

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

Trabajo de fin de carrera titulado:

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ELECTROCOAGULADOR APLICADO AL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA EMPRESA TESQUIMSA, PARA EL
LABORATORIO DE QUÍMICA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES DE
LA UISEK”

Realizado por:

MARÍA BELÉN GRIJALVA GONZÁLEZ

FERNANDO DANIEL MARIÑO POLO

Directora del proyecto:

Msc. SULY RODRIGUEZ

Como requisito para la obtención del título de:

INGENIERO/A AMBIENTAL

AÑO 2014

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

DECLARACION JURAMENTADA

Yo, FERNANDO DANIEL MARIÑO POLO, con cédula de identidad # 171994705-1, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento. A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



Fernando Daniel Mariño Polo

C.C.: 171994705-1

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

DECLARACION JURAMENTADA

Yo, MARÍA BELÉN GRIJALVA GONZÁLEZ, con cédula de identidad # 172258791-0, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



María Belén Grijalva González

C.C.:172258791-0

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ELECTROCOAGULADOR APLICADO AL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA EMPRESA TESQUIMSA, PARA EL LABORATORIO DE QUÍMICA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES DE LA UISEK”

“TITULO DEL PROYECTO DE FIN DE CARRERA”

Realizado por:

MARÍA BELÉN GRIJALVA GONZÁLEZ

FERNANDO DANIEL MARIÑO POLO

como Requisito para la Obtención del Título de:

INGENIERO/A AMBIENTAL

ha sido dirigido por el/la Profesor (a)

Msc. SULLY RODRIGUEZ

quien considera que constituye un trabajo original de su autor



FIRMA

Msc. SULLY RODRIGUEZ

DECLARATORIA PROFESORES TRIBUNALES

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

DIRECTOR: Msc. Suly Rodríguez

TRIBUNAL 1: Msc. Ana Rodríguez

TRIBUNAL 2: Dr. Carlos Ordoñez

Después de revisar el trabajo presentado, por los alumnos:

MARÍA BELÉN GRIJALVA GONZÁLEZ

FERNANDO DANIEL MARIÑO POLO

lo han calificado como apto para su defensa oral ante

el tribunal examinador



Msc. Suly Rodríguez

DIRECTOR



Msc. Ana Rodríguez

FIRMA TRIBUNAL 1



Dr. Carlos Ordoñez

FIRMA TRIBUNAL 2

Quito, 11 de Septiembre del 2014.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

DEDICATORIA

A mis padres, Iliana y Darío, quienes a lo largo de mi vida me han guiado por el camino de la honestidad y responsabilidad; su apoyo y amor incondicional, han sido la fuerza para alcanzar mis metas, demostrando su paciencia, perseverancia y entrega.

Son quienes me han enseñado que un padre y una madre pueden ser tus mejores amigos.

A mis abuelitos, Flérida y Edgar, a quienes muestro y profunda admiración y respeto por ser ejemplo de sincero amor y cariño. Por haber estado siempre a mi lado en los malos y buenos momentos de mi vida.

A mis hermanos, Rubén y Paolo, por alegrar y acompañar cada uno de mis días con sus locuras y sonrisas.

Los amo.

Belén

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

DEDICATORIA

A mis padres, Fernando y Mery, a mi hermana Ma. Fernanda, mi familia, mi fuente de seguridad y amor con la que sé que cuento incondicionalmente.

Cuentan conmigo para siempre.

Fernando Daniel

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

AGRADECIMIENTOS

Agradezco con todas las fuerzas de mi alma a nuestro Señor, Dios amado, por haberme dado salud y perseverancia para lograr mis objetivos, sin perder jamás la fe en Él y viendo al futuro con esperanza.

A nuestra tutora del proyecto MsC. Sully Rodríguez, por su participación y dirección en la investigación, demostrando su profesionalismo y paciencia.

A mi amigo y compañero de proyecto Daniel, por su colaboración y esfuerzo al realizar la presente investigación.

Belén

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a mis familias de lado de padre y madre, todos y cada uno de ustedes me han apoyado siempre de una u otra manera. Un agradecimiento especial a mi Ñaño Wilson Polo, que me ha apoyado académicamente siempre que lo he necesitado. A mi Ñaña Ivonne por su apoyo a nuestra familia. A mi Ñaño Iván por ser una fuente de alegría en mi vida.

