENDACIONES	112
8. BIBLIOGRAFIA.....	113
9. ANEXOS.....	118

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de Electrocoagulación con otros métodos.....	22
Tabla 2. Características del agua residual de la industria textil.....	23
Tabla 3. Clasificación Electroodos de pH.....	28
Tabla 4. Volumen de muestra para el análisis OxiTop de DBO de acuerdo a los valores de DQO	39
Tabla 5. Lecturas de Turbidez.....	42
Tabla 6. Caracterización del agua residual textil a tratar y límites permisibles según norma ambiental para descargas en alcantarillado publico	43
Tabla 7. Descripción de Parámetros y rangos de medición	45
Tabla 8. Factor controlable de resistencia.....	48
Tabla 9. Factor controlable de conductividad	48
Tabla 10. Tratamientos para el análisis del efluente	49
Tabla 11. Parámetros de operación del reactor prueba piloto.....	51
Tabla 12. Caracterización del efluente en prueba piloto	52
Tabla 13. Parámetros de operación del reactor ensayo uno	53
Tabla 14. Caracterización del efluente en ensayo uno.....	53
Tabla 15. Parámetros de operación del reactor ensayo dos	54
Tabla 16. Caracterización del efluente en ensayo dos.....	54
Tabla 17. Parámetros de operación del reactor ensayo 3.....	55
Tabla 18. Caracterización del efluente en ensayo tres.....	55
Tabla 19. Parámetros de operación del reactor ensayo cuatro	56
Tabla 20. Caracterización del efluente en ensayo cuatro.....	56
Tabla 21. Parámetros de operación del reactor ensayo cinco.....	57
Tabla 22. Caracterización del efluente en ensayo cinco	57
Tabla 23. Parámetros de operación del reactor ensayo seis	58
Tabla 24. Caracterización del efluente en ensayo seis	58
Tabla 25 Porcentaje de remoción de turbidez y color real y variación de pH.....	59
Tabla 26. Análisis de Varianza ANOVA de ensayos de variación de pH	61
Tabla 27. Análisis de Varianza ANOVA de ensayos de remoción de Turbidez.....	61

Tabla 28. Análisis de Varianza ANOVA de ensayos de remoción de Color Real....	61
Tabla 29. Prueba de Tukey aplicada a la interacción de todas las variables evaluadas en la variación de pH	62
Tabla 30. Prueba de Tukey aplicada a la interacción de todas las variables evaluadas en la remoción de Turbidez.....	62
Tabla 31. Prueba de Tukey aplicada a la interacción de todas las variables evaluadas en la remoción de Color Real.....	63
Tabla 32: Regresión Lineal pH.....	65
Tabla 33. Regresión Lineal Turbidez.....	65
Tabla 34. Regresión Lineal Color Real.....	66
Tabla 35. Correlación entre variables.....	66
Tabla 36. Matriz de decisión sensor de nivel.....	87
Tabla 37. Características Sensor Ultrasónico SRF04	88
Tabla 39. Características Arduino MEGA 2560.....	90
Tabla 40. Características diferentes motores	92
Tabla 41. Características pantalla táctil uLCD-32PTU-AR	95
Tabla 42. Entradas y Salidas Arduino MEGA 2560.....	98
Tabla 43. Medición de DQO en los ensayos del prototipo a nivel de laboratorio ..	102
Tabla 44. Medición de Turbidez en los ensayos del prototipo a nivel de laboratorio.	102
Tabla 45. Medición de Color Real en los ensayos del prototipo a nivel de laboratorio	103
Tabla 46. Medición de pH en los ensayos del prototipo a nivel de laboratorio	103

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Cuba Electrolítica donde se produce la electrólisis.	6
Figura 2. Celda Galvánica.	7
Figura 3. Diferentes Modos de Conexión Electroodos.	12
Figura 4: Unidades de Electrocoagulación de flujos horizontal y vertical.	18
Figura 5: Unidades de electrocoagulación con disposición de canales múltiples y de canal único.	18
Figura 6: Diagrama esquemático del modo de operación de un sistema batch y continuo.....	19
Figura 7. Clasificación de los tipos de bombas	30
Figura 8. Equipo de electrocoagulación a escala de laboratorio	35
Figura 9. Ensayo Prueba Piloto.....	52
Figura 10. Prueba Laboratorio Uno	53
Figura 11. Prueba Laboratorio Dos	54
Figura 12. Prueba Laboratorio Tres	56
Figura 13. Prueba Laboratorio Cuatro.....	57
Figura 14. Prueba Laboratorio Cinco	58
Figura 15. Prueba Laboratorio Seis.....	59
Figura 16. Porcentajes de remoción de Turbidez y Color Real de los seis ensayos realizados.....	63
Figura 17. Variación de pH de los ensayos realizados.....	64
Figura 18. Zonas dentro del reactor de electrocoagulación	71
Figura 19. Dimensiones del electrodo de aluminio para reactor.....	72
Figura 20. Simulación de tanque reactor con tanques para almacenar los lodos recogidos por las paletas de remoción. Diseño realizado con software SolidWorks	74
Figura 21. Sistema de Remoción de Lodos con carritos testers.	75
Figura 22. Dimensiones tanque alimentador.....	76
Figura 23. Estructura de soporte para los tanques.....	77
Figura 24. Análisis de flexión en estructura de Acero A36.....	78

Figura 25. Análisis de deformación en estructura de Acero A36.....	78
Figura 26. Kit Sensor de conductividad para Arduino	85
Figura 27. Kit sensor de pH para Arduino	86
Figura 28. Sensor Ultrasónico SRF04	88
Figura 29. Placa Arduino MEGA 2560	89
Figura 30. Electroválvula SmartSolu 2W-15P	92
Figura 31. Micro motor con caja reductora 163F3F.....	93
Figura 32. Bomba de Aire OXIBOOST APR 200.....	94
Figura 33. Pantalla táctil uLCD-32PTU-AR	95
Figura 34. Sección Transversal de la pista vs corriente	99
Figura 35. Sección transversal vs ancho de pista	100
Figura 36. Porcentaje de Remoción de DQO en ensayos del prototipo a nivel de laboratorio.	104
Figura 37. Porcentaje de Remoción de Turbidez en ensayos del prototipo a nivel de laboratorio.	105
Figura 38. Porcentaje de Remoción Color en ensayos del prototipo a nivel de laboratorio.	105
Figura 39. Variación de pH en ensayos del prototipo a nivel de laboratorio.....	106

RESUMEN

El propósito de este proyecto fue investigar los efectos de los parámetros de operación que intervienen en el proceso de electrocoagulación, como son conductividad, pH, intensidad de corriente, distancia entre electrodos, etc.; para determinar las condiciones óptimas de funcionamiento de una planta de tratamiento de agua residual textil. Inicialmente, se construyó un prototipo con 1 litro de capacidad para realizar los ensayos preliminares, con los cuales se desarrolló un diseño experimental estadístico del prototipo para obtener las condiciones óptimas de funcionamiento del mismo. La caracterización del agua a tratar, dio valores de DBO₅ 800 mg/l, DQO 3484.62 mg/l, pH 9.84, conductividad 4.8 uS/cm, color real 3415 PtCo y turbidez >1000 FNU; que luego del construido el prototipo de 10 litros de capacidad dió como resultados los siguientes porcentajes de remoción: 99% de remoción de turbidez y color, y 68% de remoción de DQO. El diseño del prototipo a nivel de laboratorio es un reactor a nivel de bancada, con capacidad de 10 litros. El diseño consta de 3 tanques: el primero es el alimentador, donde se verifican los valores óptimos de pH y conductividad para que el proceso sea eficiente, el segundo es el reactor donde se produce la electrocoagulación, funciona con tiempo de retención de 30 minutos, 24 VAC, 8 A y, consta de 15 electrodos de aluminio con separación de 11 mm entre los mismos, adicionalmente existe un sistema de aireación y remoción de lodos. Finalmente, el tanque de recepción, filtra el agua tratada proveniente del tanque reactor.

PALABRAS CLAVE:

- **ELECTROCOAGULACIÓN**
- **CONDUCTIVIDAD**
- **TURBIDEZ**
- **DQO**
- **PROTOTIPO**

ABSTRACT

The purpose of this project was to investigate the effects of the operating parameters that take part in the electrocoagulation process, such as conductivity, pH, current density, interelectrode distance, and so on; in order to determine the optimal operating conditions of the textile wastewater treatment. Initially a 1 liter capacity prototype was constructed for preliminary testing, in which, with the obtained data an experimental statistic design was developed giving the optimal operation condition for the prototype. The textile wastewater analysis showed values of biological oxygen demand 800 mg/l, chemical oxygen demand 3484.62 mg/l, pH 9.84, conductivity 4.8 uS/cm, real color 3415 PtCo and, turbidity > 1000 FNU; however after the treatment was tested in the 10 liter capacity prototype the removal percentages were: 99% of turbidity and color, and 68% of COD. The prototype design is a bench scale laboratory reactor, with capacity for 10 liters. The design is based in 3 containers: the first one is the feeder, in which the values of pH and conductivity are verified to get the maximum efficiency of the process; the second one is the reactor tank where the electrocoagulation process works, it has a treatment duration of 30 minutes, works with 24VAC and 8A of current density. The electrocoagulation reactor contains 15 aluminum electrodes with an interelectrode distance of 11mm. Additionally, the process has been provided of an aeration system and sludge removal system. Finally, the reception tank, filters the treated water from the reactor tank.

KEYWORDS:

- **ELECTROCOAGULATION**
- **CONDUCTIVITY**
- **TURBIDITY**
- **COD**
- **PROTOTYPE**

CAPITULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La contaminación del agua se produce por el vertimiento en ella de compuestos orgánicos o inorgánicos, que al ser disueltos o suspendidos alcanzan una concentración superior al límite tolerable para su uso (Orozco, 2005). La fuente contaminante puede ser de origen doméstico, industrial, agrícola y/o natural. Sin embargo, debido al aumento poblacional y actividad industrial, las cargas contaminantes vertidas a cuerpos de agua dulce son cada vez mayores, provocando su deterioro (Rodríguez A. L., 2006).

En la industria textil, el consumo de agua se estima entre 100 y 170 m³ de agua por tonelada de tela producida (Pey, 2008). El efluente residual contiene contaminantes como colorantes y subproductos orgánicos e inorgánicos generados a partir de sus reacciones químicas, además de pH alto, presencia de pelusas y fibras e insumos químicos utilizados en el acabado (Habibat, 2006).

El agua residual de la industria textil es altamente contaminada, la presencia de colorantes interfiere en la actividad fotosintética de plantas acuáticas y microorganismos. La presencia de contaminantes orgánicos interfieren en el desarrollo de fauna y flora dentro y alrededor de los cuerpos receptores (Horan, 1991).

En Ecuador más del 90% de los efluentes textiles se descargan directamente a la alcantarilla proliferando la contaminación y contribuyendo al deterioro ambiental (EMAAP-Q, 2009)

A nivel nacional la mayor parte de industrias que dan tratamiento a sus aguas residuales, utilizan procesos químicos y biológicos para cumplir con las normativas impuestas por el Ministerio de Ambiente, lo que conlleva a que las

industrias tengan que importar los químicos y bacterias necesarios para cumplir con tal propósito.

El proceso de electrocoagulación es una tecnología limpia y emergente que actúa de igual manera en la reducción de la contaminación del agua como los procesos químicos y biológicos. Este proceso puede tener resultados exitosos en su aplicación si se optimizan los factores que lo conforman, alcanzando el reto de proteger, conservar y recuperar el recurso hídrico.

1.2. JUSTIFICACIÓN

El agua es un recurso de vital importancia en la vida humana animal y vegetal, por eso es indispensable el cuidado del mismo recurso. Con el desarrollo industrial este recurso se ha visto contaminado dando como resultado la escases del mismo. Cada vez es mayor la demanda de agua dulce limpia, es por esto que se han implementado distintos tipos de tratamiento de agua con el fin de reutilizar la misma, o volverla apta para su respectiva desembocadura en los ríos, cumpliendo con normas de calidad impuestas por los organismos que cuidan de esta.

Según el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, actualmente el agua se está convirtiendo en una materia prima escasa. Existen campañas de concientización global para preservar los recursos naturales. Un estudio de talleres textiles en las provincia de Pichincha revela que se paga 0,72 centavos de dólar por cada metro cúbico de agua utilizada, tarifa doméstica y subsidiada (EMAAP-Q, 2009).

Según datos estadísticos obtenidos del INEC, el 80% de las industrias a nivel nacional se encuentran asentadas en la región sierra y sus efluentes contaminados, sin tratar, son descargados a las alcantarillas y arrastrados a cuerpos receptores de agua (Moncayo, 2010).

En la industria los costos de manufactura de productos representan un mayor porcentaje comparados con los costos de tratamiento de agua. En el caso específico de las industrias textiles, se utilizan diversos químicos para el tratamiento de las telas produciendo así, un agua residual con altas concentraciones de materia orgánica e inorgánica, pH y color. Estos efluentes provenientes de esta industria son altamente contaminados y tóxicos, de ahí su importancia a tratarlos.

La electrocoagulación se presenta como una solución alternativa a esta problemática, dando como resultado la depuración de las aguas residuales, mediante el uso de la electricidad como medio para la descontaminación del agua, se basa en el principio de electrólisis, combina la coagulación química con principios eléctricos produciendo así iones metálicos de alta valencia como coagulante en celdas electrolíticas. Consiste en pasar corriente a través de electrodos de aluminio cobre o hierro, sumergidos en el efluente a tratar.

Por las diversas cargas orgánicas que tienen las aguas residuales industriales, es importante realizar ensayos a nivel de laboratorio o en plantas piloto antes de realizar un tratamiento a escala real. Entonces es necesario construir un prototipo a escala de una planta real para manipular los parámetros que influyen en el tratamiento y controlarlos, es aquí donde la Mecatrónica puede intervenir, esto es, en el diseño un prototipo de máquina que simule el tratamiento de las aguas residuales.

La Mecatrónica se encarga del diseño mecánico y electrónico de diversos dispositivos empleados en la industria; en este caso específico se aporta a la ingeniería en biotecnología, rama de la ingeniería que se encarga del estudio de tratamiento de aguas, diseñando el prototipo de una planta de tratamiento. Cabe señalar que el estudio de este tema no ha sido desarrollado a profundidad en el país, y al ser la descontaminación de los efluentes un tema emergente de acuerdo al bajo porcentaje (6%) de industrias que cuentan con plantas de

tratamiento de aguas residuales (INEC, 2011), es prioridad la inmersión de la Mecatrónica en la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías que aporten para el mejoramiento de la calidad de vida, además de proveer un ambiente sano y sustentable.

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

- Diseñar y construir un prototipo para laboratorio de un reactor para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil ecuatoriana mediante el proceso de electrocoagulación.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el agua residual a tratar, con la toma de muestras demostrativas en la industria textil.
- Realizar pruebas de laboratorio para definir parámetros óptimos de operación para controlar el color y turbidez del agua residual de la industria textilera.
- Diseñar e implementar el sistema del reactor de electrocoagulación para la obtención de agua tratada.

CAPITULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. ELECTROQUÍMICA

La electroquímica se dedica fundamentalmente al estudio de las reacciones químicas que dan origen a la producción de una corriente eléctrica, ó que son producidas por el paso de una corriente eléctrica (Streber, 1983). Estas reacciones tienen lugar en una solución, en la superficie de un conductor de electrones y un conductor iónico, donde ocurre una transferencia de electrones

entre el electrodo y electrolito. En estas reacciones donde los electrones se transfieren entre las moléculas se llaman reacciones de oxidación/reducción.

Un átomo o ion que cede un electrón a otro átomo, aumenta su estado de oxidación, y el destinatario del electrón cargado negativamente disminuye su estado de oxidación. La oxidación y la reducción siempre ocurren de una manera tal que una especie se oxida cuando otra se reduce.

La electroquímica se divide en: electrólisis (celdas electrolíticas) y celdas electroquímicas (celdas galvánicas).

2.2. ELECTRÓLISIS

La electrolisis estudia las reacciones químicas que se producen cuando en un electrolito se introducen electrodos inducidos con corriente eléctrica proveniente de una fuente externa.

Cuando se conecta la fuente a los electrodos se producen reacciones de oxidación/reducción, en el ánodo (polo positivo) se produce una oxidación y en el cátodo (polo negativo) una reducción, es decir, cada electrodo atrae a los iones de carga opuesta, es así que, el cátodo atrae los iones positivos o cationes, mientras que el ánodo atrae a los iones negativos o aniones. Cuando ocurre esta interacción, los electrones absorbidos o emitidos forman elementos o compuestos deseados.

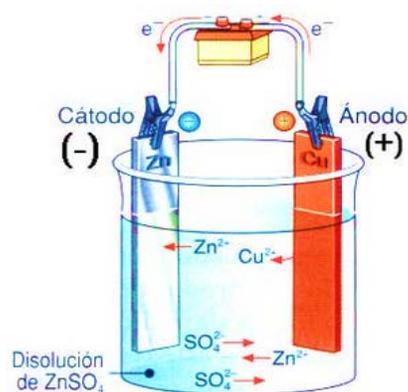


Figura 1. Cuba Electrolytica donde se produce la electrólisis.

Fuente:<http://educa.madrid.org/web/ies.isidradeguzman.alcala/departamentos/fisica/temas/redox/electrolisis.html>

2.2.1. CELDAS GALVÁNICAS

La celda galvánica o conocida también como electroquímica o pila voltaica, sirve para la generación de corriente eléctrica teniendo como fuente una reacción química.

Esta funciona con dos vasos que contiene un electrolito, conectados con un puente salino, y cada uno contiene un electrodo. Un electrodo desprenderá sus átomos al estar en contacto con el electrolito, y los electrones fluirán de un lado para el otro por medio de un conductor.

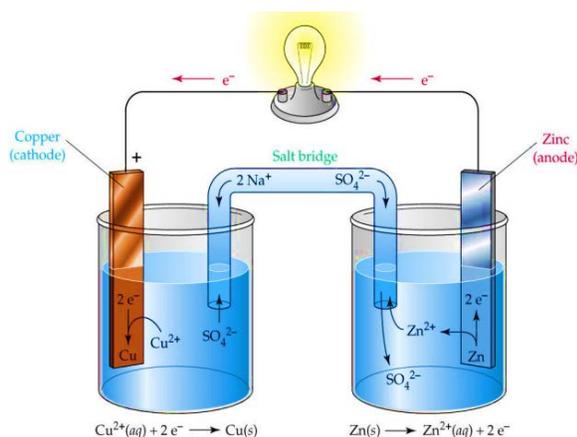


Figura 2. Celda Galvánica.

Fuente: <http://www.ciens.ucv.ve/eqsol/Electro/Libros/celdas%20galvanicas.pdf>

2.3. ELECTROCOAGULACIÓN

2.3.1. HISTORIA

La electrocoagulación ha sido estudiada y desarrollada desde 1906, con la primera patente concebida en Estados Unidos. Desde el siglo XIX, se efectuó el primer ensayo reportado en Londres por Webster, en su experimento utilizaba ánodos de hierro soluble, con una caída de potencial de 1.8 vatios entre los electrodos, distantes de 1 pulgada y una corriente anódica de $0.6 \text{ A}/\text{pie}^2$. (Arango, 2007).

En 1893, Wolff electrolizó una solución concentrada de sal para producir cloro y sosa caustica, que utilizaba para esterilizar aguas negras en New York. En 1896 se usó en Kentucky, una modificación del proceso de Webster para coagular agua cenagosa del río Ohio, proceso en el que se utilizaron ánodos de hierro y de aluminio.

En 1932 fue utilizada la electrocoagulación en Alemania, con eficiencias del 50% en reducción de DBO de las aguas residuales, la falencia de estos procesos se dió por el alto costo de la energía y la necesidad de recambiar los electrodos.

Durante las dos últimas décadas se han reportado trabajos en donde se utiliza el proceso para remover partículas dispersas de aceite, grasa y petróleo en el tratamiento de aguas residuales provenientes de procesos de electro-plateado, textiles y en procesos de potabilización del agua. (Restrepo et al., 2006).

2.3.2. CARACTERÍSTICAS

La electrocoagulación es un método simple y eficiente, y se ha usado para el tratamiento de muchos tipos de aguas residuales como aguas residuales de galvanoplastia, de lavandería, de restaurantes, y de aguas residuales de matadero de aves. (Verma, 2013). La electrocoagulación se ha utilizado con éxito para la eliminación de contaminantes de aguas residuales industriales diferentes. Muchos estudios se han reportado en el uso de electrocoagulación para el tratamiento de tintes en la industria textil así como de sus efluentes. (Adhoum, 2004).

Los metales pesados que se utilizan generalmente en bronceado, galvanoplastia, cuero, textiles, acabado de metales, cintas magnéticas, productos para pigmentos, conservantes de la madera y las industrias de cromado, son metales pesados en las aguas residuales que se han convertido en problemas ambientales graves. La mayoría de los efluentes industriales contienen metales tóxicos como el Cd, Cr, Cu, Ni, Zn, Pb y otros compuestos que son tóxicos para los organismos vivos y perjudiciales para el medio ambiente cuando se descargan directamente en los cuerpos de agua. (Janpoor, 2011).

Estos metales pueden ser absorbidos fácilmente por los peces y verduras debido a su alta solubilidad en los entornos acuáticos y pueden acumularse en el cuerpo humano por medio de la cadena alimentaria. De manera que es necesario tratar las aguas residuales que contienen metales tóxicos para eliminar sus efectos adversos sobre la salud humana y la ecología. (Chen, 2000).

La electrocoagulación se ha utilizado para la eliminación de arsénico, fosfato, sulfuro, sulfato y sulfito, boro, fluoruro, nitrato y cromato. (Verma, 2013).

La combinación de diversas técnicas para el tratamiento de efluentes conduce a una eficiencia de eliminación mayor en comparación con el uso de método de tratamiento por sí solo. La electrocoagulación en combinación con otros métodos de tratamiento es una manera segura y eficaz para la eliminación de contaminantes. (Kumar, 2004).

Dado que los flóculos formados por electrocoagulación son relativamente grandes, contienen menos agua y son más estables pueden eliminarse fácilmente por filtración. La técnica es rentable y fácilmente accesible, ya que necesita equipos simples y pueden ser diseñados para cualquier capacidad de la planta de tratamiento de efluentes. (Koby, 2006).

Se necesita poca intensidad, y por lo tanto, puede ser operado por procesos verdes, como: solar, molinos de viento y las pilas de combustible. Dado que no se requiere ninguna adición de productos químicos en este proceso, se reduce la posibilidad de generación de contaminantes secundarios, que además reducirá en gran medida la generación de lodos. El proceso de electrocoagulación puede desestabilizar efectivamente pequeñas partículas coloidales y genera menor cantidad de lodos en comparación con otros procesos. (Zaroual, 2006).

2.3.3. PROCESO

La electrocoagulación implica muchos fenómenos químicos y físicos que hacen uso de electrodos consumibles para suministrar iones en el sistema contaminante. En los iones de electrocoagulación se producen in situ y consta de las siguientes etapas sucesivas (Mollah, 2001):

- Disolución del ánodo.
- La formación de iones OH y H en el cátodo

- Reacciones electrolíticas en superficies de los electrodos.
- La adsorción de coagulante sobre contaminantes coloidales.
- La eliminación de los coloides por sedimentación o flotación.