A nuestra tutora del proyecto MsC. Sully Rodríguez, por su participación y dirección en la investigación, demostrando su profesionalismo y paciencia.

A mi amiga y compañero de proyecto Belén, por su colaboración y esfuerzo al realizar la presente investigación, gracias a ti estaremos caminando por la vida como ingenieros.

A mis amigos Belén, Ronny, Christian, Francisca y David, compañeros y amigos que encontré en la universidad y persistirán por toda la vida.

A personas especiales con las que he compartido mucho y me han dejado muy buenos recuerdos.

Daniel

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO I | 1 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN | 2 |
| 1.1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 2 |
| 1.1.1.1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA..... | 2 |
| 1.1.1.2. PRONÓSTICO | 2 |
| 1.1.1.3. CONTROL DE PRONÓSTICO..... | 3 |
| 1.1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... | 3 |
| 1.1.3. SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA..... | 3 |
| 1.1.4. OBJETIVO GENERAL | 4 |
| 1.1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 4 |
| 1.1.6. JUSTIFICACIONES..... | 4 |
| 1.2. MARCO TEÓRICO | 5 |
| 1.2.1. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO SOBRE EL TEMA..... | 5 |
| 1.2.2. ADOPCIÓN DE UNA PERSPECTIVA TEÓRICA | 7 |
| 1.2.3. MARCO CONCEPTUAL | 8 |
| 1.2.3.1. ELECTROQUÍMICA..... | 8 |
| 1.2.3.2. REACCIONES ÓXIDO-REDUCCIÓN..... | 9 |
| 1.2.3.3. CELDAS ELECTROQUÍMICAS:..... | 10 |
| 1.2.3.3.1. CELDA VOLTAICA O GALVÁNICA | 10 |
| 1.2.3.3.2. CELDA ELECTROLÍTICA..... | 11 |
| 1.2.3.4. POTENCIALES ESTÁNDAR DE ELECTRODO | 12 |
| 1.2.3.5. LEYES DE FARADAY | 16 |
| 1.2.3.6. ELECTROCOAGULACIÓN ¹⁸ | |

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

| | | |
|------------------|---|----|
| 1.2.3.6.1. | Factores que afectan la electrocoagulación..... | 19 |
| 1.2.3.7. | PARÁMETROS DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA RESIDUAL..... | 22 |
| 1.2.3.7.1. | DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO..... | 22 |
| 1.2.3.7.2. | POTENCIAL DE HIDROGENO (pH)..... | 22 |
| 1.2.3.7.3. | TURBIDEZ Y TRANSPARENCIA..... | 23 |
| 1.2.3.7.4. | TEMPERATURA..... | 23 |
| 1.2.3.8. | EMPRESA TESQUIMSA..... | 23 |
| CAPÍTULO II..... | | 26 |
| 2. | METODOLOGÍA..... | 26 |
| 2.1. | TIPO DE ESTUDIO..... | 26 |
| 2.2. | MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN..... | 26 |
| 2.3. | MÉTODO..... | 27 |
| 2.4. | DISEÑO DEL ELECTROCOAGULADOR..... | 27 |
| 2.4.1. | VARIABLES DE DISEÑO..... | 28 |
| 2.4.1.1. | CUERPO DEL EQUIPO:..... | 28 |
| 2.4.1.2. | ELECTRODOS:..... | 33 |
| 2.4.1.3. | DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS..... | 34 |
| 2.4.1.4. | NÚMERO DE ELECTRODOS:..... | 36 |
| 2.4.1.5. | AREA DE REACCION DE LOS ELECTRODOS:..... | 37 |
| 2.4.1.6. | VOLUMEN DEL AGUA RESIDUAL DENTRO DEL ELECTROCOAGULADOR..... | 37 |
| 2.4.2. | DISEÑO DÍGITAL DEL ELECTROCOAGULADOR..... | 39 |
| 2.5. | CONSTRUCCIÓN DEL ELECTROCOAGULADOR..... | 39 |
| 2.5.1. | CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR..... | 39 |
| 2.5.2. | TOMA DE MUESTRA..... | 42 |
| 2.5.3. | FUENTE DE ENERGÍA..... | 43 |