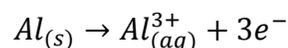
En un proceso de electrocoagulación, el conjunto de electrodos está generalmente conectado a una fuente de CC externa y el parámetro importante es la selección del material del electrodo y el modo de combinación de ánodo y de cátodo. El material de electrodo para el tratamiento de aguas residuales no debe ser tóxico para la salud humana y el medio ambiente. (Khandegar, 2012).

Los materiales de los electrodos utilizados comúnmente como electrodos son: de aluminio, hierro, acero inoxidable, acero suave y grafito ya que son baratos, disponibles, no tóxicos y eficaces. (Mollah, 2004).

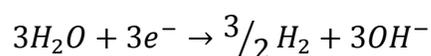
Cuando el aluminio y el hierro se utilizan como material de ánodo, los iones metálicos se liberan de ánodo y muchas especies de hidrólisis monoméricas iónicas se forman, dependiendo del pH de la solución. Las reacciones que tienen lugar en los electrodos en electrocoagulación son los siguientes (Bayramoglu, 2006):

- Para electrodos de aluminio.

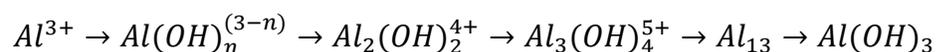
La reacción de oxidación se lleva a cabo en el ánodo.



Reacción de reducción se lleva a cabo en el cátodo

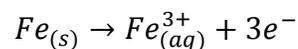
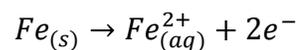


En general la reacción durante la electrólisis

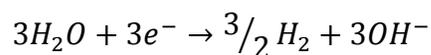
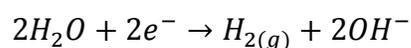


- Para electrodos de hierro

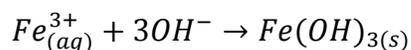
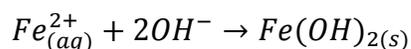
La reacción de oxidación se lleva a cabo en el ánodo



Reacción de reducción se lleva a cabo en el cátodo



En general la reacción durante la electrólisis



2.3.4. EFECTOS DE VARIOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN

Para determinar la eficiencia el proceso de electrocoagulación, se debe controlar de varios parámetros de operación, entre éstos: la conductividad de la solución, el arreglo de electrodos, la forma de los electrodos, el tipo de alimentación, el pH de la solución, la densidad de corriente, la distancia entre electrodos, la velocidad de agitación, y el tiempo de electrolisis.

2.3.4.1. CONDUCTIVIDAD DE LA SOLUCIÓN

La conductividad que presenta una solución es un parámetro determinante en el proceso de electrocoagulación, ya que sirve para determinar el porcentaje de remoción del contaminante y los costos de operación. (Bayramoglu, 2004).

La solución a tratarse por medio de electrocoagulación debe presentar una mínima conductividad para que exista flujo de corriente eléctrica. La conductividad en aguas residuales que tengan una baja conductividad se la aumenta añadiendo una cantidad suficiente de sales como cloruro de sodio (NaCl) y sulfato de sodio (Na_2SO_4), de esta manera se aumentara la conductividad de la solución. Por otra parte el consumo de energía disminuirá con una solución que sea muy conductiva. (Merzouk, 2010).

2.3.4.2. ARREGLO DE ELECTRODOS

El material de los electrodos y su modo de conexión, tienen un papel significativo en el análisis de costo de un proceso de electrocoagulación. (Koyba, 2010). Existen tres modos diferentes de conexión de electrodos que se indican en la figura.

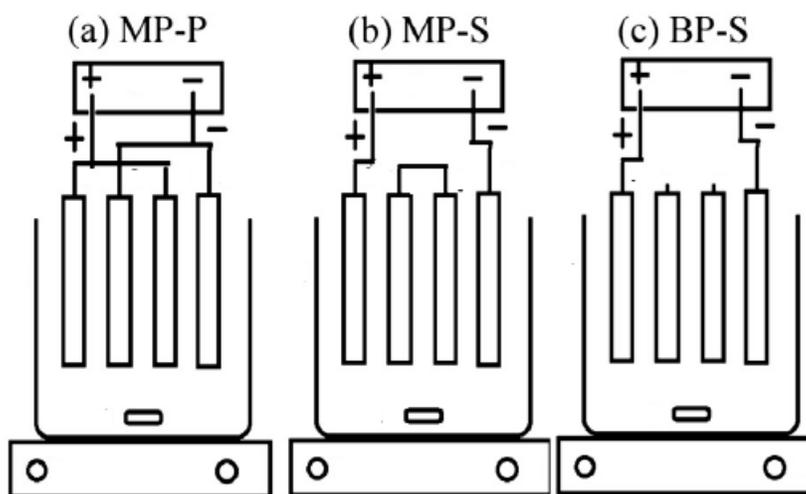


Figura 3. Diferentes Modos de Conexión Electroodos.

Fuente: (Khandegar, 2013)

Conexión en paralelo de electrodos monopolares (MP-P): Los ánodos y cátodos están conectados en paralelo debido a que la corriente se divide entre todos los electrodos a la resistencia de las células individuales. La conexión en

paralelo necesita una diferencia de potencial más bajo en comparación con las conexiones serie.

Conexión en serie de electrodos monopolares (MP-S): En los electrodos monopolares en conexión en serie, cada par de electrodos está conectado internamente entre sí. La adición de las tensiones de las células conduce a una diferencia de potencial más alto para una corriente dada.

Conexión en serie de electrodos bipolares (BP-S): En este modo de conexión, los electrodos exteriores están conectados a la fuente de energía, y no existe una conexión eléctrica entre los electrodos internos.

La conexión MP-P es la conexión más efectiva para electrodos ya sean de aluminio o de hierro. (Koyba, 2011).

La 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. (Restrepo et al., 2006).

2.3.4.3. FORMA DE LOS ELECTRODOS

La forma de los electrodos afecta la eficiencia de remoción del contaminante en un proceso de electrocoagulación. Se espera que electrodos perforados den como resultado una mejor eficiencia en la remoción comparados con electrodos planos. (Kuroda, 2013).

2.3.4.4. TIPO DE FUENTE DE ALIMENTACIÓN

En el proceso de electrocoagulación, hay una generación in situ de los iones de hidróxido de metal por oxidación electrolítica del ánodo de sacrificio. Estos iones de hidróxido de metal actúan como coagulante y ayuda a eliminar los contaminantes de la solución por sedimentación. La mayoría de los estudios informaron haber usado la corriente directa (DC) en el proceso de electrocoagulación. El uso de DC conduce a la formación de corrosión en el ánodo debido a la oxidación. Una capa de oxidación formada también en el cátodo, reduce el flujo de corriente entre el cátodo y el ánodo, y por lo tanto la reducción de la eficiencia de eliminación de contaminantes. (Khandegar, 2013).

Las investigaciones de los efectos de la corriente alterna (AC) y directa (DC) en la remoción de cadmio (Cd) de agua residual usando aluminio en el ánodo y cátodo respectivamente, se obtuvo una eficiencia de remoción del 97.5% y 96.2% con una densidad de corriente de 0.2 A/dm³ usando AC y DC respectivamente. Estos resultados indican que el problema de la formación de la corrosión en los electrodos se la puede reducir usando AC en lugar de DC en el proceso de electrocoagulación. (Vasudevan, 2011).

2.3.4.5. pH DE LA SOLUCIÓN

El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido. Durante el proceso, el pH, 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; a su vez, y dependiendo de la naturaleza del contaminante. Algunas aguas residuales presentan mejor eficiencia en la remoción de sus contaminantes al aplicar la electrocoagulación a pH básicos, y otras, a pH ácidos. (Arango, 2012).

La mayor eficiencia en la remoción de un contaminante se da dentro de un rango específico de pH, dependiendo del contaminante y solución a tratar. En términos generales, las mejores remociones se han obtenido para valores de pH cercanos a 7; en las aguas de la industria textil las mejores remociones de turbiedad y DQO se dan a pH entre 7 y 9. (Arango, 2012).

El pH de la solución es un parámetro importante en el proceso de electrocoagulación. La eficiencia máxima de remoción de contaminantes se obtiene a un pH de solución óptimo, pues la precipitación de un contaminante comienza a un pH particular. El aumento o reducción del pH de la solución desde un valor de pH óptimo disminuye la eficiencia de la eliminación de contaminantes. (Khandegar, 2013).

2.3.4.6. DENSIDAD DE CORRIENTE

La densidad de corriente es un parámetro muy importante en la electrocoagulación, ya que determina la tasa de dosis de coagulante, la tasa de producción de burbujas, el tamaño y el crecimiento de los flóculos, lo que puede afectar la eficiencia de la electrocoagulación. Con un aumento en la densidad de corriente, el ánodo aumenta la velocidad de disolución. Esto conduce a un aumento en el número de flóculos de hidróxido de metal y como resultado se incrementa la eficiencia de eliminación de los contaminantes. (Khandegar, 2013).

2.3.4.7. DISTANCIA ENTRE LOS ELECTRODOS

La distancia entre electrodos juega un papel significativo en el campo de electrocoagulación. La máxima eficiencia de eliminación de contaminantes se obtiene a una apropiada distancia entre los electrodos. En la distancia mínima entre los electrodos que es de 8mm, la eficiencia de remoción de contaminantes es baja. Esto es debido al hecho de que los flóculos de hidróxidos de metal se generan en menor cantidad y en consecuencia la remoción del contaminante por sedimentación va a ser también menor. (Daneshvar, 2004).

Los aumentos de la eficiencia de eliminación de contaminantes se producen con un aumento en la distancia entre electrodos desde el mínimo hasta la distancia óptima entre los electrodos. Esto es debido a que al aumentar la distancia entre los electrodos, hay una disminución de los efectos electrostáticos resultando en un movimiento más lento de los iones generados, lo que proporciona más tiempo para aglomerarse y formar más flóculos. Esto a su vez causa un aumento en la eficiencia de eliminación del contaminante desde la fase acuosa. Al aumentar la distancia de los electrodos sobre la distancia óptima, hay una reducción en la eficiencia de eliminación de contaminantes. (Khandegar V. S., 2013).

Esto es debido a que el tiempo de viaje de los iones aumenta lo que conduce a una disminución de la atracción electrostática, resultando en una menor formación de flóculos para coagular el contaminante. (Khandegar V. S., 2013).

2.3.4.8. VELOCIDAD DE AGITACIÓN

La agitación ayuda a mantener condiciones homogéneas en el agua residual y evita la formación de concentrados en la célula de electrólisis. Además, la agitación en la célula de electrólisis imparte velocidad para el movimiento de los iones generados. Con un aumento de la velocidad de agitación hasta la velocidad óptima de agitación, hay un aumento en la eficiencia de eliminación de contaminantes. Esto es debido al hecho de que con un aumento de la movilidad de los iones generados, los flóculos se forman mucho más rápido, lo que resulta en un aumento en la eficiencia de eliminación de contaminantes para un tiempo de electrólisis en particular. Pero con un aumento de la velocidad de agitación por arriba del valor óptimo, hay una disminución en la eficiencia de eliminación de contaminantes porque los flóculos son degradados por colisión de unos con otros. (Modirshahla, 2008)

2.3.4.9. TIEMPO DE ELECTRÓLISIS

La eficiencia de eliminación de contaminantes es también una función del tiempo de electrólisis, con un aumento en el tiempo se aumenta la eficiencia de la remoción de contaminantes. El hidróxido de metal está formado por la disolución del ánodo. Para una densidad de corriente fija, el número de hidróxido de metal generado aumenta con el aumento del tiempo de electrólisis. A mayor tiempo, ocurre un aumento, originando un aumento en la eficiencia de eliminación de contaminantes. Para un tiempo de electrólisis más allá del tiempo óptimo, la eficiencia de eliminación de contaminantes no aumenta. (Khandegar, 2013).

2.3.5. TIPOS DE REACTORES EN LA ELECTROCOAGULACIÓN

En comparación con un reactor químico convencional, el reactor electroquímico (o celda electroquímica) difiere desde el punto de vista de su concepción, ya que en éste, la transferencia de carga, los procesos químicos derivados y la transferencia de materia, juegan un papel fundamental.

Existen muchos tipos de celdas electroquímicas empleadas en el proceso de electrocoagulación, y se clasifican de acuerdo a diferentes criterios:

- Dirección del flujo de agua residual
- Modo de circulación
- Tipo de conexión electródica
- Finalidad de la celda: Laboratorio o aplicación industrial.

De esta forma, en función de la dirección del flujo en la celda, los reactores se clasifican en unidades de flujo horizontal y vertical. Esta disposición puede tener importancia cuando se pretende aprovechar el movimiento provocado por el oxígeno y el hidrógeno generados en los procesos anódicos y catódicos de oxidación y reducción del agua, respectivamente. En función del modo de circulación del agua a tratarse entre los electrodos, se pueden encontrar celdas

de canales múltiples o bien de un sólo canal. La ventaja de las celdas de canales múltiples se encuentra en la sencillez de su disposición. Sin embargo debido al pequeño caudal de electrolito en cada uno de los canales, esta disposición puede favorecer el fenómeno de pasivación de los electrodos. (Martinez, 2007).

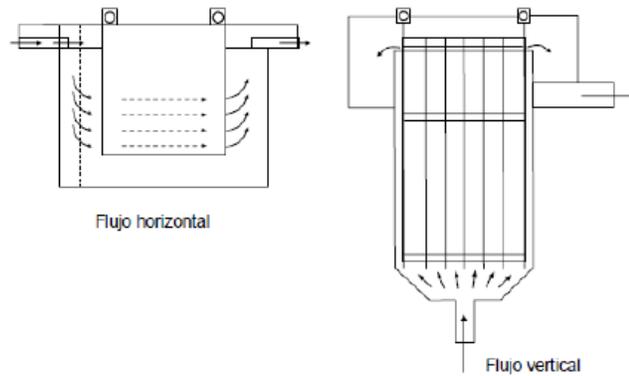


Figura 4: Unidades de Electrocoagulación de flujos horizontal y vertical.

Fuente: (Martinez, 2007)

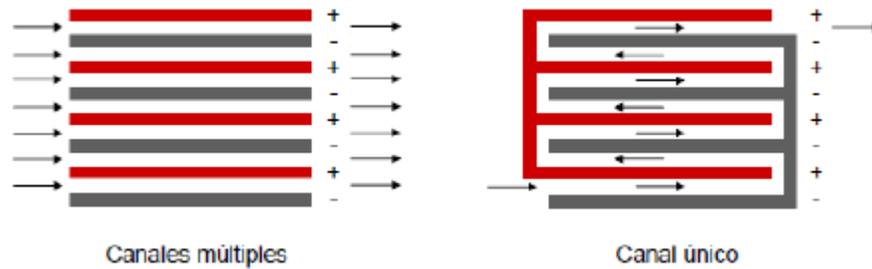


Figura 5: Unidades de electrocoagulación con disposición de canales múltiples y de canal único.

Fuente: (Martinez, 2007)

2.3.5.1. MODOS DE OPERACIÓN (EN LOTES Y CONTINUO)

Un sistema continuo opera bajo condiciones de estado estacionario, con concentraciones de contaminantes y caudales de influentes y efluentes fijos. Por el contrario, la naturaleza dinámica de un reactor discontinuo o en lotes permite estudiar la gama de condiciones de funcionamiento y es más adecuado para el trabajo de investigación. Los sistemas continuos son más adecuados para procesos industriales grandes volúmenes de influentes y efluentes mientras que los reactores discontinuos son adecuados para aplicaciones de laboratorio y escala de planta piloto. Se prefiere el modo continuo de operación debido a su mejor control que el modo por lotes de operación. (Khandegar, 2013).

En lotes el reactor de electrocoagulación exhibe un comportamiento dependiente del tiempo, ya que el coagulante se genera continuamente en el reactor con la disolución del ánodo. El material del ánodo es hidrolizado, y éste es capaz de agregar a los contaminantes. Como resultado, la concentración del contaminante, coagulante, y el pH se va modificando con respecto al tiempo. Un reactor discontinuo o en lotes no tiene ni entrada o salida de efluente durante el tiempo de electrólisis.

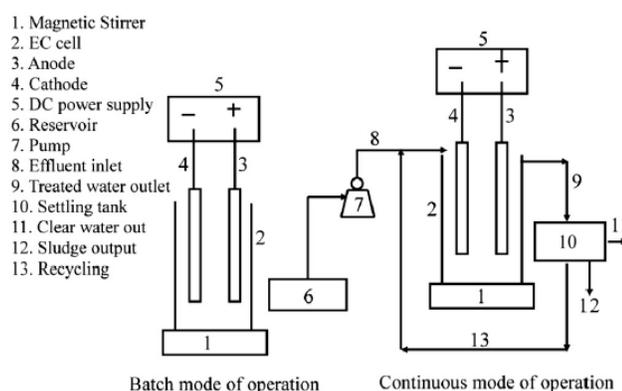


Figura 6: Diagrama esquemático del modo de operación de un sistema batch y continuo

Fuente: (Khandegar, 2013).

2.3.6. VENTAJAS

- La electrocoagulación no requiere la adición de productos químicos y proporciona mejores capacidades de eliminación de la misma especie que la coagulación química.
- La electrocoagulación elimina muchas especies que la coagulación química no puede quitar.
- Electrocoagulación produce menos lodos, reduciendo así el coste de eliminación de lodos.
- La electrocoagulación es más fácilmente filtrable y se puede utilizar como un aditivo para el suelo.
- Lodos de electrocoagulación contiene óxidos metálicos que pasan la prueba de lixiviación.
- La electrocoagulación necesita un mínimo de tiempo de inicio, el proceso puede ser iniciado por encender el interruptor.
- Requiere de equipos simples y de fácil operación.
- Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes.

(Khandegar, 2013).

2.3.7. DESVENTAJAS

- Los ánodos de sacrificio necesitan ser reemplazados periódicamente.
- La electrocoagulación requiere una solución con una conductividad mínima dependiendo del diseño del reactor, lo que limita su uso con el efluente que contiene sólidos disueltos bajos.
- En el caso de la eliminación de compuestos orgánicos, de efluente que contiene cloruros existe la posibilidad de formación de compuestos orgánicos clorados tóxicos.
- Un filtro impermeable al óxido puede estar formado en el cátodo que puede proporcionar resistencia al flujo de la corriente eléctrica. Sin embargo, cambiar la

polaridad y la limpieza periódica de los electrodos pueden reducir esta interferencia.

- El alto coste de la electricidad puede resultar en un aumento en los costos de operación de electrocoagulación.

(Khandegar, 2013).

2.3.8. COMPARACIÓN CON OTROS MÉTODOS

Según estudios realizados por la empresa Global Water Systems, 2005. Una ventaja que presenta el tratamiento de electrocoagulación, es el tiempo necesario para la depuración de las aguas. Requiriendo de 5 a 30 minutos aproximadamente para efectuar este proceso, que en comparación a otros van de 4 a 10 horas en tratamientos químicos, y de 3 a 5 días en tratamientos biológicos, dependiendo del volumen de agua a tratar.

La implementación de un proceso químico o biológico para la depuración de aguas requiere de una gran superficie lo que supone grandes obras civiles. Sin embargo, la implementación de un proceso de electrocoagulación requiere de 50-60 % de superficie de un proceso químico o biológico, ya que son unidades compactas.

A nivel nacional, las empresas que han implementado el tratamiento biológico así como químico para depuración de aguas residuales, están obligados a importar inóculos y químicos respectivamente. El tratamiento por electrocoagulación, al no necesitar la importación de ningún insumo o cualquier otro material para la implementación de este proceso coopera con la nueva matriz productiva del país.

En cuanto a costos de inversión, los procesos de electrocoagulación y biológicos requieren una inversión relativamente alta para su equipamiento, sin embargo la inversión para tratamiento por electrocoagulación representa la mitad

de la inversión de un proceso biológico. Además, comparando el tratamiento por electrocoagulación con la implementación de un tratamiento químico la inversión se reduciría a un 70 – 80% del último.

Se observa en la Tabla 1. los porcentajes de remoción que se tiene de distintos parámetros en el tratamiento de agua residual, comparando el proceso de electrocoagulación con otro, ya sea físico-químico, coagulación, ozonización o biológico. Donde es apreciable que el proceso de electrocoagulación tiene los porcentajes de remoción más altos para el parámetro de remoción estudiado.

Tabla 1.

Comparación de Electrocoagulación con otros métodos

EFLUENTE	PARAMETRO DE REMOCION	PORCENTAJE DE REMOCION (%)	
Textil (Khandegar, 2013)	Color	ELECTROCOAGULACION	97
		FISICOQUIMICO	94
Solución sintética de tintura. (El-Ashtoukhy,2010)	Tinte Naranja II	ELECTROCOAGULACION	98
		COAGULACION	53
Solución sintética de tintura.(Song,2008)	Reactivo Azul 19	ELECTROCOAGULACION	96
		OZONIZACION	10

Fuente: (Khandegar, 2013).

En la Tabla 2, se especifica los valores comúnmente encontrados de los parámetros característicos del agua de los distintos procesos textiles. Además, se especifica en la última columna los valores máximos permisibles de descarga

de cada parámetro del agua al alcantarillado según las normas ambientales. (TULSMA, 2013).

Tabla 2.

Características del agua residual de la industria textil

PARÁMETRO	FREGADO	BLANQUEADO	TINTURADO	COMPUESTO	LIMITE PARA DESCARGA EN ALCANTARILLADO
pH	10-12	8.5-11	9-11	8-10	5-9
STD(mg/L)	12.000- 30.000	2500- 11.000	1500-4000	5000-10.000	1600
STS(mg/L)	1000- 2000	200-400	50-350	100-700	220
DBO(mg/L)	2500- 3500	100-500	100-400	50-550	250
DQO(mg/L)	10.000- 20.000	1200-1600	400-1400	250-8000	500
COLOR	-	-	Fuertemente Coloreada	Fuertemente Coloreada	

Fuente: (Khandegar, 2013).

2.4. ANÁLISIS DE COSTO

El análisis de costo juega un papel importante en la selección de la técnica de tratamiento de aguas residuales a aplicar. El proceso debe ser eficiente en la remoción de contaminantes pero a costos rentables. Los costos del proceso de electrocoagulación incluyen el costo del consumo de energía, el costo del

electrodo que se disuelve y el costo de la adición de cualquier producto químico externo (para aumentar la conductividad de la solución o variar el pH de la solución).

El costo de operación de un proceso de electrocoagulación se basa en los costos de los electrodos y de la energía eléctrica. Los costos de operación están expresados en la siguiente fórmula (Ozyonar, 2010):

$$\text{Costos de operacion} = X * \text{Energia}_{\text{Consumo}} + Y * \text{Electrodo}_{\text{Desgaste}}$$

2.5. DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA CAD

Es un software o herramienta computacional que nos permite crear representaciones gráficas 2D o 3D de objetos, con dimensiones reales o a escala.

Esta herramienta tiene diversas aplicaciones, pero en el diseño industrial y de productos, este software permite la creación gráfica de modelos y/o componentes. En ingeniería nos facilita el dibujo de bosquejos para prototipos, con la creación de ensamblajes dentro del programa se puede analizar interactiva y dinámicamente para llegar al diseño final óptimo para la manufactura de los productos.