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

| | | |
|-------------------|---|----|
| 2.5.4. | CONEXIONES ELÉCTRICAS..... | 44 |
| 2.6. | MUESTRAS: | 45 |
| 2.6.1. | METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE MUESTRAS | 46 |
| 2.6.1.1. | METODOLOGÍA PARA ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO..... | 47 |
| | PROTOCOLO DE REGULARIZACIÓN DE pH | 53 |
| 2.6.1.2. | METODOLOGÍA PARA ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE RESULTADOS | 60 |
| 2.7. | OPERACIONALIDAD DEL ELECTROCOAGULADOR..... | 61 |
| 2.7.1. | TIEMPO DE RETENCIÓN | 61 |
| 2.7.2. | DIFERENCIA DE POTENCIAL ELÉCTRICA O VOLTAJE..... | 62 |
| 2.7.3. | INTENSIDAD DE CORRIENTE | 62 |
| 2.7.4. | CÁLCULO TEÓRICO DE VARIABLES DE OPERACIÓN | 65 |
| 2.7.4.1. | CÁLCULO TEÓRICO DEL VOLTAJE | 65 |
| 2.7.4.3. | CÁLCULO TEÓRICO DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE | 66 |
| 2.7.4.4. | MANUAL DE FUNCIONAMIENTO DEL ELECTROCOAGULADOR..... | 70 |
| 2.8. | SELECCIÓN DE INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN | 79 |
| 2.9. | VALIDEZ Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS | 79 |
| 2.10. | PROCESAMIENTO DE DATOS..... | 79 |
| CAPÍTULO III..... | | 80 |
| 3. | RESULTADOS | 80 |
| 3.1. | ANÁLISIS DE RESULTADOS | 85 |
| 3.1.1. | RESULTADOS SEGÚN LOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS POR EL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN..... | 85 |
| 3.1.2. | RESULTADOS SEGÚN LOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS DE LA TURBIDEZ DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS POR EL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN | 88 |

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

| | | |
|---------------------------|--|------------|
| 6.1.1. | RESULTADOS SEGÚN LOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS DEL pH DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS POR EL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN | 92 |
| 6.1.2. | RESULTADOS SEGÚN LOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS DE LA TEMPERATURA DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS POR EL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN..... | 96 |
| 6.1.3. | RESULTADOS SEGÚN LOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS POR EL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN..... | 102 |
| 6.1.4. | ANÁLISIS DE COSTOS DEL TRATAMIENTO DE ELECTROCOAGULACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE TESQUIMSA..... | 105 |
| 6.1.4.1. | COSTOS ECONÓMICOS POR CONSUMO ENERGÉTICO..... | 105 |
| CAPÍTULO IV | | 108 |
| 7. | DISCUSIÓN | 108 |
| 7.1. | APLICACIÓN PRÁCTICA..... | 108 |
| 7.2. | CONCLUSIONES | 108 |
| 7.3. | RECOMENDACIONES..... | 112 |
| BIBLIOGRAFÍA | | 132 |

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Celda galvánica Fuente: (Daub & Seese, 2003)..... | 10 |
| Figura 2: Celda Electrolítica Fuente: (Cabildo, Cornago, Esolástigo, Esteban, Lopez, & Saenz, 2013)..... | 11 |
| Figura 3: Sistema de electrocoagulación con ánodo de Aluminio. | 18 |
| Figura 4: Dimensionamiento de la carcasa del electrocoagulador | 32 |
| Figura 5: Zonas del electrocoagulador | 33 |
| Figura 6: Dimensionamiento de electrodos | 34 |
| Figura 7: Diseño digital del reactor de electrocoagulación..... | 39 |
| Figura 8: Vista superior de la carcasa del electrocoagulador | 40 |
| Figura 9: Vista lateral de la carcasa del electrocoagulador | 41 |
| Figura 10: Vista lateral del electrodo de Hierro..... | 41 |
| Figura 11: Vista lateral del electrodo de Aluminio | 42 |
| Figura 12: Toma de muestra del electrocoagulador..... | 43 |
| Figura 13: Vista frontal de la fuente de energía..... | 44 |
| Figura 14: Partes de la fuente de energía | 44 |
| Figura 15: Conexión monopolar con electrodos en serie (Arango & Garcés, 2007)..... | 45 |
| Figura 16: Conexiones eléctricas del electrocoagulador y fuente de energía..... | 45 |
| Figura 17: Equipo de medición de DQO | 47 |
| Figura 18: Equipo de medición de pH, temperatura y conductividad eléctrica..... | 51 |