Gracias a este software el diseñador reduce tiempo y costos en el desarrollo de productos, mejorando la calidad gracias a la gran exactitud y mejor visualización del producto final.

2.6. INGENIERIA ASISTIDA POR COMPUTADORA CAE

Herramienta que permite a los diseñadores analizar sus productos frente a diversas condiciones para los que son diseñados.

Entre las prestaciones que ofrece la simulación de los objetos, están:

- Análisis estructural, térmico y de vibraciones

- Análisis y documentación de tolerancias geométricas
- Mejora de los procesos de verificación y validación del diseño de productos
 - Rendimiento de fatiga
 - Simulación cinemática

Al evaluar el rendimiento de los diseños en condiciones reales, se facilita la modificación de los modelos, cambio de materiales, y evaluación de alternativas de diseños para la reducir costos en manufactura, además de tiempo de desarrollo.

2.7. INSTRUMENTACION MECATRONICA

La instrumentación constituye uno de los aspectos más importantes y destacados de la ingeniería, gracias a que ha sobrepasado los límites dentro de los cuales tradicionalmente se ha desarrollado, pues ahora además de hablar de instrumentación en mecánica, electrónica, Mecatrónica, civil, etc. se habla de instrumentación en física, astronomía, medicina, biología y hasta sociología. Los objetivos de la instrumentación son: (Echeverria, 20XX)

- Proporcionar conocimiento de los Instrumentos (sensores y actuadores) de manera general (característica estática y dinámica).
- Proporcionar conocimiento sobre los Instrumentos en forma particular.
- Proporcionar conocimientos sobre las aplicaciones, normas, usos e instalación de los instrumentos.

2.7.1. SENSORES

Son dispositivos que convierten una señal física, ya sea mecánica, óptica, etc.; en algún tipo de señal eléctrica como corriente, voltaje, frecuencia o resistencia, la cual contiene toda la información de la primera señal.

A los sensores se los puede clasificar por su señal de salida, como se detalla a continuación:

Sensores analógicos: Los sensores analógicos proporcionan una señal analógica continua, ya sea voltaje, corriente o frecuencia, esta señal puede ser tomada como el valor de la variable física que se mide. El sensor analógico debe poseer ciertas propiedades indispensables como: calibración, rango de funcionamiento, confiabilidad, velocidad de respuesta, y precisión. Con el fin de que el control de la variable que se mida, se lleve a cabo de la mejor manera. (Chaves, 2008).

Sensores Digitales: Los sensores digitales proporcionan señal de uno "1" lógico si detectan un parámetro de medida como puede ser presencia de un objeto, o un cero "0" lógico si no detectan dicho parámetro, siendo esta información originada por presencia o ausencia de voltaje. Estos sensores pueden trabajar con señales de voltaje alterno o directo. (Zapata et al., 2014).

La presentación de la información de un sensor digital, en los sistemas de medida y control, ofrecen directamente la salida de una señal digital, es decir, simplifican el acondicionamiento de señales e inmunidad a las interferencias electromagnéticas en determinados casos. (Echeverria, 20XX)

Para la selección de un sensor hay que tener en cuenta los siguientes criterios:

- Magnitud a medir: Rango, resolución, exactitud, estabilidad, ancho de banda, tiempo de respuesta.
- Características de salida: sensibilidad, tensión de corriente, forma de señal, impedancia, destino.
- Características de alimentación: tensión, corriente, potencia, frecuencia, estabilidad

- Características ambientales: temperatura, humedad, ruido eléctrico, ruido mecánico, agentes químicos, atmosfera explosiva.
- Otros factores: peso, dimensiones, vida media, costo de adquisición, disponibilidad, tiempo de instalación, longitud y necesidad de cables, costo de mantenimiento y calibración.

2.7.1.1. SENSOR DE CONDUCTIVIDAD

El sensor de conductividad mide la capacidad de una sustancia para conducir corriente eléctrica. Una sonda de conductividad mide la conductancia, definido como el recíproco de la resistencia eléctrica. La unidad de medida de la conductancia es el Siemens, pero para muestras acuosas, comúnmente la medida se registra en micro-Siemens o mili-Siemens. (Vernier, 2015)

Las sustancias no disueltas o materiales que se precipiten lentamente en la muestra, como sustancias orgánicas, biológicas o materiales de la corrosión de los electrodos pueden ensuciar la superficie de los electrodos causando lecturas inestables o erróneas. (Sensores, 2015)

2.7.1.2. SENSOR DE pH

Todas las reacciones biológicas y un gran número de las efectuadas en laboratorio se realizan en un medio acuoso. Una sustancia en dilución acuosa se disocia en fragmentos menores (iones) y se establece en equilibrio. (Sienko et al., 1975).

Un sensor de pH mide la alcalinidad de una sustancia, es decir, indica la concentración de iones de hidronio. Todas las soluciones neutras tienen un valor de pH de 7, incluyendo el agua pura, mientras que las ácidas poseen valores de pH menores a 7, al contrario de las básicas con valores de pH mayores a 7.

El funcionamiento de un electrodo de pH, es midiendo el potencial generado por un electrodo, este potencial se lo compara con un valor de referencia que genera un potencial constante e independiente del pH.

Existen varios criterios para la clasificación de los electrodos de pH, en la Tabla 3 se detallan algunos de estos electrodos. (Ciganda, 2004)

Tabla 3.

Clasificación Electrodo de pH

Según Membrana de Vidrio	Según el Cuerpo	Según la Sustancia de relleno
<p>Vidrio Propósito general: Varios rangos de pH y hasta 100 °C.</p> <p>Vidrio Azul: Valores de 0 a 13 pH y hasta 110°C.</p> <p>Vidrio Ambar: Valores de 0 a 14pH y hasta 110 °C.</p>	<p>Cuerpo de Epoxy: Resistentes a golpes, no para temperaturas elevadas.</p> <p>Cuerpo de Vidrio: Resisten altas temperaturas y para sustancias corrosivas.</p>	<p>Recargables: Se puede rellenar la cavidad para la solución de referencia.</p> <p>Sellados: Resistentes y no requieren mucho mantenimiento.</p>

2.7.1.3. SENSOR DE NIVEL

El Sensor de nivel es un dispositivo electrónico que mide la altura del material, generalmente líquido, dentro de un tanque u otro recipiente. Los sensores de nivel se utilizan para marcar una altura de un líquido en un determinado nivel preestablecido. Generalmente, este tipo de sensor funciona como alarma, indicando un sobre llenado cuando el nivel establecido ha sido logrado, o al contrario alarma para nivel bajo. Los sensores de nivel continuos son más sofisticados y pueden realizar el seguimiento del nivel de todo un sistema. Estos miden el nivel del fluido dentro de un rango especificado, en lugar de en un único

punto, produciendo una salida analógica que se correlaciona directamente con el nivel en el recipiente. Para crear un sistema de gestión de nivel, la señal de salida está vinculada a un bucle de control de proceso y a un indicador visual. (Omega, 2015).

2.7.1.4. FINALES DE CARRERA

Los interruptores de final de carrera son dispositivos electromecánicos que constan de un accionador vinculado mecánicamente a un conjunto de contactos. Cuando un objeto entra en contacto con el accionador, el dispositivo opera los contactos para cerrar o abrir una conexión eléctrica. Los interruptores de final de carrera funcionan en distintas aplicaciones y ambientes debido a su resistencia, operación simple, fácil instalación y funcionamiento confiable. (ABB, 2015)

2.8. ACTUADORES ELECTRICOS

Son dispositivos encargados de efectuar acciones físicas ordenadas por algún sistema de control. Esta acción física puede ser un movimiento lineal o uno circular.

Los actuadores, pueden clasificarse en tres grupos:

- Actuadores Neumáticos: Usan la fuerza neumática como fuente de movimiento.
- Actuadores Hidráulicos: Utilizan la fuerza hidráulica como fuerza de movimiento.
- Actuadores Eléctricos: Usan la fuerza motriz eléctrica, dentro de este grupo están los motores eléctricos y los solenoides.

2.8.1. MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA

El motor de DC, es una máquina que convierte la energía eléctrica en mecánica, es una de las maquinas más versátiles dentro de la industria, por la gran variedad de aplicaciones que se tienen. Su fácil control de posición, par y

velocidad, la han convertido en una de las mejores opciones en aplicaciones de control y automatización de procesos.

La desventaja de los motores DC, es su alta velocidad de giro (entre 2000 y 7000 rpm) y su bajo torque. El problema del torque y la velocidad se soluciona empleando cajas reductoras, que consiste en un sistema de engranajes conectados al eje del motor y que permiten disminuir la velocidad de giro y aumentar el torque del motor. Muchos motores ya vienen con su caja reductora instalada y son conocidos como motoredutores.

2.8.2. BOMBAS HIDRAÚLICAS

Una bomba es un elemento mecánico que ayuda a impulsar energía a un fluido. Un eje rotatorio es el que inyecta la energía cinética al fluido, haciendo que este se desplace o ejerza presión. Este eje puede estar acoplado a un motor eléctrico o algún otro mecanismo que genera la energía cinética. (Mott, 2006).

Las bombas se las clasifica comúnmente como de desplazamiento positivo o cinéticas. En la Figura 7 se observa varios tipos de cada una de las bombas antes mencionadas. Existe un tipo especial de bomba cinética centrífuga que es de chorro o eyectora.

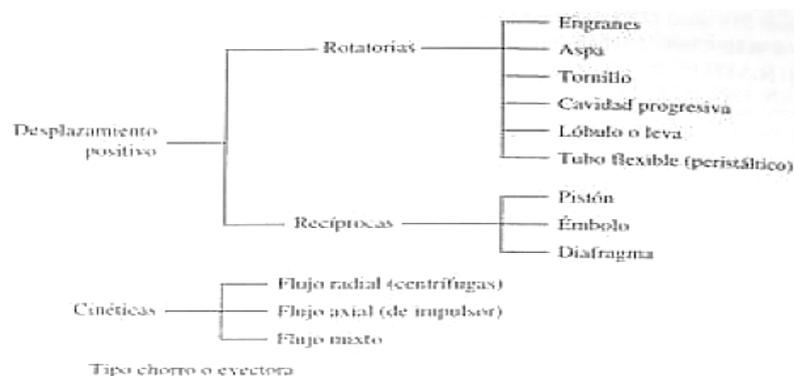


Figura 7. Clasificación de los tipos de bombas

Fuente: (Mott, 2006).

2.8.2.1. BOMBA DE ENGRANES

Es la más común de las bombas. Consta de una carcasa dentro de la cual están dos engranes que giran en sentido contrario a cada uno y los cuales están muy ajustados el uno con el otro. La succión sucede desde la zona donde se recoge el líquido que es conducido por los espacios entre los dientes hacia el puerto de descarga con alta presión. El flujo de entrega varía con el tamaño de los engranes y la velocidad de rotación. (Mott, 2006).

2.9. MICROCONTROLADORES

Los microcontroladores son circuitos integrados programables, estos dispositivos electrónicos pueden ser fácilmente programados para llevar a cabo diversas tareas. Estos dispositivos contienen: un CPU, puertos paralelos de entrada y salida, timers, contadores, memorias, conversores análogos digitales, puerto serial, y más componentes integrados en un solo chip. Esta característica lo hace un componente versátil y con una amplia gama de aplicaciones que ha dado lugar a diferentes tipos de microcontroladores que se adaptan a cada aplicación.

2.9.1. TIPOS DE MICROCONTROLADORES

Existen distintos tipos de microcontroladores, que de acuerdo a la resolución del convertidor, o a los periféricos incluidos, o con especialidades concretas. Según el número de bits que maneja se dividen en 4, 8, 16 o 32 bits.

El tipo de microcontrolador a elegir se lo selecciona de acuerdo a la aplicación que se le va a dar, con las características óptimas para el trabajo y considerando además del coste del mismo. Los micros de 32 bits se los utiliza para aplicaciones complejas como procesamiento de imágenes, comunicaciones, aplicaciones militares, etc.

Entre algunas de las familias más comunes de fabricantes de microcontroladores, están:

- Atmel (AVR)
- Hitachi (H8)
- Intel de 8 bits (8XC42, MCS51, 8xC251), o de 16 bits (MCS96, MXS296)
- National Semiconductor (COP8)
- Microchip (PIC)
- Motorola de 8 bits (68HC05, 68HC08, 68HC11), o de 16 bits (68HC12, 68HC16), o de 32 bits (683xx)
- Texas Instruments (TMS370)

2.10. INTERFACES GRAFICAS

2.10.1. INTERFAZ HUMANO MAQUINA (HMI)

La HMI es el punto en el que los seres humanos y computadores se ponen en contacto, transmitiéndose mutuamente tanta información, órdenes y datos como sensaciones, e intuiciones. En muchos casos la interfaz se convierte en una barrera debido a un diseño pobre y una escasa atención a los detalles de la tarea a realizar. (Rodríguez, 20XX).

Una interfaz bien diseñada, encuentra la respuesta a su acción, esta interfaz humano maquina busca en primer lugar obtener el estado del proceso de un vistazo. El objetivo es:

- Captar la situación de manera rápida.
- Crear condiciones para la toma de decisiones correctas.
- Que los equipos se utilicen en forma óptima y segura.
- Garantiza la confiabilidad al máximo.

Un buen diseño de una interfaz complementa tanto la funcionalidad con lo estético y está basado en conocimientos sobre la percepción humana. Existen reglas de fácil aplicación, estándares y guías de estilo que facilitan el diseño de

interfaces y además facilitan el aprendizaje reduciendo los errores al permitir que el usuario aproveche conocimientos adquiridos en otros equipos. (Rodríguez, 20XX).

2.10.2. TIPOS DE HMI

Los siguientes tipos de interfaz de usuario son los más comunes:

- Las interfaces graficas de usuarios (GUI) aceptan la entrada a través de un dispositivo como el teclado y ratón de la computadora, y proporcionan una salida gráfica en la pantalla del ordenador.
- Interfaces basadas en Web de usuario (IUF), son una sub clase de las interfaces gráficas de usuario que aceptan una entrada y proporcionan una salida mediante páginas web que se transmiten a través del internet.
- Pantallas táctiles son dispositivos que aceptan una entrada a través del tacto de los dedos o lápiz. Se utiliza en una amplia cantidad de dispositivos móviles, en procesos industriales, maquinas, etc.

2.10.3. SOFTWARE PARA PROGRAMACION HMI

Un software para la programación de una pantalla táctil es Workshop 4, es un software completo para Microsoft que proporciona una plataforma de desarrollo de pantallas táctiles de la familia 4D Systems.

Workshop4 incluye cuatro entornos de desarrollo, para que el usuario elija en que entorno trabajar tomando en cuenta los requisitos de su aplicación o por la habilidad de programación del operador. Los entornos de desarrollo son los siguientes: (4D System, 2015)

- Designer: Este entorno permite al usuario escribir su código de programación 4DGL en su forma natural y básica para el módulo de la pantalla.
- ViSi: Este entorno también se proporciona para transformar el módulo de visualización en un módulo de pantalla de serie esclavo, lo que

permite al usuario controlar la visualización de cualquier microcontrolador o dispositivo anfitrión con un puerto serie.

- ViSi-Genie: Un entorno de avanzada que no requiere ninguna programación en absoluto 4DGL, todo se realiza automáticamente. Simplemente hay que colocar los objetos que desee en la pantalla, establecer los hechos para expulsarlos y el código está escrito de forma automática.
- Serial: Este entorno es proporcionado para transformar el módulo de visualización en un módulo de pantalla de serie esclavo, lo que permite al usuario controlar la visualización de cualquier microcontrolador o dispositivo maestro con un puerto serie.

CAPITULO 3

3. MATERIALES Y METODOLOGÍA

3.1. DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES

3.1.1. UNIDAD DE ELECTROCOAGULACIÓN

Se ha utilizado un dispositivo a escala de laboratorio, que opera en modo estacionario. Un esquema del dispositivo se muestra en la figura 8.

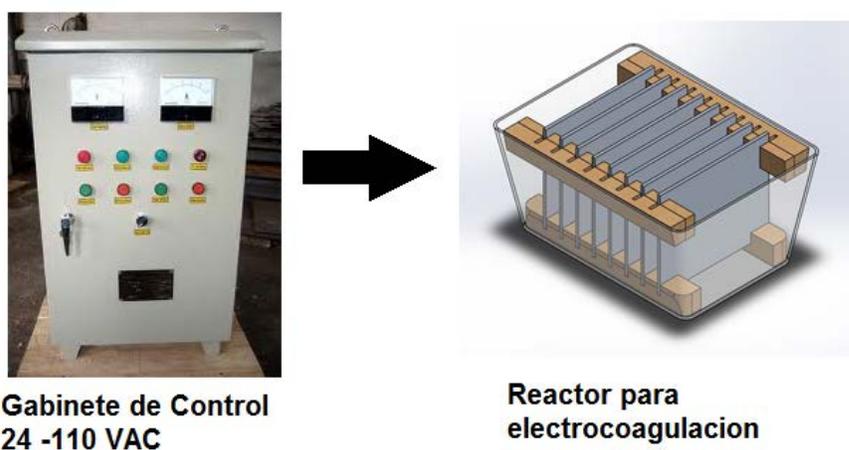


Figura 8. Equipo de electrocoagulación a escala de laboratorio

El reactor es un tanque de polietileno con volumen para 2000 cm^3 en el cual el agua residual es depositada para ser tratada y monitoreada.

Los electrodos consisten en placas de aluminio, con espesor de 3mm, que se encuentran distribuidas en forma paralela dentro del reactor. Estos electrodos son cuadrados con área geométrica de 100 cm^2 cada uno, y una distancia interelectródica de 11mm.

La corriente eléctrica es suministrada por un gabinete de control, en el cual la corriente es tomada directamente de la red pública de corriente, trabajando con voltajes de 110v y 24v; para este último voltaje se utiliza un transformador a

24v/10A. La intensidad de corriente eléctrica se monitoriza con un amperímetro análogo AC con rango de 0 a 20A.

3.2. TÉCNICAS ANALÍTICAS

3.2.1. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

MÉTODO 5220-D (Rice et al., 2012)

FUNDAMENTO

La determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) proporciona la cantidad de oxígeno requerida para oxidar bajo condiciones específicas, la materia orgánica susceptible de oxidarse contenida en una muestra de agua.

La prueba de Demanda Química de Oxígeno (DQO) se basa en la oxidación química de la materia orgánica, presente en las muestras de agua, con dicromato de potasio y ácido sulfúrico a ebullición (digestión).

La medición de DQO es realizado con un espectrofotómetro.

OBJETIVO

Determinar la Demanda Química de Oxígeno en muestra de agua residual textil recogida.

MATERIALES

- Pipetas volumétricas
- Bombas manuales para pipetas
- Espectrofotómetro
- Viales con reactivos
- Gradilla
- Termo bloque

PROCEDIMIENTO

Para determinar el valor de DQO, los viales de digestión empleados fueron un blanco y cinco diluciones del estándar, ftalato de Potasio (KHP), y seis viales de la muestra a diferentes diluciones.

- a) Preparar diluciones del estándar (KHP) para la elaboración de la curva de calibración a concentraciones de (1176, 882, 588, 294, y 143) mg/L.
- b) Agregar 2.5 ml de estas diluciones en tubos Hach por separado.
- c) Para cada vial añadir 1,5mL de la solución digestora ($K_2Cr_2O_7$) y 3,5mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4); todo este procedimiento realizarlo dentro de una cámara de flujo.
- d) Se realiza el mismo procedimiento con los viales para la muestra de agua residual con factores de dilución de 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 y 1:6.

Posteriormente los viales fueron sometidos a digestión a 150°C en un termo bloque durante 2 horas, se esperó hasta alcanzar la temperatura ambiente para evitar interferencias y se midieron las absorbancias de los diferentes viales a 600nm en el espectrofotómetro con el fin de obtener una curva de calibración y las concentraciones de O_2 de la muestra.

3.2.2. DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO_5)

MÉTODO 5210-B (Rice et al., 2012)

FUNDAMENTO

La prueba de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) es uno de los ensayos más importantes para la determinación de la concentración de materia orgánica de aguas y aguas residuales en un periodo de 5 días. Esencialmente, la DBO_5 es la medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los

microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradables, bajo condiciones aerobias.

OBJETIVOS

Determinar la cantidad de materia orgánica oxidable que se encuentran en la muestra.

MATERIALES

- Frascos ámbar
- OxiTop® IS 12
- Agitador

PROCEDIMIENTO

- a) Introducir una varilla agitadora magnética en el interior del biómetro.
- b) Añadir 43.5 mL de la muestra de agua residual como lo señala el manual del sistema de medición OxiTop® IS 12 para un rango de DQO entre 0–2000 mg/L. (Tabla 1).
- c) Colocar dos pastillas de NaOH en la cápsula.
- d) Cerrar el biómetro con el tapón-registrador correspondiente, y colocar el equipo en cero.
- e) Ubicar el biómetro en un agitador magnético a temperatura ambiente (25°C), para mantener la mezcla constante.

Esta prueba se realizó durante 5 días sin interrupciones, con agitación constante. Transcurridos los 5 días se registró los datos arrojados por el equipo, y se realizaron la correcciones pertinentes según el manual del sistema OxiTop® IS 12. Tabla 4.

Tabla 4.

Volumen de muestra para el análisis OxiTop de DBO de acuerdo a los valores de DQO

<i>Sample volume (ml)</i>	<i>Measuring range (mg/l)</i>	<i>Factor</i>
432	0 - 40	1
365	0 - 80	2
250	0 - 200	5
164	0 - 400	10
97	0 - 800	20
43.5	0 - 2000	50

Fuente: WTW, Instruction Manual. Operation of the Single Measuring System, OxiTop

3.2.3. MEDIDA DE POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH)

MÉTODO 4500-HB (Rice et al., 2012)

FUNDAMENTO

El principio básico de la determinación electrométrica del pH es la medida de actividad de los iones de hidrogeno por mediciones potenciométricas utilizando un electrodo patrón de hidrogeno y otro de referencia.

OBJETIVOS

Determinar la medida de pH de la muestra de agua residual textil.

MATERIALES

- Potenciómetro
- Vaso de precipitación

PROCEDIMIENTO

- a) Previamente a cada medida, el pH-metro es calibrado con disoluciones estándar.
- b) Se introduce el electrodo dentro de la muestra para su respectiva medida.
- c) Se espera unos segundos para dar lectura a la medida, y se registra.
- d) Se limpia el electrodo con agua destilada.

3.2.4. MEDIDA DE CONDUCTIVIDAD

MÉTODO 2510-B (Rice et al., 2012)

FUNDAMENTO

La conductividad eléctrica hace referencia a la capacidad de una solución para conducir corriente eléctrica. Esta medida indica la concentración total de componentes ionizados en las distintas soluciones. La conductividad eléctrica es proporcional al contenido de sales disueltas y por tanto, está directamente relacionada con la suma de cationes o aniones que se determinen químicamente y en general, presenta una estrecha correlación con los sólidos totales disueltos. Las medidas varían dependiendo de la temperatura, por lo que se estandariza a 25°C.

OBJETIVO

Determinar la medida de conductividad eléctrica de la muestra de agua residual textil.