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1: Potenciales Estándar de Electrodo de distintas reacciones de semicelda..... | 14 |
| Tabla 2: Propiedades del PMMA | 29 |
| Tabla 3: Material y cantidad para la construcción del reactor | 40 |
| Tabla 4: Promedio de Conductividad eléctrica por muestra | 67 |
| Tabla 5 : REFENCIAS DE RANGOS DE TRABAJO SEGÚN DIFERENTES TIPOS DE AGUAS RESIDUALES | 78 |
| Tabla 6: MUESTRA 1 (DETERGENTES ANIÓNICOS O TENSOACTIVOS) | 80 |
| Tabla 7: MUESTRA 2 (ACEITES Y GRASAS) | 81 |
| Tabla 8: MUESTRA 3 (DETERGENTES ANIÓNICOS O TENSOACTIVOS) | 82 |
| Tabla 9: Variables de funcionamiento para pruebas experimentales | 84 |
| Tabla 10: Resultados comparativos DQO inicial vs final de la muestra principal 1, semana 1 | 85 |
| Tabla 11: Resultados comparativos DQO inicial vs final de la muestra principal 2, semana 2 | 86 |
| Tabla 12: Resultados comparativos DQO inicial vs final de la muestra principal 3, semana 3 | 87 |
| Tabla 13: Resultados comparativos turbidez inicial vs final de la muestra principal 1, semana 1 | 89 |
| Tabla 14: Resultados comparativos turbidez inicial vs final de la muestra principal 2, semana 2 | 90 |
| Tabla 15: Resultados comparativos turbidez inicial vs final de la muestra principal 3, semana 3 | 91 |
| Tabla 16: Resultados comparativos pH iniciales vs final de la muestra principal 1, semana 1 | 93 |
| Tabla 17: Resultados comparativos pH inicial vs final de la muestra principal 2, semana 2 | 94 |
| Tabla 18: Resultados comparativos pH inicial vs final de la muestra principal 3, semana 3 | 95 |
| Tabla 19: Resultados comparativos temperatura inicial vs final de la muestra principal 1, semana 1 | 97 |
| Tabla 20: Resultados comparativos temperatura inicial vs final de la muestra principal 2, semana 2 | 98 |
| Tabla 21: Resultados comparativos temperatura inicial vs final de la muestra principal 3, semana 3 | 99 |
| Tabla 22: Resultados comparativos conductividad eléctrica inicial vs final de la muestra principal 1, semana 1 | 102 |
| Tabla 23: Resultados comparativos conductividad eléctrica inicial vs final de la muestra principal 2, semana 2 | 103 |
| Tabla 24: Resultados comparativos de conductividad eléctrica inicial vs final de la muestra principal 3, semana 3 | 104 |
| Tabla 25: Costos del sistema de electrocoagulación..... | 107 |

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el deterioro y pérdida de recursos naturales causado por las actividades industriales y antrópicas han ocasionado la preocupación y atención de la humanidad y la comunidad científica; por lo cual, se ha investigado y realizado un sin número de métodos de tratamientos para componentes ambientales, con el fin de regresarlos al ambiente con menor carga contaminante o sin ella; de esta forma, puedan ser asimilados por la naturaleza e incorporados nuevamente a los ciclos naturales sin perjudicarla ni afectarla.

El componente hídrico es de gran importancia para la vida en el planeta, sin embargo ha sido severamente contaminado y mal utilizado. Distintas investigaciones han propuesto y comprobado varias formas de tratamientos físicos, químicos y biológicos del agua. Entre los más efectivos e innovadores se puede mencionar la electrocoagulación o coagulación electroquímica.