MATERIALES

- Conductímetro

PROCEDIMIENTO

- a) Calibrar el aparato con los patrones estándar.
- b) Agitar la muestra hasta homogeneizar.
- c) Tomar lectura del resultado.
- d) Lavar el sensor con agua destilada.

3.2.5. MEDIDAD DE TURBIDEZ

METODO 2130-B (Rice et al., 2012)

FUNDAMENTO

La prueba de turbidez es la expresión de la propiedad óptica de la muestra que causa que los rayos de luz sean dispersados y absorbidos en lugar de ser transmitidos en línea recta a través de la muestra. La turbiedad en el agua puede ser causada por la presencia de partículas suspendidas y disueltas de gases, líquidos y sólidos tanto orgánicos como inorgánicos, con un ámbito de tamaños desde el coloidal hasta partículas macroscópicas, dependiendo del grado de turbulencia.

OBJETIVOS

Determinar los valores de turbidez de las muestras de agua.

MATERIALES

- Tubos de ensayos
- Turbidímetro Martini Mi415

PROCEDIMIENTO

a. Revisa y verifica que el Turbidímetro, se encuentre en buen estado y con todos sus elementos anexos presentes;

c. Procede a verter el líquido en los dos o más tubos de ensayo (las muestras y el blanco), tomando como medida de requisito, 10mL del tubo de ensayo.

d. Posteriormente, el blanco (agua destilada) se introduce en la parte superior del equipo, para ser tapado en su totalidad y de esta manera calibrar el colorímetro; se presiona el icono cero y luego de unos segundos el instrumento mostrara en su pantalla la lectura.

e. Tomar la muestra a analizar, para tajarla y agitarla aproximadamente por unos 30 segundos, homogenizando uniformemente la sustancia.

f. Continuando con la limpieza de los tubos de ensayo con papel toalla o se lavan con agua destilada para eliminar las posibles huellas o marcas, que puedan afectar la medición o lectura.

g. Colocar el tubo de ensayo de la muestra en el equipo, lo tapa y procede a tomar su lectura.

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Tabla 5.

Lecturas de Turbidez

Turbidity Range <i>NTU</i>	Report to the Nearest NTU
0-1.0	0.05
1-10	0.1
10-40	1
40-100	5
100-400	10
400-1000	50
>1000	100

Fuente: (Rice et al., 2012)

Al comparar la eficiencia de tratamiento de agua, no estimar la turbidez más de cerca de lo especificado anteriormente. Las incertidumbres y discrepancias en las mediciones de turbidez, es poco probable que los resultados puedan ser duplicados a una mayor precisión a la especificada.

3.3. PRODUCTOS UTILIZADOS

3.3.1. AGUA RESIDUAL TEXTIL

En la coloración de fibras celulósicas, los tintes tina (incluye índigo) y tintes sulfurosos representan una gran parte del mercado mundial, alrededor del 31% del cual el índigo ocupa un 7%, representando cerca de las 120.000 toneladas de tintes tina usadas anualmente en el mundo. (Roessler, 2002).

El tratamiento del agua residual textil con contenido de tintes y específicamente con tinte índigo es uno de los más difíciles porque el tinte es de origen sintético y tiene una estructura molecular aromática compleja, la cual es más estable y más difícil de biodegradar. (Kim et al., 2009)

A continuación se indica los parámetros del agua a tratar en el prototipo de electrocoagulación Bach.

Tabla 6.

Caracterización del agua residual textil a tratar y límites permisibles según norma ambiental para descargas en alcantarillado público

PARÁMETROS	UNIDADES	VALORES	VALOR MÁXIMO PERMISIBLE
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/l	800	250
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	3484.62	500
Potencial de Hidrogeno	pH	9.84	5-9

CONTINUA 

Conductividad	mS/cm	4.8	Sin Especificar
Solidos Totales	mg/l	Sin medición	1600
Solidos Suspendidos	mg/l	485	220
Solidos Sedimentables	mg/l	0	20
Color Real	Unidades de Color	3415	100
Turbidez	FNU	>1000	100

Según la norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes anexo 1 del Libro VI de las TULSMA, el límite permisible de DQO para descargas de efluentes al sistema de alcantarillado es de 500 (mg O₂/L) y para descargas en un cuerpo de agua dulce es de 250 (mg O₂/L). El límite permisible de DBO₅ para descargas en el alcantarillado es de 250 (mg O₂/L) y para descargas en cuerpo de agua es 100 (mg O₂/L). De acuerdo a los resultados obtenidos de los ensayos el valor de DBO₅ obtenido experimentalmente fue de 800 (mg O₂/L) (Tabla 6), el cual sobrepasa el límite permisible establecido por el TULSMA, este valor nos indica que existe una significativa cantidad de materia orgánica y microorganismos que se van a encargar de oxidar la materia orgánica presente en el agua residual, por lo que es necesario realizar un tratamiento del agua residual previo a su descarga.

El valor obtenido de DQO es 3484.62 mg O₂/L que es mayor al valor de DBO de 800 mg O₂/L, lo que significa que en el agua residual en estudio, existen en su mayoría compuestos que pueden ser oxidados químicamente antes que biológicamente, debido a los componentes químicos añadidos en el tratamiento para la elaboración de la tela de índigo.

3.4. ENSAYOS DE LABORATORIO

Los ensayos que se desarrollaron fueron ejecutados bajo las mismas condiciones ambientales y procedimentales, variando únicamente las variables de estudio para medir la varianza en los resultados de eficiencia de remoción de color y turbidez.

3.4.1. ENSAYOS PRELIMINARES BACH

En estos ensayos se requiere determinar el funcionamiento óptimo del reactor y gabinete de control, tomando en cuenta la disminución significativa de los parámetros antes mencionados. Además el objetivo es saber que variables son las controlan la eficiencia en la disminución de los parámetros del agua previa al proceso de electrocoagulación. A continuación se representa los parámetros que serán analizados y parámetros de operación.

Tabla 7.

Descripción de parámetros y rangos de medición

PARAMETROS	UNIDADES	RANGO DE MEDICION
OPERACIÓN		
Volumen	L	1.25
Voltaje	V	24
Corriente	A	2 - 7
Conductividad	mS/cm	4.8 - 200
Tiempo	min	0 - 30
ANALISIS		
Potencial de Hidrogeno	pH	0 - 14
Turbidez	FNU	0 - 1000
Color	PtCo	0 - 5000

3.4.2. PROCEDIMIENTOS OPERATIVOS

3.4.2.1. OBJETIVOS DE LOS PROCEDIMIENTOS OPERATIVOS

- Determinar el funcionamiento óptimo del reactor y gabinete de control.
- Observar la formación de flóculos y cambios que se presenten del agua en el reactor.
- Determinar la conductividad, corriente y voltaje óptimo para el proceso de electrocoagulación.

3.4.2.2. PROCEDIMIENTO OPERATIVO PARA EL ESTUDIO DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN

MATERIALES

Los materiales y equipos utilizados fueron:

- Reactor de electrocoagulación capacidad 1 litro
- Electrodo de Aluminio
- Gabinete de Control Voltaje de Entrada 100 VAC.
- Cronometro
- Sensor de pH
- Sensor de Conductividad
- Turbidímetro
- Microprocesador Arduino
- Cables de Conexión
- Pinza Amperimétrica FLUKE 400 A
- Multímetro FLUKE
- Vasos de Precipitación de 2 L.
- Tubos de ensayo

REACTIVOS

- Sal común

VARIABLES ESTUDIADAS

- Voltaje
- Corriente
- pH
- Conductividad
- Turbidez

PROCEDIMIENTO

- Revisar conexiones eléctricas de los sensores, etapa de potencia y reactor.
- Medir los valores de pH, conductividad y turbidez del agua residual.
- Armar el reactor con los electrodos de Aluminio y realizar las conexiones monopares con los cables eléctricos del gabinete.
- Verter en un vaso de precipitación 1 L de agua residual añadir sal hasta obtener las siguientes conductividades de 100, 150 y 200 mS/cm.
- Verter 1 L del agua residual en el reactor, encender el gabinete de control e iniciar con la cuenta del cronometro.
- Anotar los valores de corriente y voltaje.
- Extraer muestras 50 mL a los 30 minutos del centro del reactor, para medir pH, turbidez y color real.
- Anotar los cambios que se han producido en el reactor.
- Apagar el gabinete transcurridos 30 minutos de funcionamiento.
- Lavar el reactor y electrodos y repetir los experimentos desde el literal d.

3.5. DISEÑO ESTADÍSTICO

Para el estudio del tratamiento de aguas mediante electrocoagulación se estableció un diseño experimental que permita analizar el efecto de los diferentes parámetros de operación sobre el agua tratada al final del proceso.

3.5.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental que se empleó para los tratamiento de los efluentes de agua fue un diseño factorial 2x3, ya que se evaluó la combinación de dos niveles: resistencia 3.5 Ω (Ohm) y 5.5 Ω (Ohm) y, conductividad: 100mS/cm, 150mS/cm y 200 mS/cm, para evaluar los parámetros de pH, turbidez y color. En la Tabla 10 se indica la matriz con el arreglo factorial 2X3.

Factores controlables:

- **Resistencia:** Se evaluaron a dos niveles

Tabla 8.

Factor controlable de resistencia

Código	Descripción
R1	3.5 Ω (Ohm)
R2	5.5 Ω (Ohm)

- **Conductividad:** Se evaluó a tres niveles

Tabla 9.

Factor controlable de conductividad

Código	Descripción
C1	100 uS/cm
C2	150 uS/cm.
C3	200 uS/cm

Tratamientos:

Se llevaron a cabo 6 tratamientos (2X3) debido a la combinación de los niveles de resistencia y conductividad.

Tabla 10.

Tratamientos para el análisis del efluente

Tratamiento	Código	Resistencia	Conductividad
T1	R1C1	3.5 Ω	100 uS/cm
T2	R1C2	3.5 Ω	150 uS/cm.
T3	R1C3	3.5 Ω	200 uS/cm
T4	R2C1	5.5 Ω	100 uS/cm
T5	R2C2	5.5 Ω	150 uS/cm.
T6	R2C3	5.5 Ω	200 uS/cm

Repeticiones:

Para este ensayo se realizaron tres repeticiones por cada tratamiento.

Variables:

- **Variables de respuesta:** Las variables de respuesta fueron el pH, color y turbidez que se midieron empleando los procedimientos indicados en el capítulo 3, de materiales y metodología.

3.5.2 MODELO ESTADÍSTICO

Para un modelo a x b tratamientos que se replican n veces, el diseño está dado por:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} :$$

$$i = 1, 2, \dots, a; j = 1, 2, \dots, b; k = 1, 2, \dots, n$$

Donde μ es la media general, α_i es el efecto debido al i -ésimo nivel del factor A , β_j es el efecto del j -ésimo nivel del factor B , $(\alpha\beta)_{ij}$ representa al efecto de interacción en la combinación ij y ε_{ijk} es el error aleatorio que se supone

sigue una distribución normal con media cero y varianza constante $\sigma^2(N(0, \sigma^2))$ y son independientes entre sí.

Para las variables descritas, la evaluación se realizó mediante un análisis de varianza (ANOVA), prueba de significancia según el método de Tukey para diferenciar subgrupos entre tratamientos, y un análisis descriptivo de frecuencias.

Y se empleó una regresión lineal, la cual examina la relación entre una variable dependiente y un conjunto de variables independientes, en este caso como la resistencia y conductividad, pueden afectar a las variables de respuesta: pH, turbidez y color real.

3.5.3 ERROR ALEATORIO Y ERROR EXPERIMENTAL

Se consideró error aleatorio a la variabilidad de efluentes analizados dado que de acuerdo al día y a la hora en que las muestras se nos fueron otorgadas estos presentaron mayor o menor grado de contaminación lo cual depende de la producción de la empresa.

El error experimental se consideró debido a la manipulación de las unidades experimentales durante el proceso por parte de los investigadores.

3.5.4 ANÁLISIS

El análisis de los resultados se llevó a cabo en el programa estadístico INFOSTAT, el cual emplea el método de mínimos cuadrados para la obtención de estimaciones de los coeficientes de la ecuación que explica la relación entre las variables. (Balzarini, 2008).

Para determinar el proceso más eficiente se utilizó la prueba de Tukey. Debido a que este método de Tukey trabaja con un error mínimo, que es declarado por el experimentador (De la Vara). Tukey se calcula como el valor crítico para la identificación de diferencias significativas basada en el cuantil

correspondiente de la distribución de los rangos estandarizados. La prueba es más conservadora que la prueba, es decir, error tipo 1 menor. (Balzarini, 2008).

Finalmente, mediante la regresión, una regresión lineal examina la relación entre una variable dependiente y un conjunto de variables independientes, en este caso resistencia y conductividad, pueden afectar a las variables de respuesta: pH, turbidez y color real.

CAPITULO 4

4. RESULTADOS

4.1. ENSAYOS DE LABORATORIO

4.1.1. PRUEBA PILOTO

Con la estructura instalada como se muestra en la sección metodológica, y siguiendo los procedimientos operativos del reactor, se realizó la primera prueba sin variación en las condiciones químicas iniciales del agua residual tomada.

Los datos obtenidos en este ensayo fueron los descritos en la Tabla 12.

Tabla 11.

Parámetros de operación del reactor prueba piloto

ENSAYO	Piloto	
VOLUMEN	1	L
VOLTAJE	24	VAC
CORRIENTE	2,32	A
CANT. SAL	0	g

Tabla 12.

Caracterización del efluente en prueba piloto

CONDUCTIVIDAD [mS/cm]	MEDICIONES	REPETICIONES		
		I	II	III
4,80	pH	9,86	9,98	10,12
	Turbidez [FNU]	>1000	>1000	>1000
	Color Real [PtCo]	3415	3415	3415
	Color Aparente [PtCo]	4156	4156	4156

No se obtuvo remoción de color luego de los 30 min de duración de la prueba, por lo que se considera que no es factible tratar el agua bajo estas condiciones y se recomienda aumentar los niveles de conductividad, así como de intensidad eléctrica.

**Figura 9.** Ensayo Prueba Piloto

4.1.2. PRUEBA DE LABORATORIO UNO

Considerando resultados anteriores, se modifica el valor de conductividad del agua a aproximadamente 100 mS/cm y de intensidad de corriente (Tabla 13.), obteniendo los resultados descritos en la Tabla 14.

Tabla 13.

Parámetros de operación del reactor ensayo uno

ENSAYO	1	
VOLUMEN	1,00	L
VOLTAJE	24	VAC
CORRIENTE	4,3	A
CANT. SAL	80	g

Tabla 14.

Caracterización del efluente en ensayo uno

CONDUCTIVIDAD [mS/cm]	MEDICIONES	REPETICIONES		
		I	II	III
113,5	pH	8,83	8,73	8,55
	Turbidez [FNU]	76	82	65
	Color Real [PtCo]	689	1028	536
	Color Aparente [PtCo]	864	1144	716

**Figura 10.** Prueba Laboratorio Uno

4.1.3. PRUEBA DE LABORATORIO DOS

Considerando resultados anteriores, se modifica el valor de conductividad del agua a aproximadamente 200 mS/cm y de intensidad de corriente (Tabla 15.), obteniendo los resultados descritos en la Tabla 16.

Tabla 15.

Parámetros de operación del reactor ensayo dos

ENSAYO	2	
VOLUMEN	1,00	L
VOLTAJE	24	VAC
CORRIENTE	4,35	A
CANT. SAL	110	g

Tabla 16.

Caracterización del efluente en ensayo dos

CONDUCTIVIDAD [mS/cm]	MEDICIONES	REPETICIONES		
		I	II	III
150	pH	8,23	7,99	7,89
	Turbidez [FNU]	87	83	102
	Color Real [PtCo]	615	645	733
	Color Aparente [PtCo]	664	939	931

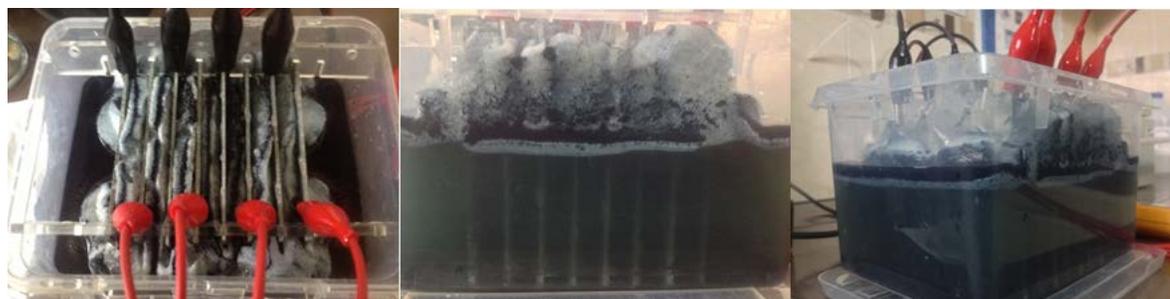


Figura 11. Prueba Laboratorio Dos

4.1.4. PRUEBA DE LABORATORIO TRES

Considerando resultados anteriores, se modifica el valor de conductividad del agua a aproximadamente 200 mS/cm y de intensidad de corriente (Tabla 17.), obteniendo los resultados descritos en la Tabla 18.

Tabla 17.

Parámetros de operación del reactor ensayo 3

ENSAYO	3	
VOLUMEN	1,00	L
VOLTAJE	24	VAC
CORRIENTE	4,34	A
CANT. SAL	185	g

Tabla 18.

Caracterización del efluente en ensayo tres

CONDUCTIVIDAD [mS/cm]	MEDICIONES	REPETICIONES		
		I	II	III
200	pH	7,68	7,65	7,58
	Turbidez [FNU]	65	32,94	63
	Color Real [PtCo]	445	270	387
	Color Aparente [PtCo]	435	437	505

No se obtuvo remoción de color durante los 30 min de duración de la prueba, por lo que se considera que no es factible tratar el agua bajo estas condiciones y se recomienda aumentar los niveles de conductividad, así como de intensidad eléctrica.



Figura 12. Prueba Laboratorio Tres

4.1.5. PRUEBA DE LABORATORIO CUATRO

Considerando resultados anteriores, se modifica el valor de conductividad del agua a aproximadamente 100 mS/cm y se aumenta la intensidad de corriente (Tabla 19.), obteniendo los resultados descritos en la Tabla 20.

Tabla 19.

Parámetros de operación del reactor ensayo cuatro

ENSAYO	4	
VOLUMEN	1,00	L
VOLTAJE	24	VAC
CORRIENTE	6,70	A
CANT. SAL	80	g

Tabla 20.

Caracterización del efluente en ensayo cuatro

CONDUCTIVIDAD [mS/cm]	MEDICIONES	REPETICIONES		
		I	II	III
100	pH	8,64	8,64	8,64
	Turbidez [FNU]	43,32	35,71	39,52
	Color Real [PtCo]	249	223	236
	Color Aparente [PtCo]	252	251	251,5



Figura 13. Prueba Laboratorio Cuatro

4.1.6. PRUEBA DE LABORATORIO CINCO

Considerando resultados anteriores, se modifica el valor de conductividad del agua a aproximadamente 150 mS/cm y se aumenta la intensidad de corriente (Tabla 21.), obteniendo los resultados descritos en la Tabla 22.

Tabla 21.

Parámetros de operación del reactor ensayo cinco

ENSAYO	5	
VOLUMEN	1,00	L
VOLTAJE	24	VAC
CORRIENTE	6,60	A
CANT. SAL	116,5	g

Tabla 22.

Caracterización del efluente en ensayo cinco

CONDUCTIVIDAD [mS/cm]	MEDICIONES	REPETICIONES		
		I	II	III
150	pH	8,3	8	8,15
	Turbidez [FNU]	23	4,75	13,88
	Color Real [PtCo]	197	112	155
	Color Aparente [PtCo]	378	418	398



Figura 14. Prueba Laboratorio Cinco

4.1.7. PRUEBA DE LABORATORIO SEIS

Considerando resultados anteriores, se modifica el valor de conductividad del agua a aproximadamente 200 mS/cm y se aumenta la intensidad de corriente (Tabla 23.), obteniendo los resultados descritos en la Tabla 24.

Tabla 23.

Parámetros de operación del reactor ensayo seis

ENSAYO	6	
VOLUMEN	1,00	L
VOLTAJE	24	VAC
CORRIENTE	6,6	A
CANT. SAL	187	g

Tabla 24.

Caracterización del efluente en ensayo seis

CONDUCTIVIDAD [mS/cm]	MEDICIONES	REPETICIONES		
		I	II	III
200	pH	8,03	7,58	7,81

CONTINUA →

Turbidez [FNU]	43,32	58	51
Color Real [PtCo]	262	375	319
Color Aparente [PtCo]	276	362	319

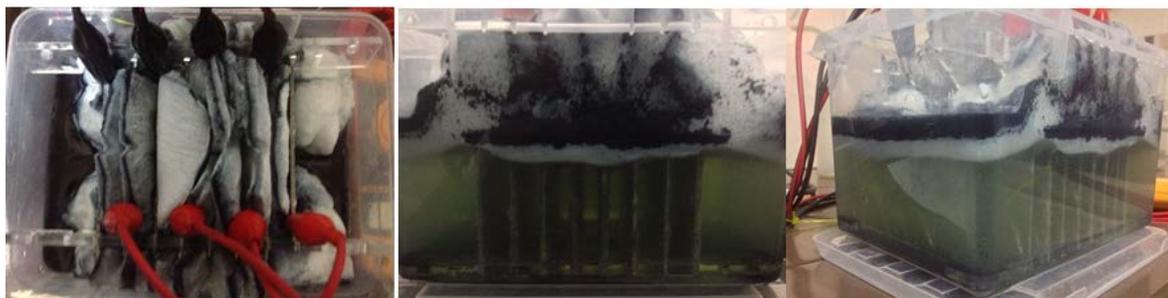


Figura 15. Prueba Laboratorio Seis

4.2. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE TURBIDEZ , COLOR REAL, Y VARIACIÓN DE PH

En la Tabla 25 se presentan los porcentajes de remoción de los parámetros de análisis.

Tabla 25.

Porcentaje de remoción de turbidez y color real y variación de pH

RESISTENCIA [OHM]	CONDUCTIVIDAD	MEDICIONES	REPETICIONES			
	[mS/cm]		I	II	III	
5.5	113.5	pH	8.83	8.73	8.55	
		% Remoción	92.40	91.80	93.50	
		Turbidez [FNU]				
		% Remoción Color	79.82	69.90	84.30	
		Real [PtCo]				

CONTINUA →

		60			
3.5	150	pH	8.23	7.99	7.89
		% Remoción	91.30	91.70	89.80
		Turbidez [FNU]			
	200	% Remoción Color Real [PtCo]	81.99	81.11	78.54
		pH	7.68	7.65	7.58
		% Remoción	93.50	96.71	93.70
	100	Turbidez [FNU]			
		% Remoción Color Real [PtCo]	86.97	92.09	88.67
		pH	8.64	8.64	8.64
	150	% Remoción	95.67	96.43	96.05
		Turbidez [FNU]			
		% Remoción Color Real [PtCo]	92.71	93.47	93.09
	200	pH	8.30	8.00	8.15
		% Remoción	97.70	99.53	98.61
		Turbidez [FNU]			
150	% Remoción Color Real [PtCo]	94.23	96.72	95.48	
	pH	8.03	7.58	7.81	
	% Remoción	95.67	94.20	94.93	
200	Turbidez [FNU]				
	% Remoción Color Real [PtCo]	92.33	89.02	90.67	

4.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS ENSAYOS DE REMOCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE ANÁLISIS.