Por lo tanto, el presente proyecto está encaminado a la implementación de un electrocoagulador en el Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK, con el fin de que los estudiantes y docentes puedan profundizar conocimientos de forma práctica sobre esta alternativa de tratamiento de aguas residuales. La funcionalidad del equipo se determina por el porcentaje de remoción de los siguientes parámetros físico-químicos del agua: demanda química de oxígeno, turbidez, potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica y temperatura. El tipo de muestra seleccionada es agua residual de la Empresa TESQUIMSA, la cual se dedica a la producción y comercialización de productos

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

químicos para lavados y mantenimientos industriales (ver anexo 1), además la empresa fabrica químicos para tratamientos de agua, aditivos para combustible, limpieza química de circuitos térmicos, insecticidas, tratamientos para madera, desinfectantes, desoxidantes fostatizantes y solventes.

1.1.EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1.1.DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

La Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK se ha enfocado en la formación de profesionales comprometidos con la conservación y preservación del ambiente, además en impartir conocimientos teóricos sustentados en el desarrollo sostenible, el cual establece un correcto aprovechamiento de los recursos naturales que satisfagan las necesidades presentes y futuras de los seres humanos.

Es indispensable que los estudiantes tengan aplicaciones prácticas a los conocimientos teóricos adquiridos, por lo tanto, la Facultad de Ciencias Ambientales ha implementado cuatro laboratorios equipados para la realización de ensayos, investigaciones, pruebas piloto, etc. Sin embargo, es notable el déficit de equipos destinados a la investigación de tratamiento y depuración de aguas residuales, en base a esto, es necesario diseñar y construir un electrocoagulador destinado al Laboratorio de Química de la Facultad.

1.1.1.2. PRONÓSTICO

En el caso que continúe la escasez de equipos aplicados en la investigación de tratamientos y depuración de aguas residuales, los estudiantes no podrán aplicar los conceptos y métodos

teóricos sobre tratamientos de agua residual y electroquímica en el Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK.

1.1.1.3. CONTROL DE PRONÓSTICO

La construcción y operatividad de un electrocoagulador aplicado al tratamiento de agua residual de la Empresa TESQUIMSA, para el Laboratorio de Química de dicha Facultad, posibilitará a los estudiantes a poner en práctica los fundamentos teóricos obtenidos sobre tratamiento de aguas y electroquímica a los largo de su vida universitaria.

1.1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuáles son los análisis y fundamentos necesarios para la construcción y funcionamiento de un electrocoagulador aplicado al tratamiento de agua contaminada?

1.1.3. SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuáles son las variables de diseño del electrocoagulador?

¿Qué tipo de material va a ser utilizado en la construcción del electrocoagulador?

¿Cuáles son los parámetros del agua residual que el electrocoagulador es capaz de tratar o disminuir?

¿Cuáles son las variables de funcionabilidad del electrocoagulador?

1.1.4. OBJETIVO GENERAL

1.1.4.1. Diseñar y construir un electrocoagulador aplicado al tratamiento de aguas residuales de la Empresa TESQUIMSA, para el Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK.

1.1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.1.5.1. Establecer las variables de diseño del electrocoagulador.

1.1.5.2. Seleccionar los materiales adecuados para la construcción del equipo.

1.1.5.3. Construir el electrocoagulador según el diseño establecido.

1.1.5.4. Instalar y operar el equipo en el Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK.

1.1.5.5. Caracterizar los contaminantes principales del tipo de agua a ser tratada en el electrocoagulador.

1.1.5.6. Caracterizar el agua residual de la Empresa TESQUIMSA mediante análisis físico-químicos de los siguientes parámetros: DQO, turbidez, pH, temperatura y conductividad eléctrica, antes y después de ser tratada por electrocoagulación y así comprobar la eficiencia del equipo construido.

1.1.5.7. Realizar el manual de funcionamiento del equipo construido.

1.1.6. JUSTIFICACIONES

En la actualidad la educación y formación de profesionales no únicamente se fundamenta en adquirir conocimientos y metodologías teóricas, es importante que los estudiantes de la Facultad de Ciencias Ambientales apliquen los diferentes fundamentos y teorías de forma práctica y experimental, por lo tanto se debe fortalecer y equipar a los laboratorios de dicha Facultad.

Además el equipo permite a los estudiantes profundizar una alternativa innovadora y efectiva de tratamiento de aguas residuales como lo es la electrocoagulación de manera práctica.

Se marca como imprescindible incentivar a los estudiantes a que diseñen y construyan equipos dependiendo de sus destrezas teóricas adquiridas a lo largo de su vida estudiantil.

1.2. MARCO TEÓRICO

1.2.1. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO SOBRE EL TEMA

Actualmente existe poca información sobre el tema de la electrocoagulación aplicada al tratamiento de aguas contaminadas, sin embargo entre las investigaciones más significativas se puede mencionar:

- ✓ Chuanping Feng, Norio Sugiura, Satoru Shimada, Takaaki Maekawa (2005) en su investigación “*Development of a high performance electrochemical wastewater treatment system*” publicada por la Revista científica Hazardous Materials B 113, en sus páginas 65-78.

Para formular un sistema electroquímico de máximo rendimiento para su uso práctico en el tratamiento de aguas residuales, fueron llevados a cabo experimentos de proceso electroquímico a nivel de laboratorio, con aguas residuales municipales. En base a los resultados obtenidos a nivel de laboratorio, se implementó un sistema de tratamiento electroquímico a escala piloto de 0,3 m³/h, usando los procesos de electrocoagulación. El rendimiento del sistema se evaluó tratando aguas residuales domésticas, aguas de lagunas conteniendo algas, aguas residuales de purines (Hernandez, 2011).

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

- ✓ Kerwick M., Reddy S., Chamberlain A. y Holt D. (2005) en su investigación “*Electrochemical disinfection, an environmental acceptable method of drinking water disinfection*” publicada en *Electrochimica Acta* 50 en sus páginas 5270-5277

En este trabajo se muestran estudios y experiencias sobre el uso de la desinfección electroquímica como alternativa a la desinfección con cloro. Las experiencias de desinfección electroquímica demostraron ser efectivas sobre *Clostridium Perfringens*, *Escherichia coli* y *Cryptosporidium parvum* (Hernandez, 2011).

- ✓ Xueming Chen, Guohua Chen y Po Lock Yue (2002), en su investigación sobre electrolisis voltaica de la electrocoagulación, publicada en *Chemical engineering science* 57 en sus páginas 2449-2455

En este trabajo se verifica que la electrocoagulación es un proceso efectivo para desestabilizar coloides en los tratamientos de aguas potables, residuales e industriales. Se muestran reacciones y ecuaciones del transporte de iones durante la electrolisis, así como el subpotencial necesario para vencer la capa de difusión, y la electrolisis transcurre a velocidad deseada. Se estudia el voltaje suministrado en las celdas electroquímicas actuando sobre ánodos de sacrificio de aluminio y hierro, para producir iones de aluminio (Al^{+3}) y Hierro (Fe^{+3}) de marcado efecto coagulante (Hernandez, 2011).

- ✓ Guohua Chen (2004) en su investigación “*Electrochemical technologies in wastewater treatment*” publica en *Separation and purification technology* 38 en sus páginas 11-41

En este trabajo examina el desarrollo, el diseño y aplicaciones de tecnologías electroquímicas en el tratamiento de agua y aguas residuales. El enfoque especial fue dado a electrodeposición, a electrocoagulación, a electroflotación y electrooxidación. La electrodeposición es eficaz en la recuperación de metales pesados de aguas residuales.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

Este es considerado como una tecnología establecida con el desarrollo adicional posible en la mejora de espacio tiempo. La electrocoagulación ha sido usada para la producción de agua o el tratamiento de agua residual. Este descubrimiento tiene más aplicaciones usando electrodos de aluminio y hierro (Hernandez, 2011).

- ✓ La Universidad Politécnica de Madrid en el 2011, publica la Investigación sobre procesos avanzados de tratamiento y depuración de aguas mediante electrocoagulación, realizada por Hernández P. (2011)

- ✓ La Universidad Politécnica Nacional del Ecuador en base de datos de proyectos realizados, tales como:
 - Diseño, construcción y análisis de los parámetros de operación de un sistema de electrocoagulación, realizado por Cazco A. y Jarrín S. (2010).
 - Estudio de optimización de variables de funcionamiento de un sistema de electrocoagulación para tratar aguas de la industria textil, realizado por Gómez E. y Martínez V. (2013).