4.3.1. ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA)

En las Tabla 26-Tabla 28, se muestra el análisis de varianza (ANOVA) del diseño experimental con los resultados obtenidos de pH y la remoción de Color Real y Turbidez.

Tabla 26.

Análisis de Varianza ANOVA de ensayos de variación de pH

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	2.82	5	0.56	26.79	<0.0001
TRATAMIENTO	2.82	5	0.56	26.79	<0.0001
Error	0.25	12	0.02		
Total	3.08	17			

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PH	18	0.92	0.88	1.78

Tabla 27.

Análisis de Varianza ANOVA de ensayos de remoción de Turbidez

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	107.69	5	21.54	19.87	<0.0001
TRATAMIENTO	107.69	5	21.54	19.87	<0.0001
Error	13.01	12	1.08		
Total	120.70	17			

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
TURBIDEZ	18	0.89	0.85	1.10

Tabla 28.

Análisis de Varianza ANOVA de ensayos de remoción de Color Real

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	737.30	5	147.46	12.87	0.0002
TRATAMIENTO	737.30	5	147.46	12.87	0.0002
Error	137.51	12	11.46		
Total	874.80	17			

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
COLOR REAL	18	0.84	0.78	3.85

4.3.2. PRUEBA DE TUKEY

Los resultados obtenidos de la prueba de Tukey, interactuando todas las variables que se evaluaron en cada tratamiento, se describen en las Tabla 29-Tabla 31.

Tabla 29.

Prueba de Tukey aplicada a la interacción de todas las variables evaluadas en la variación de pH

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
T1	8.70	3	0.08	A
T4	8.64	3	0.08	A
T5	8.15	3	0.08	B
T2	8.04	3	0.08	B
T6	7.81	3	0.08	B C
T3	7.64	3	0.08	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Tabla 30.

Prueba de Tukey aplicada a la interacción de todas las variables evaluadas en la remoción de Turbidez

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.	
T5	98.61	3	0.60	A
T4	96.05	3	0.60	A B
T6	94.93	3	0.60	B C
T3	94.64	3	0.60	B C
T1	92.57	3	0.60	C D
T2	90.93	3	0.60	D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Tabla 31.

Prueba de Tukey aplicada a la interacción de todas las variables evaluadas en la remoción de Color Real

TRATAMIENTO	Medias	n	E.E.		
T5	95.48	3	1.95	A	
T4	93.09	3	1.95	A	
T6	90.67	3	1.95	A	
T3	89.24	3	1.95	A	B
T2	80.55	3	1.95		B C
T1	78.01	3	1.95		C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

4.3.3. IDENTIFICACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS MEJORES ENSAYOS DE REMOCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE ANÁLISIS.

En la Figura 16 se despliegan los resultados obtenidos estadísticamente en la remoción de Turbidez y Color Real.

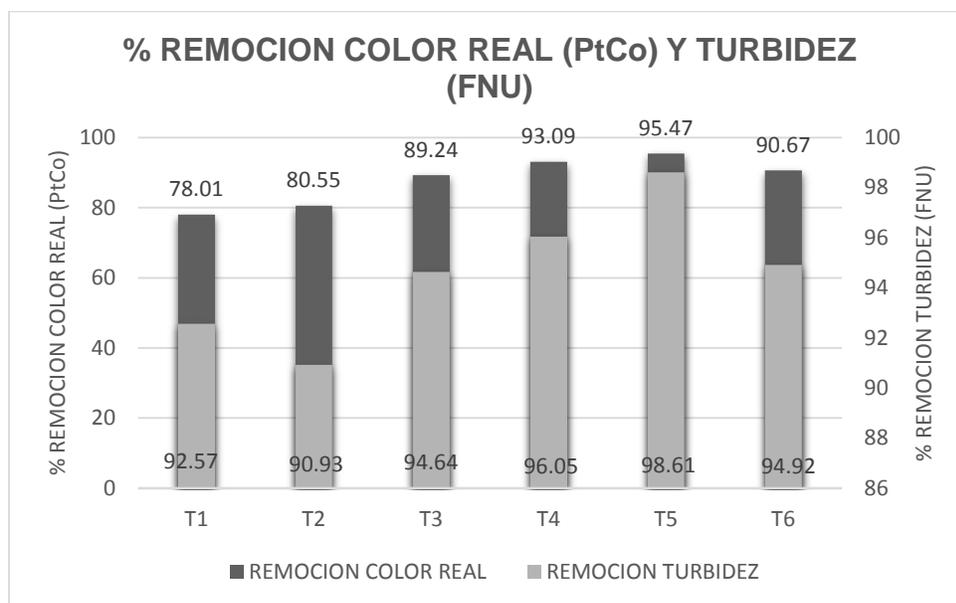


Figura 16. Porcentajes de remoción de Turbidez y Color Real de los seis ensayos realizados.

En la Figura 17 se presenta la variación del valor de pH, donde se puede apreciar los resultados.

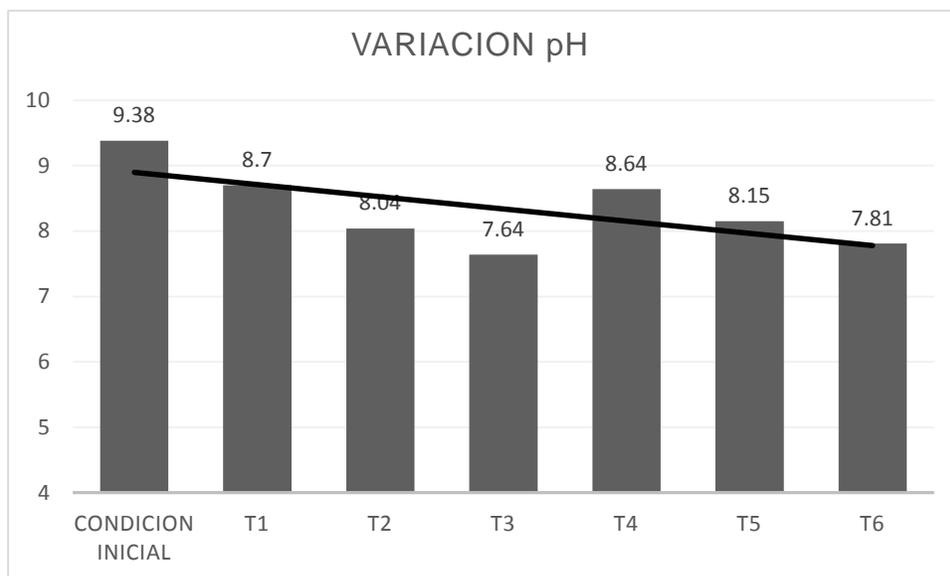


Figura 17. Variación de pH de los ensayos realizados

4.4. ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL

Mediante la regresión se puede estudiar como el cambio en las variables predictoras, en este caso resistencia y conductividad, pueden afectar a las variables de respuesta: pH, turbidez y color real.

InfoStat emplea el método de mínimos cuadrados para la obtención de estimaciones de los coeficientes de la ecuación que explica la relación entre las variables. (Balzarini, 2008).

Tabla 32.

Regresión Lineal pH

PH

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
PH	18	0.85	0.84	0.04	-7.44	-3.88

Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

	Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const		9.74	0.24	9.23	10.25	40.43	<0.0001		
RESISTENCIA (OHM)		-0.01	0.04	-0.10	0.07	-0.35	0.7306	2.18	1.00
CONDUCTIVIDAD (ms/cm)		-0.01	1.1E-03	-0.01	-0.01	-9.34	<0.0001	83.90	1.00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	2.62	2	1.31	44.05	<0.0001
RESISTENCIA (OHM)	3.7E-03	1	3.7E-03	0.12	0.7306
CONDUCTIVIDAD (ms/cm)	2.60	1	2.60	87.30	<0.0001
Error	0.45	15	0.03		
Lack of Fit	0.19	3	0.06	3.07	0.0689
Error Puro	0.25	12	0.02		
Total	3.07	17			

Tabla 33.

Regresión Lineal Turbidez

TURBIDEZ (FNU)

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
TURBIDEZ (FNU)	18	0.55	0.49	512.40	161.88	165.44

Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

	Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const		-24.74	26.58	-81.38	31.91	-0.93	0.3667		
RESISTENCIA (OHM)		19.20	4.50	9.61	28.78	4.27	0.0007	19.15	1.00
CONDUCTIVIDAD (ms/cm)		-0.05	0.12	-0.30	0.20	-0.44	0.6670	2.24	1.00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	6622.68	2	3311.34	9.13	0.0025
RESISTENCIA (OHM)	6609.81	1	6609.81	18.23	0.0007
CONDUCTIVIDAD (ms/cm)	69.85	1	69.85	0.19	0.6670
Error	5438.63	15	362.58		
Lack of Fit	4140.83	3	1380.28	12.76	0.0005
Error Puro	1297.80	12	108.15		
Total	12061.32	17			

Tabla 34.

Regresión Lineal Color Real

COLOR REAL (PtCo)

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
COLOR REAL (PtCo)	18	0.62	0.57	38369.10	238.63	242.19

Coeficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	-180.10	224.08	-657.72	297.51	-0.80	0.4341		
RESISTENCIA (OHM)	182.21	37.91	101.41	263.00	4.81	0.0002	23.72	1.00
CONDUCTIVIDAD (ms/cm)	-1.47	0.99	-3.58	0.63	-1.49	0.1570	4.14	1.00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	633233.22	2	316616.61	12.28	0.0007
RESISTENCIA (OHM)	595523.47	1	595523.47	23.11	0.0002
CONDUCTIVIDAD (ms/cm)	57211.00	1	57211.00	2.22	0.1570
Error	386602.78	15	25773.52		
Lack of Fit	226054.11	3	75351.37	5.63	0.0121
Error Puro	160548.67	12	13379.06		
Total	1019836.00	17			

Tabla 35.

Correlación entre variables

Matriz de correlación total

	PH	TURBIDEZ (FNU)	COLOR REAL (PtCo)
PH	1.00	0.01	0.22
TURBIDEZ (FNU)	0.01	1.00	0.88
COLOR REAL (PtCo)	0.22	0.88	1.00

4.5. DISCUSIÓN

La determinación del mejor tratamiento en el proceso de electrocoagulación se realizó mediante el análisis de la varianza, ANOVA.

Mediante este análisis se puede observar que las medias de los cinco tratamientos difieren entre sí (Tabla 26, 27 y 28) en las variables analizadas, donde se nota que el p-valor es menor a 0.05; siendo tanto para el pH como para la turbidez un p menor a 0,0001 y, para el color real un p-valor de 0.0002, rechazándose así la hipótesis nula que afirma igualdad de medias. (Guitierrez, 2008)

Para determinar cuáles de las medias difieren, se realizó comparaciones entre grupos de las medias de tratamientos empleando la prueba de Tukey, facilitando la identificación del mejor método para el tratamiento del agua, debido que se presenta el menor error. (Guitierrez, 2008). En las Tablas 29,30 y 31 se puede observar los grupos de medias generados por el programa estadístico InfoStat.

De dichos resultados se presume que el mejor tratamiento es el número cinco, T5 (3.5 OHM, 150mS/cm), debido a que las medias para las tres variables de interés cumplen con los valores requeridos para la descarga en alcantarillado público según se describe en la Norma de Calidad Ambiental. (TULSMA, 2013); siendo un pH de 8.15 y presentando los porcentajes de remoción de turbidez y color más elevados de 98.61%, 95.48% respectivamente. (Guitierrez, 2008)

Como puede verse en la Tabla 32 de análisis de varianza hay una regresión lineal entre la conductividad y el pH ($p < 0.0001$), mientras que la resistencia respondería a un modelo no lineal ($p = 0.7306$). Se observa además que el modelo propuesto no presenta falta de ajuste ($p = 0.0689$).

Mediante la Tabla 33 de análisis de varianza se puede observar que existe una regresión lineal entre la resistencia y la turbidez ($p = 0.0007$), mientras que la conductividad respondería a un modelo no lineal ($p = 0.6670$). Se observa además que el modelo propuesto no presenta falta de ajuste ($p = 0.0005$).

Como se observa en la Tabla 34 de análisis de varianza hay una regresión lineal entre la resistencia y el color real ($p=0.0002$), mientras que la conductividad respondería a un modelo no lineal ($p=0.1570$). Se observa además que el modelo propuesto no presenta falta de ajuste ($p=0.0121$).

En la Tabla 35 se observa la correlación que existe entre las diferentes variables a analizar, existiendo entre pH y color real una relación más fuerte ($R^2 = 0.22$) respecto a la turbidez ($R^2 = 0.01$). Por otra parte la relación entre turbidez y color real es la más significativa dado que el coeficiente de correlación de Pearson $R^2 = 0.88$, siendo el mayor entre todos los coeficientes, los cuales muestran además una correlación positiva entre variables

Los distintos valores de conductividad que se indujeron en el agua residual se logró añadiendo distintas cantidades de sal común, es decir, que añadimos iones al agua mejorando el flujo de electrones en la misma. Para determinar el rango de conductividades adecuadas se condujeron experimentos previos, que no se detallan en este documento, éstos sirvieron como referencia para que los valores de conductividad estén entre 100 y 200 mS/cm y de esta forma obtener los mejores valores de remoción de turbidez y color real.

La variación de pH en los distintos ensayos refleja una disminución de esta propiedad, estando este valor de pH en el rango de valores permitidos para la descarga del agua tratada en el alcantarillado, pH 7 a 9. (Roessler, 2002). (TULSMA, 2013).

La adición de sal (NaCl) tuvo algunas ventajas que se pudieron evidenciar en la experimentación, la primera: el incrementó de la conductividad logrando así una disminución en el consumo eléctrico gracias a la reducción del tiempo de tratamiento. (Mollah, 2001). La segunda se puede constatar que después de la electrocoagulación el pH decrece para aguas alcalinas, gracias a la generación de hidrogeno molecular que logra disminuir el pH. (Arango, 2012). Cuando el pH es mayor a 10, este parámetro no favorece para la absorción de solidos disueltos,

mientras que en valores bajos este efecto es insignificante. (Ge, 2003). Una tercera ventaja, es que se reducen los efectos adversos de los iones, que generan una capa insoluble que se deposita sobre los electrodos, aumentando el potencial entre los electrodos y decreciendo la eficiencia del proceso. (Arango, 2012).

La variación de intensidad de corriente, se obtuvo cambiando el valor de resistencia en el gabinete de control, alcanzando así una corriente máxima de 6,7 A y permitiendo así que la decoloración del agua residual se logre de una manera más rápida comparada con aquella obtenida con valores de corriente menores, porque la circulación de los electrones por las placas es más lento y en menor cantidad, además existe una tasa menor en la formación de flóculos. (Khandegar, 2013).

La aplicación de corriente directa forma una capa de óxido metálico sobre el cátodo, aumentado así su deterioro por una mayor tasa de oxidación, esto origina a una menor eficiencia en el proceso de electrocoagulación. Al contrario, el uso de corriente alterna, retarda el ataque de la oxidación sobre los electrodos, garantizando una vida más duradera de los mismos. (Mollah, 2001).

El valor de pH va cambiando durante el proceso de electrocoagulación, para explicar este proceso según (Merzouk et al., 2009), para valores de pH bajos 2 – 3, predominan especies monómeros catiónicas como Al^{3+} y $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$. Cuando el pH esta entre 4 -9, los iones Al^{3+} y $(\text{OH})^-$ generan varias especies monómeros como $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$, y especies polímeros como $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$ y $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$ que finalmente se transforman en soluciones insolubles. Cuando el pH es mayor a 10, el anión $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ concentra el incremento de $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$. Considerando finalmente que existe precipitación cuando el pH es menor a 4 y existe una absorción cuando el pH es mayor. La disminución en la eficiencia de remoción de una solución más acida o alcalina se

atribuye al comportamiento anfótero de $\text{Al}(\text{OH})_3$ que conduce a cationes solubles Al^{3+} (a pH más ácidos) y a aniones monoméricas $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ (a pH más alcalinos), teniendo en cuenta que estas soluciones solubles no son útiles para el tratamiento de aguas. (Vasudevan et al., 2009).

CAPITULO 5

5. DISEÑO DEL EQUIPO DE ELECTROCOAGULACION

5.1. DISEÑO DE COMPONENTES MECÁNICOS

5.1.1. DISEÑO DEL TANQUE REACTOR

En el dimensionamiento del tanque reactor, se tomó en cuenta tres zonas existentes durante el proceso de electrocoagulación. Las cuales se presentan en la Figura 18. Se observa que el área que contiene el volumen de agua residual a tratar, 10 litros, está dividida en dos zonas, la zona de reacción y la zona de sedimentación. En ésta última se producirá la sedimentación de las partículas contaminantes durante el tratamiento. Así mismo, en el proceso se generan flóculos con una menor densidad menor al agua y los que serán arrastrados a la superficie mediante la aplicación de un flujo de aire. En esta zona de flotación, los lodos crecerán, y por medio de un desnatador serán fácilmente removidos, durante y posterior al proceso.

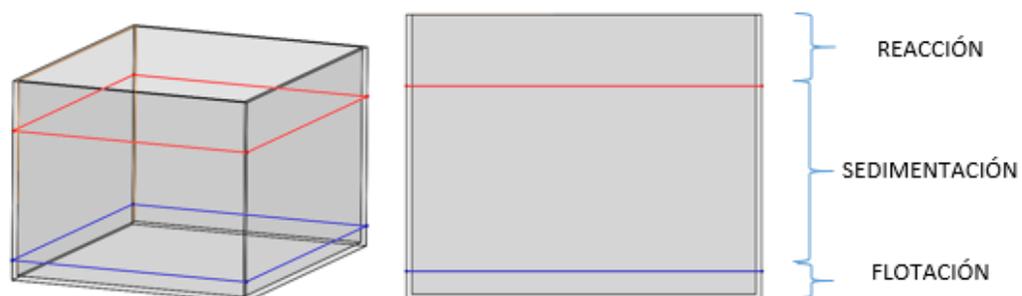


Figura 18. Zonas dentro del reactor de electrocoagulación

Cálculos:

El dimensionamiento del reactor para las tres zonas mencionadas anteriormente se realiza mediante:

$$volumen = largo * ancho * altura$$

$$v = l * a * h = 30 * 25 * 20$$

$$v = 15000 \text{ cm}^3 = 15 \text{ L}$$

El volumen de trabajo real para el proceso de electrocoagulación, se lo considera dentro de las zonas de reacción y sedimentación, así:

$$v_{rs} = l * a * h_{rs}$$

$$v_{rs} = 30 * 25 * 15$$

$$v_{rs} = 11250 \text{ cm}^3 = 11,25 \text{ L}$$

Dejando de este modo 5cm de altura para la formación de los lodos.

Electrodos

Los electrodos de sacrificio son placas de aluminio ubicadas transversalmente dentro del tanque reactor, y en forma paralela una de otra, estas deben estar distanciadas al menos 10mm entre sí, con el fin de obtener una mayor eficiencia del proceso. En la Figura 19 se observan las dimensiones de las placas para encajar dentro del reactor.

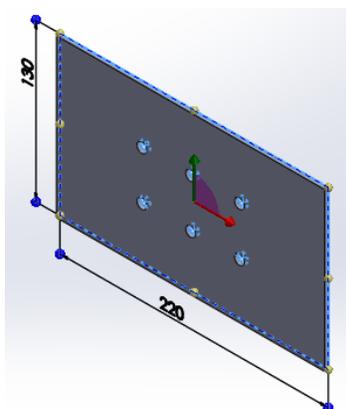


Figura 19. Dimensiones del electrodo de aluminio para reactor

A continuación, se detallan los cálculos para determinar el volumen de estas placas:

Área electrodos: se considera que en las placas existen 6 orificios de 4mm de radio, con el fin de que exista mayor flujo de flóculos durante el proceso.

Cálculos:

$$\text{área electrodo} = \text{largo} * \text{altura} - \text{área orificio} * \#\text{orificios}$$

$$A_{elect} = (l_e * h_e) - 6 * (\pi * r^2)$$

$$A_{elect} = 0,028m^2$$

El número total de electrodos dentro del reactor se calcula tomando en cuenta la distancia cara a cara del reactor con las placas, en este caso será de 4cm, con la siguiente fórmula:

$$d_{elect} = 11mm \quad \text{Distancia entre electrodos}$$

$$\delta = 40mm \quad \text{Distancia a cara lateral del reactor}$$

$$l_{reactor} = 300mm \quad \text{Largo Reactor}$$

$$e_{elect} = 3mm \quad \text{Espesor electrodos}$$

$$n_{elect} = \frac{l - 2\delta}{d_{elect} + e_{elect}} = 15,7$$

(Arango, 2007).

El reactor se construirá con 15 electrodos, de modo que los elementos entren sin ningún problema. Con estos datos ya podemos calcular el volumen total que ocupan los 15 electrodos dentro del reactor:

$$V_{total_{elect}} = n_{elect} * A_{elect} * e_{elect} = 1,273L$$

El volumen del agua a tratar entonces será la diferencia entre el volumen de las zonas de reacción y sedimentación, menos el volumen total de los electrodos, así:

$$V_{total} = v_{rs} - V_{total_{elect}} = 9,977L \cong 10L$$

Logrando los 10 litros de agua a tratar, por lo tanto el diseño del reactor es adecuado y podemos proceder a su diseño y simulación digital.

5.1.1.1. DISEÑO REACTOR ELECTROCOAGULACIÓN CAD

Gracias a la herramienta de Diseño de partes mecánicas de SolidWorks se dibujó las partes del tanque reactor de acuerdo a las especificaciones de los cálculos antes realizados. En la Figura 20 se observa el ensamble del tanque reactor conteniendo los electrodos de aluminio, tanques laterales para almacenamiento de lodos y, orificios para la instalación de la tubería.

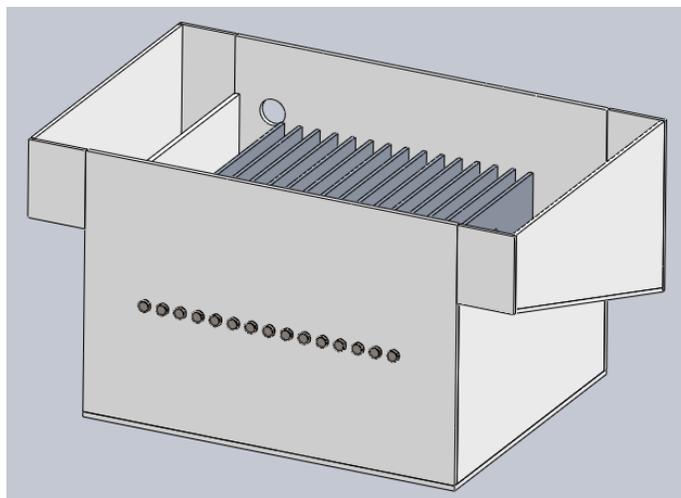


Figura 20. Simulación de tanque reactor con tanques para almacenar los lodos recogidos por las paletas de remoción. Diseño realizado con software SolidWorks

5.1.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE REMOCIÓN DE LODOS

Para el sistema de remoción de lodos se optó por un sistema de carros guiados por rieles como se observa en la Figura 21, los cuales cargarán una paleta de acrílico (desnatador) que será la encargada de remover los lodos flotantes de la superficie del agua durante el proceso de electrocoagulación. Esta paleta se desplaza a lo largo del tanque reactor haciendo que los lodos caigan a los tanques, destinados a almacenarlos y para su posterior desecho. Estos tanques se ubican en ambos lados del tanque reactor.

El principal criterio para la elección de estos carros testeros normalmente utilizados en puentes grúa, fue la facilidad de fabricación gracias al prototipado rápido que ofrecen las impresoras 3D, además de la facilidad de desensamble, para la limpieza o mantenimiento del equipo.

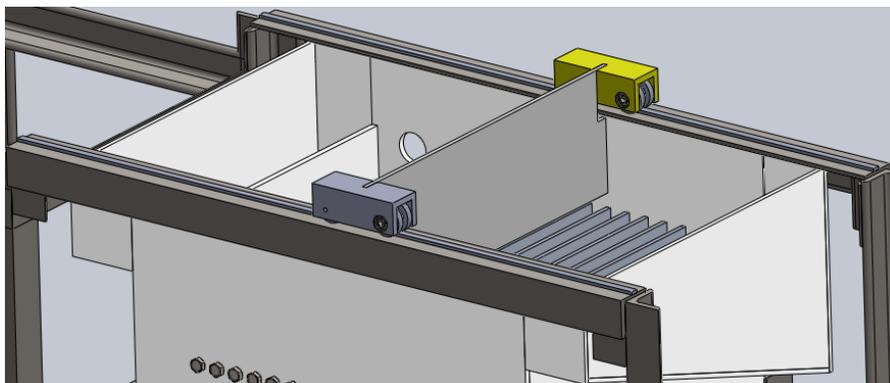


Figura 21. Sistema de Remoción de Lodos con carrillos testeros.

5.1.3. DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE AGUA RESIDUAL

El proceso de tratamiento de aguas residuales de este prototipo de laboratorio será desarrollado en tres etapas. La primera etapa es la de alimentación del agua residual. Se diseña un tanque alimentador de donde se verterá el agua residual a tratar. En este tanque se pre-tratará el agua para que cumpla con las condiciones químicas antes de ingresar a la segunda etapa. En el proceso primario se ajustará la conductividad eléctrica del agua residual para que exista un óptimo flujo de corriente. La segunda etapa, es el proceso de

electrocoagulación en sí, que se lleva a cabo en el tanque reactor electrocoagulador.

La alimentación al tanque reactor será desde el tanque alimentador, que ha sido diseñado para contener un volumen de 12L de agua.

Cálculo del Volumen del tanque alimentador:

$$V_{ta} = l_{ta} * a_{ta} * h_{ta}$$

Siendo:

l_{ta} : largo de tanque alimentador

a_{ta} : ancho tanque alimentador

h_{ta} : altura tanque alimentador

$$V_{ta} = 21cm * 25cm * 24cm = 12600 cm^3$$

Se sobredimensionan las medidas, Figura 22, para no tener el agua desbordando del tanque de alimentación.

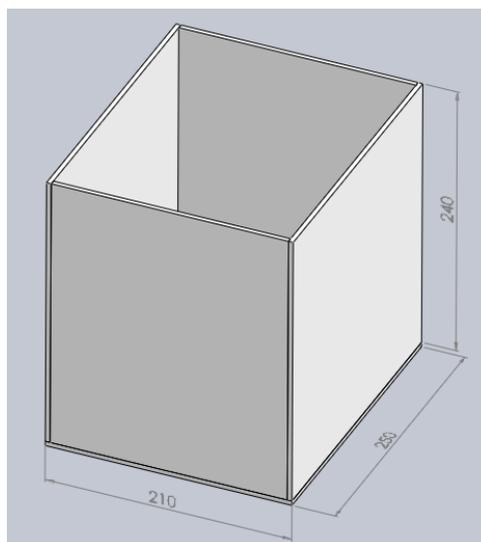


Figura 22. Dimensiones tanque alimentador

Los tanques estarán distribuidos en escalera para facilitar la alimentación a cada uno de los tanques posteriores, reactor y de salida, de modo que el flujo sea por gravedad sin necesidad de bombas hidráulicas.

5.1.4. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE DEL PROTOTIPO

Con los tanques de alimentación dimensionados se procede al diseño de la estructura que los soportará. Como se explicó anteriormente la distribución de los tanques será en escalera como se ve en la Figura 23:

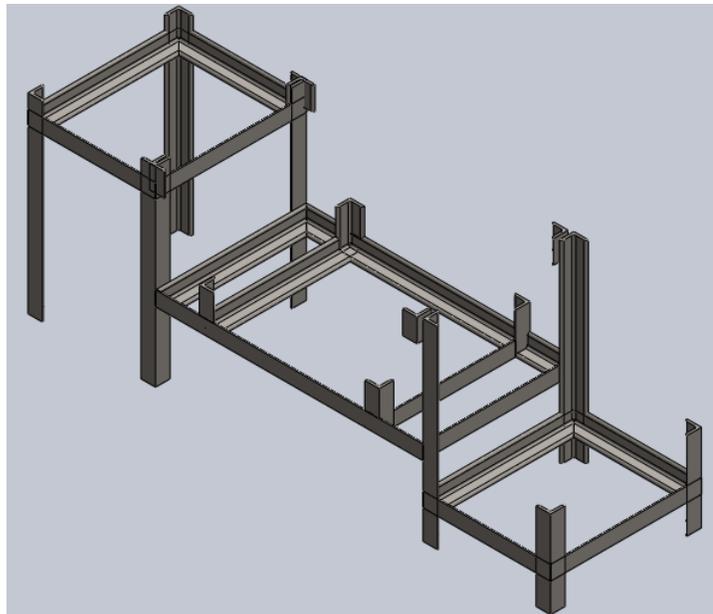


Figura 23. Estructura de soporte para los tanques

El material de los ángulos de la estructura es acero ASTM A36. Para asegurar el soporte de los tanques con sus respectivos volúmenes de agua, nos ayudamos del software SolidWorks para realizar el análisis de flexión y deformación de la estructura.

Como podemos observar en la Figura 24 ningún elemento de la estructura sufre un esfuerzo crítico, por lo tanto la estructura soportará sin problemas el peso de los tanques. Esto es comprobable con el análisis de flexión en la Figura

25 donde se puede observar que la deformación máxima es de 0,06mm en su punto más crítico, siendo casi imperceptible.

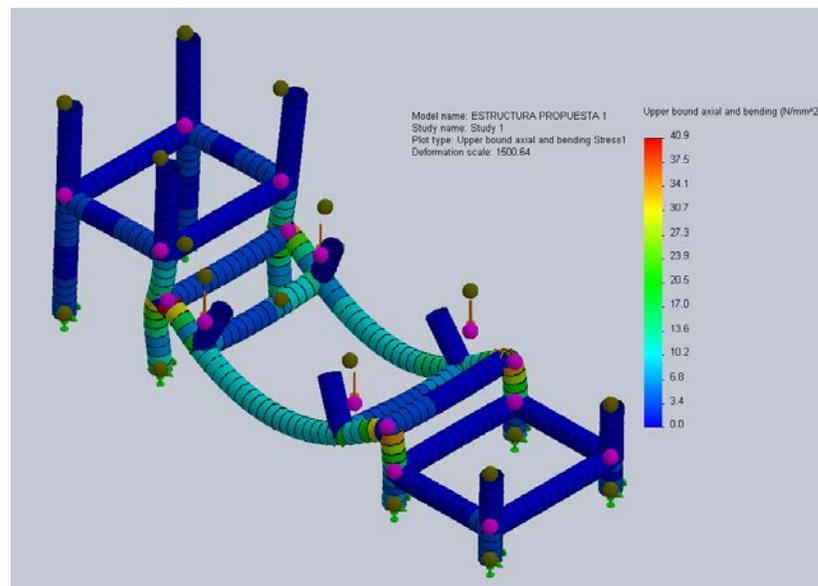


Figura 24. Análisis de flexión en estructura de Acero A36

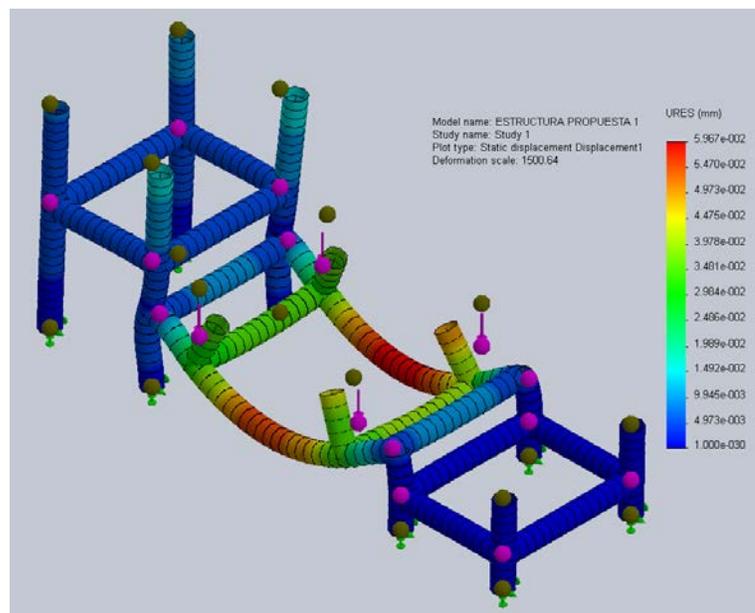


Figura 25. Análisis de deformación en estructura de Acero A36

5.1.5. DISEÑO Y SELECCIÓN DE TUBERÍA

El volumen de agua a tratar es 10L, los cuales se requieren que sean transferidos del tanque alimentador al tanque reactor en un tiempo de 30s. Se procede entonces a calcular el caudal necesario que debe pasar por la tubería para cumplir tal propósito.

$$Q = \frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}}$$

(Mott, 2006).

$$Q = \frac{10L}{30s} = 1,2 \frac{m^3}{h}$$

El agua será descargada del tanque alimentador con ayuda de la fuerza de gravedad, y cuya velocidad está dada por la ecuación:

$$v = \sqrt{2 * g * h}$$

(Mott, 2006).

Donde:

g: gravedad

h: altura del líquido

$$v = \sqrt{2 * 9,8 \frac{m}{s^2} * 0,24 m} = 2,1 \frac{m}{s}$$

Con la velocidad de salida del agua y el flujo de caudal volumétrico podemos calcular el diámetro de tubería que necesitamos para nuestro sistema.

$$d = \sqrt{\frac{4 * Q}{3600v * \pi}}$$

(Mott, 2006).

Donde:

Q: flujo volumétrico o caudal

v: velocidad del agua a la salida del tanque alimentador

$$d = \sqrt{\frac{4 * 1,2}{3600 * 2 * \pi}} = 0,0146m$$

$$d = 0,57 \text{ in}$$

El diámetro de la tubería será 0,5in, pues es un diámetro comercial de tubería.

5.1.6. SELECCIÓN DE BOMBA

La ecuación de la energía entre el tanque reactor y el tanque de salida será:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

(Mott, 2006).

Donde:

$\frac{P}{\gamma}$: carga de presión

z: carga de elevación

$\frac{v^2}{2g}$: carga de velocidad

h_A : carga por accesorios

h_L : carga por bomba hidráulica

Las presiones en los puntos 1 y 2 son cero del tanque reactor y de salida respectivamente, porque el líquido dentro de estos se encuentra a la intemperie. La velocidad en el punto uno es cero por la misma razón antes mencionada y, en el dos es:

$$v_2 = \sqrt{2 * g * h_{rs}}$$

(Mott, 2006).

$$v_2 = \sqrt{2 * 9,8 * 0,113} = 1,49 \text{ m/s}$$

La ecuación de energía del sistema se simplifica y, queda así:

$$z_1 + h_A - h_L = z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

La pérdida por altura es igual a la pérdida por velocidad, por lo que la carga total de la bomba será la perdida por accesorios.

$$h_A = h_L = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5$$

Donde:

h1: pérdida en la entrada

h2: pérdida por fricción en la línea de succión y descarga

h3: pérdida por válvula

h4: pérdida por codos a 90°

h5: pérdida en la salida

La velocidad en la línea de succión y descarga:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4 * 1,2 * m^3/h}{3600 * \pi * 0,0127^2} = 2,63 \text{ m/s}$$

$$h_1 = k * \frac{v^2}{2g} = 0,5 * \frac{2,63^2}{2 * 9,8} = 0,176 \text{ m}$$

Para determinar las pérdidas de energía por fricción se necesita el número de Reynolds, la rugosidad relativa y el factor de fricción.

$$\rho = 1,030 \frac{kg}{m^3}$$

$$\eta = 1,03 * 10^{-3} \text{ Pa} * \text{s}$$

$$N_R = \frac{vD\rho}{\eta} = \frac{2,63 * 0,0127 * 1,03}{1,03 * 10^{-3}} = 33,4$$

(Mott, 2006).

Donde:

ρ : Densidad del agua residual

η : Viscosidad dinámica

D: diámetro tubería

V: velocidad en la línea de succión y descarga

El flujo es laminar ($N_R < 2000$), por lo tanto usamos la ecuación de Darcy (Mott, 2006):

$$h_2 = \frac{64 * L * v^2}{N_R * D * 2g}$$

$$h_2 = \frac{64 * 0,25 * 2,63^2}{33,4 * 0,0127 * 2 * 9,8} = 13,31m$$

Se calcula ahora la pérdida de energía por la válvula de globo abierta por completo, cuya razón de longitud equivalente L/D es 340 y el factor de fricción es 0,019. (Mott, 2006). Entonces tenemos:

$$h_3 = f_r \frac{L * v^2}{D * 2g} = 0,019 * 340 * 0,35 = 2,26m$$

Ahora se calcula la pérdida de energía en los codos a 90°. Para codos estándar a 90°, L/D=30. El factor de fricción 0,019. (Mott, 2006).

$$h_4 = 2 * f_r \frac{L * v^2}{D * 2g} = 2 * 0,019 * 30 * 0,35 = 0,4m$$

La pérdida en la salida es:

$$h_5 = 1 * \frac{v^2}{2g} = 0,35 m$$

(Mott, 2006).

Ahora es posible determinar la carga total:

$$h_A = h_L = 0,176 + 13,31 + 2,26 + 0,4 + 0,35 = 16,496m$$

La potencia de la bomba hidráulica para transferir el agua del reactor al tanque de salida, se calcula con la ecuación:

$$P_A = \frac{h_A * \gamma * Q}{e}$$

(Mott, 2006).

Donde:

γ : Peso específico

e: eficiencia

$$P_A = \frac{16,5 \cdot 10,10 \cdot 10^3 \cdot 0,00033}{0,9} = 61,1W$$

5.2. DISEÑO DE LOS COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

El diseño electrónico ayuda a efectuar técnicas de procesamiento de información mediante el uso de componentes electrónicos, como circuitos integrados de aplicación específica. Con el diseño electrónico se planean y diseñan circuitos electrónicos impresos que cumplan con los requerimientos de funcionalidad y costo.

Dentro de este diseño se considera la instrumentación, que es necesaria para la determinación e identificación de los parámetros químicos del agua residual a tratar, como potencial de hidrogeno y conductividad eléctrica. Además de necesaria para el control del nivel de agua en el tanque de alimentación y movimiento del removedor de lodos.

Con la selección de los sensores a utilizar, es necesario también definir el controlador de todos los elementos electrónicos y eléctricos que serán usados para el proceso de electrocoagulación. Será importante definir el número total de entradas, salidas y auxiliares para el diseño del panel de control, y su distribución.

5.2.1. SELECCIÓN INSTRUMENTOS DE MEDICION

5.2.1.1. SENSOR DE CONDUCTIVIDAD

Para medir la conductividad óptima del agua residual antes de ser tratada, y enviarla mediante señal eléctrica al controlador para monitorizar y controlar el proceso de electrocoagulación es usado un sensor de conductividad para Arduino, este permite el acceso a librerías de programación para una fácil conexión y uso.



Figura 26. Kit Sensor de conductividad para Arduino

Fuente: http://www.amazon.com/Electrical-Conductivity-Kit--E-c-Arduino/dp/B00798ISZA/ref=sr_1_2?s=electronics&ie=UTF8&qid=1404601896&sr=1-2&keywords=ph+sensor+arduino

Características Técnicas:

- Voltaje de Operación 3.3 V – 5.5 V
- Gama completa CE de 0.55 mS / cm a 500 000 + S / cm
- Lecturas E.C. + / - 5µs
- Temperatura lecturas independientes o dependientes de la temperatura
- Lectura individual o modos de lectura continuas
- El total de sólidos disueltos (TDS) referenciadas a KCL

Considerando que el voltaje de funcionamiento del sensor tiene un rango de 3.3 a 5V, es necesario el acondicionamiento del sensor para su correcta operación, para esto se utiliza un regulador de voltaje de 5 V, para alimentar al sensor. El sensor cuenta con un circuito propio para el manejo de la señal proveniente del electrodo, que consta de 6 pines: Gnd (Tierra), Tx, Rx, Vcc y Prb.

5.2.1.2. SENSOR DE PH

El sensor de pH medirá el valor del agua residual a ser tratada, y enviará la señal eléctrica al controlador para monitorizar el proceso de electrocoagulación.

El sensor de pH para Arduino, permite tener acceso a librerías para una fácil conexión y uso.



Figura 27. Kit sensor de pH para Arduino

Fuente: http://www.amazon.com/pH-DEVELOPMENT-ARDUINO-SOLUTIONSRCUIT/dp/B00798612C/ref=sr_1_4?s=pc&ie=UTF8&qid=1404601914&sr=1-4

Características Técnicas:

- Voltaje de Operación 3.3 V – 5.5 V
- Rango de lectura de pH completa 0,01-14,00
- Precisión dentro de dos cifras significativas
- Temperatura lecturas independientes o dependientes de la temperatura
- Lectura individual o modos de lectura continuas
- Protocolo de calibración simple

Considerando que el voltaje de funcionamiento del sensor tiene un rango de 3.3 a 5V, es necesario el acondicionamiento del sensor para su correcta operación, se utiliza un regulador de voltaje de 5 V, para alimentar al sensor. El sensor cuenta con un circuito propio para el manejo de la señal proveniente del electrodo. Que consta de 6 pines que son: Gnd (Tierra), Tx, Rx, Vcc y Prb.

5.2.1.3. SENSOR DE NIVEL

Para controlar el nivel de agua dentro del tanque alimentador, se mide el valor y se envía la señal eléctrica al controlador para ejecutar una orden de programación con un sensor de nivel con rango de 0 a 240 mm aproximadamente, con el fin de enviar la cantidad de agua a ser tratada.

Una matriz de decisión mostrada en la Tabla 36, se ha utilizado para seleccionar el sensor adecuado para determinar el nivel de agua en el tanque alimentador.

Tabla 36.

Matriz de decisión sensor de nivel

Factor de decisión	Factor de ponderación	Sensor SHARP IRED		Sensor ultrasónico SRF04	
Costo	2	6	1.8	9	2.4
Funcionalidad	2	9	1.8	9	1.8
Disponibilidad	1	7	0.7	9	0.9
Rango	3	7	2.1	9	2.7
Sensibilidad	2	9	1.8	8	1.6
Total	10	8.2		9.4	

Para evaluar los factores de decisión se han tomado valores entre 1 a 10, siendo un 1 un valor poco favorable para el sistema y 10 muy favorable. Según la Tabla 33 el sensor más adecuado es el sensor ultrasónico SRF04. El sensor seleccionado tiene una alta disponibilidad en el mercado y su sensibilidad es aceptable para la medición de líquidos.

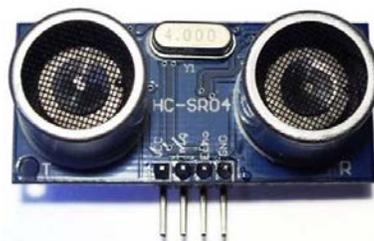


Figura 28. Sensor Ultrasónico SRF04

Fuente: http://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-405162274-sensor-de-ultrasonido-sr04-proyectos-electronico-_JM

El sensor SRF04 es detector de proximidad o medidores de distancia, que emiten sonidos a altas frecuencias y miden el tiempo que la señal tarda en regresar después de chocar contra un objeto, transformándola en señal eléctrica.

Este sensor se controla mediante dos hilos de comunicación y dos de alimentación. Por uno de los hilos se envía el pulso de disparo y en el otro recibimos el pulso de eco, cuya amplitud es directamente proporcional a la distancia a la que se encuentra el objeto detectado.

En la Tabla 37, se especifica las características de este sensor ultrasónico.

Tabla 37.

Características Sensor Ultrasónico SRF04

Tensión	5 V
Consumo	30 mA-50 mA (Max)
Distancia mínima	3 cm
Distancia máxima	300 cm
Pulso de Disparo	10 μ S min TTL
Pulsos de Eco	100 μ S- 18 mS
Retardo entre pulsos	10 mS mínimo

Considerando que el voltaje de funcionamiento del sensor SRF04 de 5V, es necesario el acondicionamiento del sensor para su correcta operación, se utiliza

un regulador de voltaje de 5 V, para alimentar al sensor. El sensor consta de 4 pines que son: Gnd (Tierra), Eco, Trigger y Vcc. Dichas señales que se envían de la placa de control se hace mediante una bornera de conexión, debido a la ubicación que se encuentra el electrodo de la placa de control.

5.2.2. SELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR

La placa Arduino MEGA 2560 es seleccionada como microcontrolador para el prototipo, por las siguientes razones:

- Simplifica el trabajo de programación, código abierto y es flexible para los usuarios.
- Posee librerías y sensores exclusivamente para Arduino, teniendo una conexión y adquisición de datos más sencilla.
- Bajo costo, al ser una placa embebida es más fácil su uso y adaptación de shields para realizar trabajos más robustos.

Las características de la placa Arduino MEGA 2560 se las presenta en la Tabla 39.

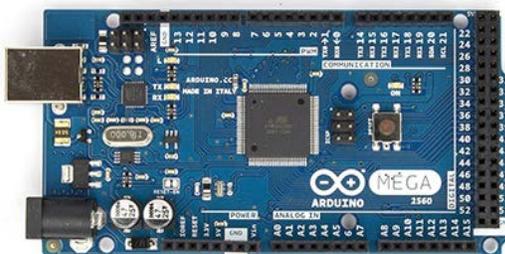


Figura 29. Placa Arduino MEGA 2560

Fuente: <https://paruro.pe/productos/tarjetas-de-desarrollo/tarjetas-de-microcontroladores/arduino-mega-2560-rev-3>

Tabla 38.