1.2.2. ADOPCIÓN DE UNA PERSPECTIVA TEÓRICA

De acuerdo a los estudios previos realizados con respecto al tratamiento de aguas con electrocoagulación, es evidente su efectividad depurando aguas residuales. Tras el análisis de los distintos tipos de electrocoaguladores se diseña y construye un equipo tipo batch utilizando como electrodos de sus celdas electrolíticas de aluminio y hierro, debido a su amplia información bibliográfica. Se puede deducir que la electrocoagulación trata varios tipos de contaminantes, por lo cual la funcionalidad del electrocoagulador construido se establece por medio de los análisis físico químico de parámetros de contaminación del agua tales como DQO y turbidez, pues el

DQO es el principal parámetro de control ambiental y proporciona una idea exacta de los niveles de contaminación de los efluentes. La medición de turbidez permite establecer la presencia de material en suspensión. Además se realizan mediciones de pH, conductividad eléctrica y temperatura, pues son parámetros afectados durante la electrocoagulación. Los análisis físicos químicos se realizan al agua residual de la Empresa TESQUIMSA antes y después del tratamiento por electrocoagulación.

1.2.3. MARCO CONCEPTUAL

1.2.3.1. ELECTROQUÍMICA

El área de la química que estudia la conversión entre la energía eléctrica y la energía química es la electroquímica (Chang, 2002)

La electroquímica es el estudio de la relación entre el intercambio y el trabajo eléctrico, se investiga típicamente a través de celdas electroquímicas, sistemas que incorporan reacciones redox para inducir o utilizar energía eléctrica (Silberberg, 2002). En dichas reacciones redox la energía liberada por la reacción espontánea se transforma en electricidad, o la electricidad se utiliza para inducir una reacción química. A este último proceso se lo conoce como electrolisis (Chang, 2002).

Los procesos electroquímicos han sido estudiados desde la antigüedad, pero se ha retomado su estudio dada su eficiencia, rendimiento en la producción y almacenamiento de energía, así como en la protección metálica de muchos materiales sintéticos, el prolongamiento de la vida útil de materiales expuestos a ambientes altamente corrosivos, etc. (Correa, 2004).

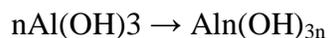
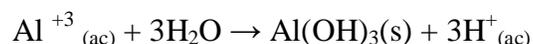
1.2.3.2. REACCIONES ÓXIDO-REDUCCIÓN

Las reacciones REDOX se consideran como reacciones de transferencia de electrones. Cada una de las etapas se denomina semireacción y explícitamente muestra los electrones transferidos en la reacción redox (Chang, 2002).

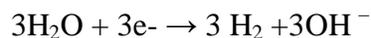
El término reacción de oxidación se refiere a la semireacción que implica la pérdida de electrones. Antiguamente, los químicos empleaban el término oxidación para expresar la combinación de elementos con oxígeno. Sin embargo, actualmente tiene un significado más amplio ya que también incluye reacciones en las que no participa el oxígeno. Una reacción de reducción es una semireacción que implica la ganancia de electrones. Se dice que actúa como agente reductor porque dona electrones al oxígeno y hace que se reduzca. El oxígeno se reduce y actúa como agente oxidante porque acepta electrones y hace que este se oxide (Chang, 2002).

Las reacciones involucradas durante el proceso de electrocoagulación en los electrodos son las siguientes.