Características Arduino MEGA 2560

Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Pines Digitales	54 (15 proporcionan PWM)
Pines de entrada analógica	16
Corriente continua para entradas y salidas digitales	40mA
Corriente para el pin de 3.3V	50mA
Memoria Flash	256KB de los cuales 8KB son para gestor de arranque
SRAM	8KB
EEPROM	4KB
Velocidad de reloj	16 MHz

5.2.3. SELECCIÓN DE ACTUADORES

5.2.3.1. FUENTE AC PARA ELECTROCOAGULACION

Como se explicó en el Capítulo 3, se utilizó un voltaje de 24 VAC y una corriente en promedio de 6 A para el proceso de electrocoagulación. El circuito de alimentación para los electrodos consta de un fusible, una resistencia (niquelina) y borneras de conexión. Se toma la corriente directamente de la red eléctrica 110VAC y con un divisor de voltaje (resistencia), se alcanza el voltaje y corrientes necesarias para nuestro circuito.

Debido a que el proceso se lo opera automáticamente, es necesario una salida de potencia para poder controlar el paso de la corriente hacia los electrodos.

5.2.3.2. AGITADORES MAGNETICOS

Un agitador, también conocido como mezclador, es un instrumento que tiene como finalidad mezclar y revolver sustancias mediante la agitación.

Es un equipo electrónico compuesto por un motor que gira en un rango determinado de revoluciones por minuto; al cual se le adicionan campos magnéticos, los cuales permiten controlar una barra magnética que está sumergida en la solución a agitar. Estas barras magnéticas están provistas de aislación gracias a que están compuestas de material inerte para que no puedan alterar la solución en la que se sumerjan.

El prototipo estará equipado con dos agitadores magnéticos; el primer agitador será instalado en el tanque alimentador para lograr una mezcla homogénea de la sal que se le adiciona al agua residual para mejorar la conductividad, el segundo agitador será instalado en el tanque reactor para conservar homogeneidad en la solución durante el proceso de electrocoagulación.

Estos agitadores magnéticos constan de motores de 12 VDC, los cuales harán girar la barra magnética a velocidad controlada por ancho de pulso a través de la placa Arduino.

5.2.3.3. ELECTROVALVULAS

Las válvulas se emplean para controlar la cantidad de fluido a través de una tubería. Estas pueden ser mecánicas o eléctricas, conociéndose estas últimas como electroválvulas. (Mott, 2006)

Las electroválvulas son dispositivos que responden a pulsos eléctricos, es decir cuando corriente circula a través del solenoide es posible abrir o cerrar la válvula controlando, de esta forma, el flujo del líquido. Al circular corriente por el solenoide se genera un campo magnético que atrae el núcleo móvil y al finalizar el efecto del campo magnético, este regresa a su posición inicial.

Se requieren de dos electroválvulas en la máquina, la primera para permitir el paso de agua del tanque alimentador hacia el tanque reactor, y la segunda

para permitir el paso del agua ya tratada del tanque reactor al tanque de recepción o salida.



Figura 30. Electroválvula SmartSolu 2W-15P

Las electroválvulas seleccionadas son las SmartSolu 2W-15P de ½ pulg que trabajan a 12 VDC, y soportan una presión de 0 a 8 Bar. Se requiere el control del accionamiento de cada una de estas válvulas mediante la placa Arduino.

5.2.3.4. MOTORES PARA SISTEMA REMOVEDOR DE LODOS

Para la selección de los motores del sistema removedor de lodos (desnatador), primero se realiza la comparación de varios tipos de motores, con el fin de elegir la mejor opción. En la Tabla 40 se muestran las características más representativas de un grupo de motores.

Tabla 39.

Características diferentes motores

Motor DC	Micro Motor Con Caja Reductora	Servomotor
La velocidad depende del voltaje aplicado	La velocidad depende del voltaje aplicado	La velocidad depende de una señal de entrada

CONTINUA →

		que se envíe a su circuito de control.
Su velocidad se regula solamente con una fuente variable de voltaje	Su velocidad se regula con una fuente de tensión variable	Su velocidad se regula con la variación de la señal de entrada
Control de posición relativamente fácil	Control de posición relativamente simple	Fácil control de posición
El mantenimiento requerido es mínimo	Requieren mayor mantenimiento	Debe tener un mantenimiento periódico
Diseño para varias velocidades	Diseño para multi-velocidad	Diseño para multi-velocidad
Poco preciso	Medianamente preciso	Muy preciso
Liviano	Liviano	Pesado
Mediano Torque	Alto Torque	Mediano Torque
Bajo Costo	Medio Costo	Alto Costo

El análisis para la elección del actuador fue de acuerdo a los requisitos necesarios para esta aplicación que son alto torque, baja velocidad y peso, además de no necesitar control de posición exacto, por lo tanto el micro motor es el actuador que se ajusta a los requerimientos por sus características técnicas.



Figura 31. Micro motor con caja reductora 163F3F

Se ha seleccionado el micro motor 163F3F, el cual tiene integrado una caja reductora con una relación 150:1 que nos proporciona 2.9 Kgf a 200 rpm.

5.2.3.5. BOMBA DE AIRE

Como se mencionó anteriormente, el sistema de aireación que se instalará consta de una bomba de aire OXIBOOST APR 200 que suministra un caudal de 200 l/min, y funciona con un voltaje de alimentación de 110VAC.



Figura 32. Bomba de Aire OXIBOOST APR 200

Debido a que el proceso se lo opera automáticamente, es necesario la activación de una salida de potencia para accionar el encendido de la bomba de aire.

5.2.3.6. PANTALLA TACTIL

La pantalla táctil permite la interacción con el usuario a través de una manipulación por parte de éste con la superficie de la pantalla.

Las pantallas táctiles, debido a sus características, actúan como dispositivos de entrada / salida, es decir es posible ingresar datos y extraer los resultados. En otras palabras, la pantalla táctil permite que el usuario introduzca información al sistema y también se encarga de mostrar el resultado del procesamiento de dicha información. (Definicion, 20015).

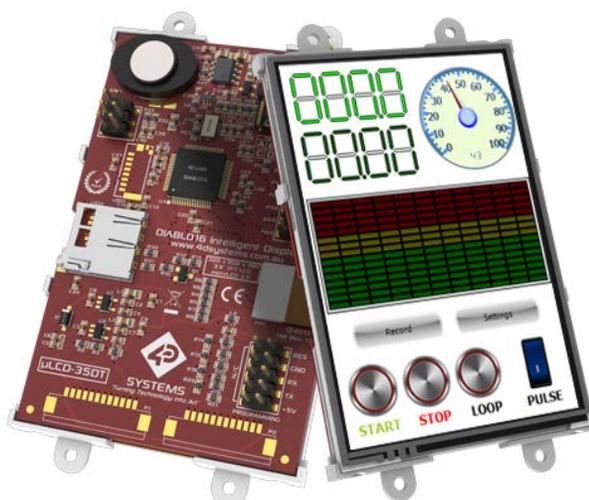


Figura 33. Pantalla táctil uLCD-32PTU-AR

Fuente: http://www.4dsystems.com.au/product/uLCD_32PTU-AR

La pantalla táctil uLCD-32PTU-AR para Arduino, es la pantalla que se usará debido a su conexión sencilla y programación rápida por medio de software exclusivo para la misma.

A continuación se detallan las características de la pantalla táctil.

Tabla 40.

Características pantalla táctil uLCD-32PTU-AR

Dimensiones	56.9 x 97.6 x 15.8 mm
Área de Visualización	49.7 x 77.0 mm
Resolución	480x320 HVGA, RGB 5K
Fácil Conexión	5 Pines: VCC, TX, RX, GND y RESET
Memoria	Micro-SD 4 GB
Voltaje de Operación	4 a 5.5 V
Peso	50 gramos

5.2.4. DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO PCB

Para el diseño de la placa controladora se implementaron bloques separados de acuerdo a la funcionalidad de los mismos, estos son: bloque de alimentación, de potencia, de instrumentación, de presentación de datos y, microcontrolador.

5.2.4.1. BLOQUE DE ALIMENTACIÓN

En este bloque se establecen los valores de referencia que se necesitan para la alimentación de nuestros dispositivos electrónicos. Se utilizará un integrado 7812, que es un regulador de 12 V que servirá para alimentar a los agitadores magnéticos, electroválvulas, y alimentación del microcontrolador. El integrado 7806, es un regulador de 6 V que se utilizará para alimentación de los micromotores del sistema de remoción de lodos. Un integrado 7805, es un regulador de 5 V que se utilizará para los sensores y activación de las bobinas de los relés que activarán el transformador, bomba de aire y bomba de agua.

Estos reguladores mantienen un voltaje constante y filtran cualquier tipo de ruido proveniente de la fuente; y que pueden ocurrir debido a que el circuito cuenta con motores, por lo que se adicionan filtros pasa altos y pasa bajos para evitar o reducir estos ruidos.

5.2.4.2. BLOQUE DE POTENCIA

El bloque de potencia es el encargado del funcionamiento óptimo de los actuadores que constan en el prototipo, estos son: agitadores magnéticos, electroválvulas, motores para el sistema de remoción de lodos, fuente de corriente alterna para el proceso de electrocoagulación y sistema de aireación.

El bloque de potencia se constituye de 3 salidas a relés de 5V de activación y que manejan hasta una corriente de 10 [A]; y de 4 salidas por medio de transistores Darlington.

Los relés son activados por un transistor 2N3904 en corte y saturación cada uno, disparados desde las dos salidas configuradas. Las bobinas de los relés tienen diodos en antiparalelo para controlar las contracorrientes.

Los transistores Darlington TIP 122 trabajan en corte y saturación cada uno, de tal manera que en las borneras se puede conectar directamente los actuadores necesarios en la configuración que se requiera.

5.2.4.3. BLOQUE DE INSTRUMENTACIÓN

Es el bloque constituido para el acondicionamiento de los sensores, que disponen de conexión con el microcontrolador para poder medir las distintas variables por medio de las señales enviadas por los sensores.

Los sensores están acoplados son: el sensor de pH, sensor de conductividad, y sensor de nivel de agua en el tanque alimentador.

5.2.4.4. BLOQUE DE PRESENTACIÓN DE DATOS

Se implementó una pantalla TFT uLCD-32PTU-AR para una fácil visualización de datos, procedimientos, y configuraciones.

Esta pantalla táctil de 3.2", que cuenta con una rápida conexión al microcontrolador Arduino, consume poca energía, y se la utiliza en la visualización y configuración de parámetros de operación para el proceso de electrocoagulación.

5.2.4.5. BLOQUE DEL MICROCONTROLADOR

El bloque del microcontrolador Arduino MEGA 2560 controla las entradas (sensores) y salidas (actuadores) presentes en el proceso de electrocoagulación.

En la Tabla 42, se indica las entradas (instrumentación) y salidas (actuadores) que controla el microcontrolador Arduino MEGA 2560.

Tabla 41.

Entradas y Salidas Arduino MEGA 2560

CANT.	DISPOSITIVO	DESCRIPCION
ENTRADAS		
1	Sensor Conductividad	Medir el valor de conductividad en el tanque alimentador
1	Sensor pH	Medir el valor de pH en el tanque de recepción.
1	Sensor ultrasónico	Medir el nivel de agua que se encuentra en el tanque alimentador.
SALIDAS		
2	Agitadores Magnéticos	Encendido de los agitadores para mantener una mezcla homogénea, en el tanque alimentador y en el tanque reactor
1	Fuente AC para electrocoagulación	Activación del circuito para el transformador 24V/10A para el proceso de electrocoagulación.
2	Micro motores	Encendido de los micromotores para el movimiento del removedor de lodos.
2	Electroválvulas	Activación de las electroválvulas
1	Bomba de Aire	Encendido de la bomba de aire para el sistema de aireación.
1	Pantalla Táctil	Interfaz Hombre-Máquina, para el control y visualización del proceso de electrocoagulación.

5.2.4.6. CÁLCULO DE ANCHO DE PISTAS

Para hacer el cálculo debemos tener en cuenta que la temperatura de trabajo de la placa es de 27°C, por la generación de calor de la resistencia. El material

de los PCB es el sustrato FR4, el cual tiene una temperatura máxima de trabajo de 130°C según la norma IPC-2221 se escoge una temperatura de trabajo de 100 °C por seguridad, por lo tanto el aumento de temperatura será de $T_r = 100 - 27 = 73^\circ C$ y la corriente máxima que vamos a manejar en la placa es de 2A. Una vez determinada la temperatura y corriente nos referimos a la Figura 34 de la norma IPC-2221, donde se establece que la sección deberá ser 15ft².

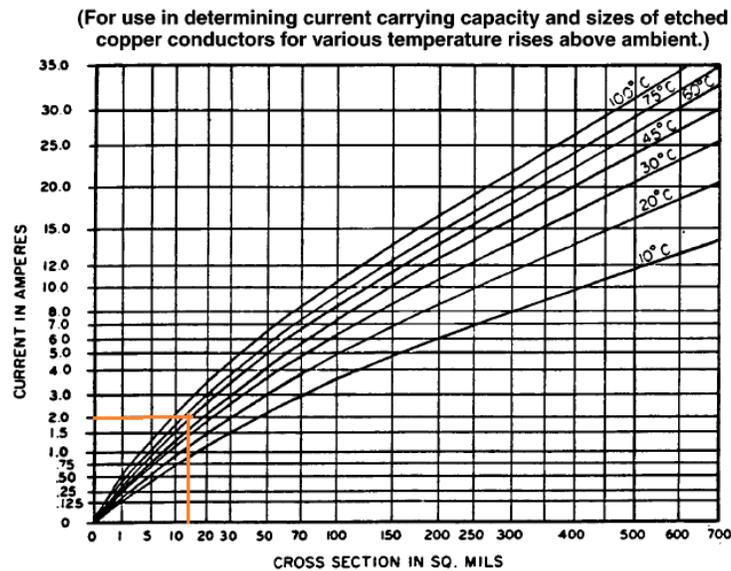


Figura 34. Sección Transversal de la pista vs corriente

Fuente: (IPC-2221, 1998)

Con el valor de sección de 15 ft² y, con el valor del sustrato FR4 que tiene una densidad de 1 oz/ft², nos referimos a la Figura 35, que nos sugiere que el ancho del conductor sea de 0.012 ft.

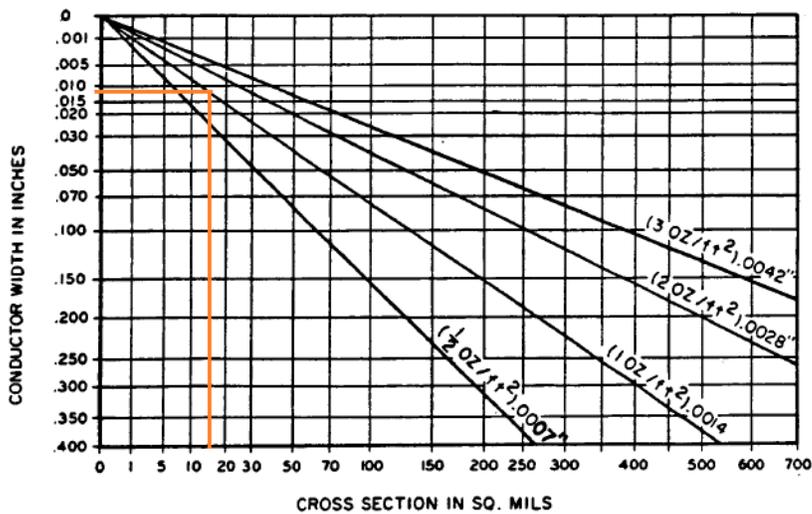


Figura 35. Sección transversal vs ancho de pista

Fuente: (IPC-2221, 1998)

El diseño de la placa de circuito impreso se utilizó un ancho de pista de 12TH con lo cual garantizamos soportar 2A en el circuito, dibujado en el Anexo 2 mediante el complemento ARES del software PROTEUS.

5.3. OPERACIONALIDAD TEÓRICA DE VOLTAJE E INTENSIDAD DEL REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN

Las variables consideradas para el proceso son el voltaje, corriente.

5.3.1. VOLTAJE

Voltaje o Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, es la energía necesaria de una fuerza eléctrica para mover una carga desde un punto hasta otro.

$$V_{placa} = \frac{V_{fuente}}{n_{elect}}$$

(Atkins, 2005)

$$V_{placa} = \frac{24}{15} = 1,6 \text{ voltios}$$

5.3.2. INTENSIDAD

Es el flujo de electrones que recorren un material. La corriente eléctrica depende de la conductividad eléctrica del agua a tratar, y está dada por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1}{R} = \frac{C * A_{elect}}{d_{elect}}$$

(Maron, 1994)

Donde:

C: conductividad eléctrica

R: resistencia

Reemplazando la ecuación anterior en la ley de Ohm que dice que la corriente viene dada por el cociente entre el voltaje y la resistencia que ofrece el conductor por donde atraviesa la corriente. Entonces quedaría:

$$I = \frac{A_{elect} * V_{placa} * C}{d_{elect}}$$

$$I = \frac{28cm^2 * 1,6v * 150 \frac{mS}{cm}}{1,1cm} = 6,1 A$$

6. RESULTADOS

Concluida la construcción del prototipo a nivel de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación, se realizaron tres ensayos para comprobar los porcentajes de remoción de DQO, turbidez, color y variación de pH luego del tratamiento. Los resultados de los ensayos se resumen en las Tabla 43-Tabla 46. Cabe notar que el prototipo de electrocoagulación tiene un óptimo funcionamiento, pues los valores de DQO, turbidez, color y pH se encuentran por debajo de los límites de descarga de efluentes al alcantarillado, cumpliendo de esta manera con el objetivo de esta investigación.

Tabla 42.

Medición de DQO en los ensayos del prototipo a nivel de laboratorio

	REPETICION 1	REPETICION 2	REPETICION 3	REPETICION 4	PROMEDIO	ppm DQO	DQO (mg/l)
MUESTRA	0.047	0.053	0.058	0.045	0.051	39.213	980.314
ENSAYO 1	0.018	0.02	0.02	0.015	0.018	12.500	312.504
ENSAYO 2	0.019	0.025	0.023	0.029	0.024	17.226	430.655
ENSAYO 3	0.019	0.024	0.019	0.028	0.023	15.993	399.833

Tabla 43.

Medición de Turbidez en los ensayos del prototipo a nivel de laboratorio.

	REPETICION 1	REPETICION 2	REPETICION 3	TURBIDEZ (FNU)
MUESTRA	958	946	987	964

CONTINUA 

ENSAYO 1	21	24	20	22
ENSAYO 2	12	14	15	14
ENSAYO 3	15	17	21	18

Tabla 44.

Medición de Color Real en los ensayos del prototipo a nivel de laboratorio

	REPETICION	REPETICION	REPETICION	COLOR
	1	2	3	REAL (PtCo)
MUESTRA	820	805	8111	3245
ENSAYO 1	169	170	175	171
ENSAYO 2	51	48	46	48
ENSAYO 3	65	63	68	65

Tabla 45.

Medición de pH en los ensayos del prototipo a nivel de laboratorio

	REPETICION	REPETICION	REPETICION	
	1	2	3	pH
MUESTRA	10.25	10.59	10.85	10.56

CONTINUA 

ENSAYO 1	8.96	8.9	8.98	8.95
ENSAYO 2	8.97	8.95	8.95	8.96
ENSAYO 3	8.98	8.95	8.96	8.96

En las Figura 36-Figura 38 se muestran los porcentajes de remoción de DQO, Turbidez y Color, y en la Figura 39 la variación de pH luego del tratamiento desarrollado en esta investigación.

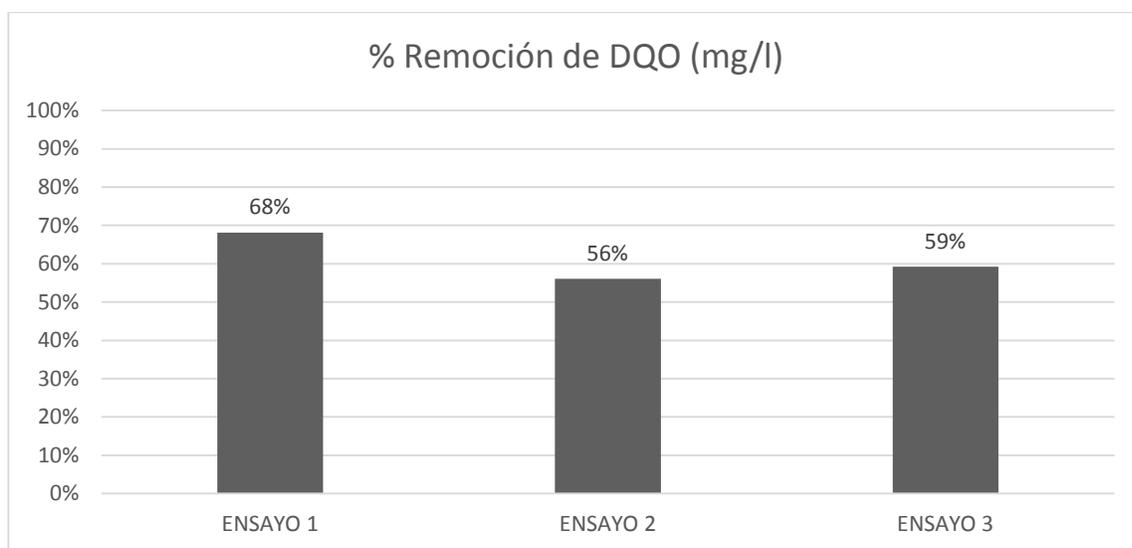


Figura 36. Porcentaje de Remoción de DQO en ensayos del prototipo a nivel de laboratorio.

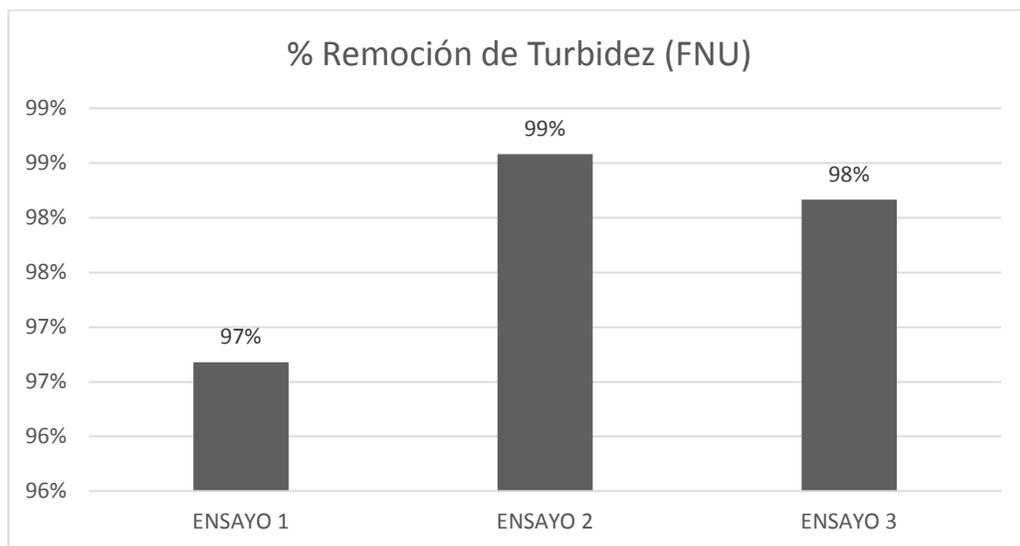


Figura 37. Porcentaje de Remoción de Turbidez en ensayos del prototipo a nivel de laboratorio.

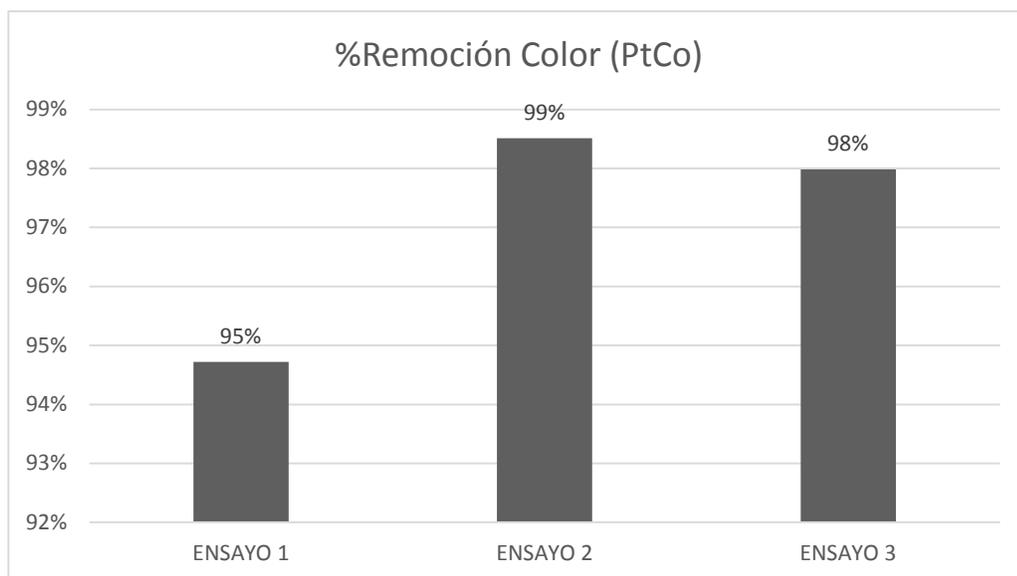


Figura 38. Porcentaje de Remoción Color en ensayos del prototipo a nivel de laboratorio.

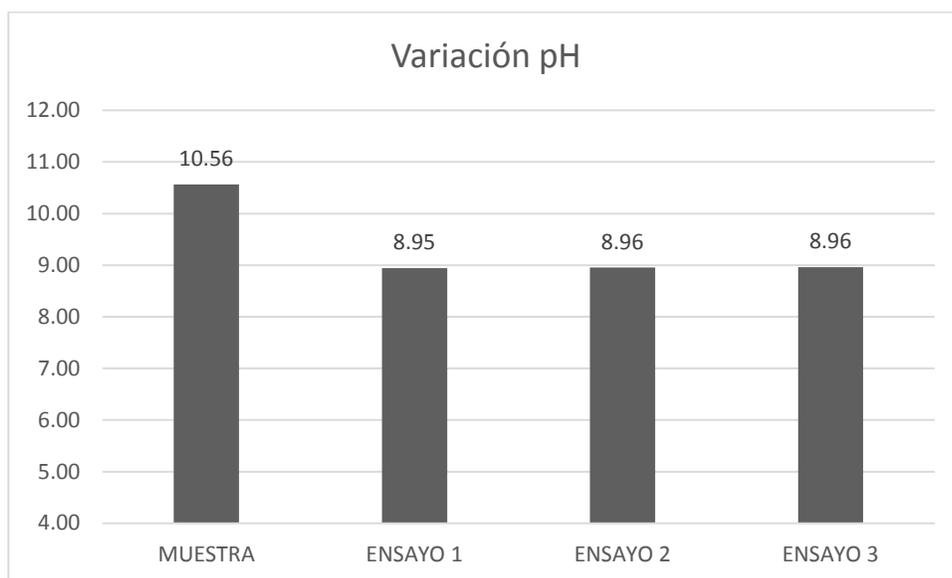
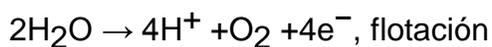
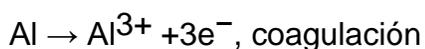


Figura 39. Variación de pH en ensayos del prototipo a nivel de laboratorio.

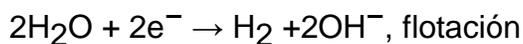
Como se puede observar en la Figura 36 se obtuvieron altos porcentajes (68%) de remoción de DQO. El agua tratada alcanza valores de DQO entre 310 y 430 mg/L, los cuales son menores al límite (500 mg/L) que fija la legislación ambiental ecuatoriana (TULSMA, 2013), para descarga del agua residual en el alcantarillado. En cambio en la Figura 37 y Figura 38, se constata que el tratamiento de electrocoagulación produce una elevada remoción de Turbidez y Color, con porcentajes de remoción de 99% para ambos parámetros.

La corriente requerida para sobrepasar el diferencial de potencia que se encuentra en equilibrio en el agua, es aplicada a los electrodos, produciendo un diferencial de potencial en el ánodo y cátodo. En los electrodos de aluminio se producen las siguientes reacciones electroquímicas (Wang et al., 2008):

En el ánodo



En el cátodo:



Dependiendo del pH del medio acuoso, los iones Al^{3+} dan lugar a la formación de $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$ y $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, con estos hidroxilos y poli-hidroxilos de aluminio se obtiene una mejor remoción de contaminantes (Ge et al., 2004), por la fuerza de absorción que tienen para capturarlos, generando mayor coagulación. Adicionalmente, las burbujas de gas generadas por la electrolisis del agua provocan flotación de los contaminantes y coagulación de los materiales (Wang et al., 2008).

Un aumento de la corriente eléctrica, aumenta la disolución anódica de los electrodos de aluminio, generando mayor precipitación de las partículas contaminantes; por otra parte la tasa de formación de burbujas aumenta, mientras que el tamaño de las mismas disminuye por el aumento de la corriente eléctrica, este efecto es beneficioso para una alta cantidad de remoción de contaminantes debido a la flotación de H_2 . (Merzouk et al., 2009).

En la Figura 39 se observa la disminución de pH del agua ($\text{pH} \approx 8.95$) al finalizar el proceso. De manera que el agua alcanza un pH adecuado para la descarga a la alcantarilla, valor que está dentro del rango de pH para descarga de aguas residuales a la alcantarilla (5-9). (TULSMA, 2013).

La adición de Cloruro de Sodio (NaCl), aumenta la eficiencia en la remoción de DQO, pero un aumento en exceso de este compuesto químico, puede transformar $\text{Al}(\text{OH})_3$ en AlCl_4^- el cual hace decrecer la eficiencia en la remoción. (Wang et al, 2009).

La electrocoagulación es un proceso químico y físico muy complejo que no ha sido estandarizado. Los rangos de voltaje que han sido usados no son el

resultado de los cálculos teóricos, por tal motivo hay necesidad de realizar estudios electroquímicos in situ para la anodización y electrolisis que afectan a los electrodos en rangos de 10 a 60 V. (Mollah, 2001).

6.1. ANÁLISIS DE COSTO

El consumo de energía y el consumo del material de sacrificio (electrodos), son necesarios para determinar el valor de implementación de este proceso en la industria ecuatoriana.

Para calcular el consumo de energía se utiliza la fórmula:

$$Consumo_{Energético} = \frac{V * I * t}{vol}$$

(Ozyonar, 2010).

Siendo:

V=voltaje [V]

I= corriente [A]

t=tiempo de operación de electrocoagulación [s]

vol= volumen de agua tratada [m3]

Hay una relación directa entre la corriente suministrada y el consumo del electrodo, de acuerdo a la ley de Faraday se determinar la fórmula para el consumo del electrodo:

$$Faraday/m^3 = \frac{I * t}{F * vol}$$

$$Consumo_{Electrodo} = \frac{I * t * M_w}{z * F * vol}$$

(Ozyonar, 2010).

Donde:

F= Constante de Faraday (96485 C/mol)

Mw= Masa molar del aluminio (26.98 g/mol)

z= número de electrones libres (z=3)

Reemplazando los valores en las fórmulas tenemos los siguientes valores:

$$Consumo_{Energético} = \frac{24 [V] * 7 [A] * 30 [min]}{10 [L]} = 8.4 \text{ kWh}/m^3$$

$$Consumo_{Electrodo} = \frac{7 [A] * 30 [min] * 26.98 \left[\frac{g}{mol} \right]}{3 * 95.485 \left[\frac{C}{mol} \right] * 10 [L]} = 0.117 \text{ kgAl}/m^3$$

El costo de operación teniendo en cuenta el costo del kWh en el país y el costo del kg Al, se calcula con la fórmula:

$$Costos \text{ de operación} = X * Energia_{Consumo} + Y * Electrodo_{Desgaste}$$

Donde:

X= 0.08 \$/kWh

Y=4.5 \$/kg Al

$$Costos \text{ de operación} = 0.08 * 8.4 \left[\frac{kWh}{m^3} \right] + 4.5 * 0.117 \left[\frac{kgAl}{m^3} \right] = 1.20 \text{ $}/m^3$$

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- En el presente proyecto se logró diseñar y construir satisfactoriamente un reactor prototipo a nivel de laboratorio con una capacidad de 10 litros para el tratamiento de aguas residuales de la industria textilera mediante electrocoagulación. El agua tratada resultante cumple con los parámetros fijados en la Norma de Calidad Ambiental y Descarga de Efluentes, TULSMA, para descarga al alcantarillado público, lo cual fue constatado con análisis de laboratorio.
- El prototipo diseñado tiene como finalidad ser utilizado para investigaciones de laboratorio y demostraciones, es por tal motivo que se diseñó la máquina para bajo volumen de agua, sin embargo tiene las mismas funcionalidades que una planta industrial real para tratamiento de agua residual textil para descarga al alcantarillado. Si el objetivo es un tratamiento industrial, se necesitara mayor corriente y voltaje para reducir el tiempo de proceso por electrocoagulación, necesitando una mayor inversión para adquirir un transformador de mayor potencia.
- Con la caracterización del agua residual a ser tratada se determinó las propiedades químicas iniciales del agua, lo que facilitó el diseño experimental y estadístico del proceso. El análisis estadístico posteriormente ayudó a determinar las condiciones óptimas de operación del proceso de electrocoagulación, entre las que se incluye: la intensidad de corriente (7A), el voltaje (24VAC), el material del electrodo (Al), la forma del electrodo (placa rectangular con orificios), la separación entre electrodos (11mm), conexión eléctrica de los electrodos (bipolar en serie), la conductividad eléctrica (150 mS/cm), el pH inicial (5-9). Fijadas estas condiciones se obtuvieron elevados porcentajes de remoción de color, turbidez, y DQO.

- El tiempo de electrocoagulación es un parámetro influyente en el proceso, debido a la formación y concentración de los hidroxilos metálicos. El consumo energético y el desgaste de los electrodos, también están en función del tiempo teniendo un costo bajo de \$ 1,20 por cada metro cúbico de agua a tratar, lo que representa un ahorro considerable si se desea implementar el proceso en el tratamiento de aguas residuales industriales.
- Para el diseño del tanque reactor se consideraron varias condiciones de uso y de seguridad de los operadores. Una de ellas se relaciona con el cambio sencillo de la conexión eléctrica de los electrodos, y la ubicación de estos evita el contacto directo con el operador. Además, se ubicó la resistencia eléctrica de tal manera que no puede ser manipulada por el operador, previniendo de esta manera accidentes laborales, integridad y fallo del sistema eléctrico.
- La pantalla táctil 4D System, al tener un entorno de programación WYSIWYG (What You See Is What You Get), permite que la interfaz Humano-Máquina sea mucho más amigable, de esta manera la programación de la pantalla se simplifica y se puede incluir más opciones para interactuar y esto a su vez permite que el operador tenga una mejor visualización y registro del tratamiento de aguas empleando el prototipo.
- Con la instrumentación utilizada en el prototipo se pudo constatar que los errores que presentan los sensores de potencial de hidrogeno y conductividad estuvieron en el rango de $\pm 7\%$ y 9% respectivamente. Estos errores se corrigieron con programación logrando la reducción del error a $\pm 5\%$. El tiempo de respuesta de los sensores fue aceptable, siendo de 2 segundos por medida, resultado del procesador del microcontrolador de los sensores que necesita un periodo de 2 segundos para recibir una nueva lectura.
- Se comprueba que la Mecatrónica como ciencia integral de la electrónica y mecánica, ayuda en general a implantar procesos industriales eficientes y en particular apoya al desarrollo de un tratamiento de agua residual textil

mediante la electrocoagulación, proceso controlado por un sistema en tiempo real, es decir el operador puede intervenir durante el proceso para registrar, inspeccionar y controlar los parámetros de funcionamiento del reactor construido.

7.2 RECOMENDACIONES

- Estudiar las características físico-químicas de los lodos concentrados y desalojados del proceso de electrocoagulación para una posible reutilización. Por ejemplo, reuso como abono.
- Para mantener la integridad el dispositivo, es importante separar los circuitos de control y potencia a fin de que no existan saltos de corriente que afecten al normal funcionamiento de los elementos eléctricos y electrónicos.
- Por tratarse de un prototipo a nivel de laboratorio que será utilizado por estudiantes y profesores, puede desconectarse o descalibrarse los sensores, debido principalmente por la manipulación inadecuada de los mismos, lo que provoca lecturas erróneas, por lo que se recomienda un uso delicado y cuidadoso.
- Se recomienda instalar un agitador de paletas que este sumergido en el agua, pues los agitadores magnéticos utilizados en las pruebas con el prototipo, presentaron problemas de mezcla y homogenización del agua residual al añadir el electrolito.
- Se requiere analizar la disminución de los valores de pH luego de la electrocoagulación. Ya que el agua de descarga puede ser vertida en algún recurso hídrico natural o un sistema de riego.

8. BIBLIOGRAFIA

(s.f.).

4D System. (2015). *Workshop 4, Latest Workshop 4D System*. Obtenido de http://www.4dsystems.com.au/product/Development/4D_Workshop_4_IDE/

ABB. (19 de Marzo de 2015). Obtenido de <http://ab.rockwellautomation.com/es/Sensors-Switches/Limit-Switches>

Adhoum, N. M. (2004). Decolourization and removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by electrocoagulation. *Chemical Engineering Process*, 6(3), 325-333.

Arango, A. &. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Revista Universidad EAFIT*, 56-67.

Arango, A. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Universidad Autonoma del Estado de Mexico*, 57-69.

Arango, A. (2012). Efectos del pH y la conductividad en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. *Corporacion Universitaria Lasallista*, 5-18.

Atkins, P. (2005). *The elements of Physical Chemistry*. Nueva York: WH Freeman and Company.

Balzarini, G. L. (2008). *Infostat. Manual de Usuario*. Cordova, Argentina: Editorial Brujas.

Bayramoglu, M. K. (2004). Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation: economic evaluation. *Chemical Engineering Journal*, 128 (2-3), 155-161.

Bayramoglu, M. K. (2006). Technical and economic analysis of electrocoagulation for the treatment of poultry slaughterhouse wastewater. *Separation and Purification Technology*, 51 (3), 404-408.

Bolton, W. (2010). *Mecatrónica – Sistemas de Control Electrónico en Ingeniería Mecánica y Eléctrica*. AlfaOmega.

Chaves, P. (2008). Sensores analógicos utilizados en la automatización industrial. *Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería Eléctrica*.

Chen, X. C. (2000). Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, 19(1-2), 65-76.

Ciganda, L. M. (2004). Electrodo para medir pH. . Universidad de la República Oriental del Uruguay.

- Daneshvar, N. S. (2004). Decolorization of dye solution containing Acid Red 14 by electrocoagulation with a comparative investigation of different electrode connections. *Journal of Hazardous Materials. Mater*, B122 (1-2), 55-62.
- Definicion. (2015). *DEFINICION.DE*. Recuperado el 17 de Marzo de 2015, de <http://definicion.de/pantalla-tactil/>
- Echeverria, L. (20XX). Instrumentacion Mecanica y Mecatronica. *Departamento de Ciencia y Energia Mecanica*.
- EMAAP-Q. (2009). *Empresa Metropolitana de Alcantarillado y Agua Potable - Quito*. Obtenido de <http://www.aguaquito.gob.ec/memoria-de-sostenibilidad-2009>
- Ge, J. (2003). New bipolar electrocoagulation-electroflotation process for the treatment of laundry wastewater. *ELSEVIER*, 33-39.
- Guitierrez, H. D. (2008). *Analisis y diseno de experimentos*. (Segunda Edicion. ed.). Mexico.: McGraw-Hill Interamericana.
- Habibat, N. (2006). *Development of Biological Treatment System for Reduction of COD from Textile Waste Waster*. . Malasia.
- Horan, N. (1991). *Biological Wastewater Treatment Systems*. Chichester: Thomson Press.
- INEC. (2011). *Encuesta de Informacion Ambiental Economica en Empresas*.
- IPC-2221. (1998). *Generic Standard on Printed Board Design*.
- Janpoor, F. T. (2011). Treatment of laundry waste-water by electrocoagulation. *Journal Chemical Technology and Biotechnology*, 86(8),1113-1120.
- Khandegar, V. S. (2012). Electrochemical treatment of distillery spent wash using aluminum and iron electrodes. *Chemical Engineering Journal*, 20(3), 439-443.
- Khandegar, V. S. (2013). Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent – A review. *Journal of Environmental Management*, 128(2013), 949-963.
- Kim, T., Lee, Y., & Yang, L. (2004). Decolorization of dye solutions by a membrane bioreactor (MBR) using with-rot fungi. *Water Research. Elsevier Ltd.*, 5135-5141.
- Koby, M. S. (2006). Treatment of poultry slaughterhouse wastewater by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials. Master*, 133 (1-2), 172-176.

- Koyba, M. D. (2010). Decolorisation of aqueous reactive dye Remazol Red 3B by electrocoagulation. *Color Technology*, 126 (5), 282-288.
- Koyba, M. D. (2010). Decolorisation of aqueous reactive dye Remazol Red 3B by electrocoagulation. . *Color Technology.*, 126 (5), 282-288.
- Koyba, M. U. (2011). Treatment of potable wáter containing lo concetrnation of arsenic with electrocoagulation: different connection modes and Fe-Al electrodes. *Separation and Purification Technology*, 77 (3), 283-293.
- Kumar, P. C. (2004). Removal of arsenic from water by electrocoagulation. *Chemosphere*, 55(9), 1245-1252.
- Kuroda, Y. K. (2013). Effect of electrode shape on discharge current and performance with barrier discharge type electrostatic precipitator. *Journal of Environmental Management*, 57 (3), 407-415.
- Maron, S. &. (1994). *Fundamentos de FISICOQUÍMICA*. México: LIMUSA.
- Martinez, F. (2007). Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulacion y coagulacion convencional. *Universidad de Castilla la Mancha*, 17-38.
- Merzouk, B. M. (2010). Using electrocoagulation – electroflotation technology to treat synthetic solution and textile wastewater, two cases studies. *Desalination*, 250 (5), 573-577.
- Modirshahla, N. B.-A. (2008). Investigation of the effect of different electrodes and their connections on the removal efficiency of 4-nitrophenol from aqueous solution by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials. Master*, 154 (1-3), 778-786.
- Mollah, A. Y. (2001). Electrocoagulation (EC) - science and Applications. *ELSEVIER*, 29-41.
- Mollah, M. P. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials. Master*, B109 (1-3), 165-171.
- Mollah, M. S. (2001). Electrocoagulation (EC) – science and applications. *Journal of Hazardous Materials. Mater*, 84(1), 9-41.
- Moncayo, I. (2010). *Remoción de los colorantes textiles reactivos rojo 141, amarillo 84 y azun navy 171 eliminados en el agua residual, utilizando un inóculo compuesto seleccionado, bajo condiciones anaerobias a nivel de laboratorio.* . Sangolquí.
- Mott, R. L. (2006). *Mecanica de Fluidos* (Sexta Edicion ed.). Mexico: Pearson Educacion.

- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de Fluidos*. Pearson Education.
- Omega. (18 de Marzo de 2015). Obtenido de <http://es.omega.com/prodinfo/sondas-de-nivel-medicion.html>
- Orozco. (2005). *Bioingeniería de Aguas Residuales*. Bogotá: Acodal.
- Ozyonar Fuat, K. B. (2010). Operating cost analysis and treatment of domestic wastewater by electrocoagulation using aluminum electrodes. *Journal of Environmental Management*, 1(2011), 173-179.
- Pey, C. (2008). *Aplicación de Procesos de oxidación Avanzada para tratamiento y reutilización de efluentes textiles*. Valencia: Tesis de Ingeniería. Valencia: Universidad de Valencia.
- Quintero, L., & Cardona, S. (2009). *Tecnologías para la decoloración de tintes Indigo e Indigo carmin*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente.
- Restrepo, A., Ruiz, A., & Garces, L. (2006). La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Corporación Universitario Lasallista*, 59-74.
- Rice, E. W., Baird, R. B., & Eaton, A. D. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington, DC: American Public Health Association.
- Rodriguez, A. L. (2006). *Tratamientos Avanzados de Aguas Residuales Industriales*. Círculo de Innovación en tecnologías medioambientales y energía.
- Rodriguez, P. (20XX). *Diseño de Interfaces Hombre - Máquina (HMI)*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- Roessler, A., Cretenand, D., & Dossenbach, O. (2002). Direct electrochemical reduction of indigo. *Electrochim Acta* 47., 198-1995.
- Sensores, D. (16 de Marzo de 2015). *Sensores de Conductividad*. Obtenido de <http://www.guemisa.com/ambien/docus/completo%20conductividad.pdf>
- Sienko, M. J., & Plane, R. A. (1975). *Química*. Aguilar: Editorial Madrid.
- Streber, F. (1983). *Principios de Química*. México: Reverte.
- TULSMA. (2013). Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente. En *Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua. Libro VI. Anexo 1*.

- Vasudevan, S. K. (2011). Effects of alternating and direct current in electrocoagulation process on the removal of fluoride from water. *Journal Chemical Technology and Biotechnology*, 86 (3). 429-436.
- Verma, S. K. (2013). Removal of chromium from electroplating industry effluent using electrocoagulation. *Journal of Hazardous Toxic*, 17(2), 146-152.
- Vernier. (16 de Marzo de 2015). *Sonda de Conductividad Vernier*. Obtenido de <http://www.vernier-iberica.com/descargas/datos%20tecnicos/con-bta.pdf>
- Worldwide, E. (17 de Enero de 2015). *ERCO Worldwide*. Obtenido de <http://www.ercoworldwide.com/index.php/products/caustic/?lang=es>
- Zapata, L., & Rivera, D. (2014). Diseño e Implementación de un sistema de producción modular didáctico para el laboratorio de automatización industrial mecatrónica de la Espe. *Departamento de la Ciencia y Energía Mecánica*.
- Zaroual, Z. A. (2006). Contribution to the study of electrocoagulation mechanism in basic textile industry. *Journal of Hazardous Materials. Mater*, B131 (1-3),73-78.

9. ANEXOS

**ANEXO 1: PLANOS DE CONJUNTO Y DESPICE DEL
PROTOTIPO**

**ANEXO 2: DIAGRAMAS ELÉCTRICOS Y
ELECTRÓNICOS DEL PROTOTIPO**