Si el aluminio actúa como ánodo ocurren las siguientes reacciones:



En el cátodo:



Los iones Al^{+3} en combinación con los OH^- reaccionan para formar algunas especies manométricas como $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}_2(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, y otras poliméricas, tales como

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

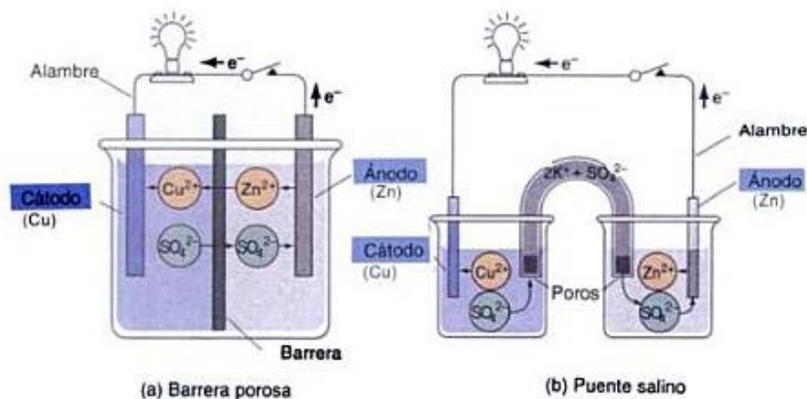
$\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$, $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ y $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$, que por procesos de precipitación forman el $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$, como se muestra en la reacción de ánodo. El $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$ es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso, que expone una gran área superficial con propiedades absorbentes y que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

1.2.3.3. CELDAS ELECTROQUÍMICAS: son dispositivos capaces de generar electricidad mediante una reacción redox espontánea o bien producir reacciones químicas no espontáneas a través de la introducción de energía eléctrica. Las celdas electroquímicas por su concepto pueden ser galvánicas o electrolíticas (Ramirez, 2010)

1.2.3.3.1. CELDA VOLTAICA O GALVÁNICA: aquellas en las que las reacciones espontáneas de óxido-reducción producen energía eléctrica. Las dos mitades de la reacción se encuentran separadas, por lo que la transferencia de electrones debe efectuarse a través de un circuito externo, De ésta manera se obtiene energía eléctrica útil (Whitten, 2006).

En la celda de reacción, la diferencia en la energía potencial química entre los reactivos de mayor energía y los productos de menor energía se convierte en energía eléctrica, que se usa para operar la carga. Es decir, el sistema reaccionante realiza trabajo sobre el medio circulante. Todas las baterías contienen celdas voltaicas (Silberberg, 2002). Como se puede observar a continuación en la **Figura 1:**

Figura 1: Celda galvánica Fuente: (Daub & Seese, 2003)



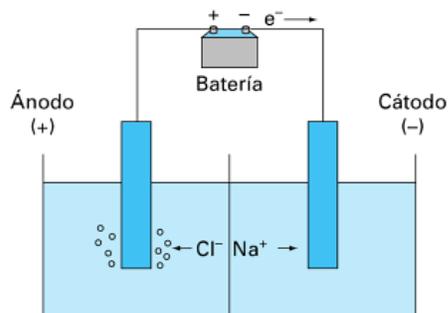
1.2.3.3.2. CELDA ELECTROLÍTICA: constan de un recipiente para el material de reacción con electrodos sumergidos dentro de dicho material, conectados a una fuente de corriente directa (Whitten, 2006). Usa energía eléctrica para activar una reacción no espontánea. En la celda de reacción, la energía eléctrica de una fuente de energía externa convierte los reactivos de menor en productos de mayor energía. Por tanto, el medio circundante realiza trabajo sobre el sistema reaccionante (Silberberg, 2002)

Hacer pasar un flujo eléctrico a través de una solución se le conoce como electrólisis. La electrólisis produce reacciones químicas no espontáneas medidas por los iones que aportan los electrolitos. La electricidad se conduce por electrodos hasta la celda que contiene la solución electrolito y que en uno de ellos en particular (el cátodo) ocurrirá la reacción media de reducción, observándose el crecimiento de un depósito metálico sólido, producto de la reducción química de iones de carga positiva o cationes. La electricidad proviene como corriente desde una batería (Correa, 2004). Como se presenta a continuación en la **Figura 2:**

Figura 2: Celda Electroquímica Fuente: (Cabildo, Cornago, Esolástigo, Esteban, Lopez, & Saenz, 2013)

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño



Los dos tipos de celdas tienen características de diseño común. Dos electrodos, los objetos que conducen la electricidad entre la celda y el medio circundante, sumergidos dentro de un electrolito, la mezcla de iones (normalmente una solución acuosa) presentes en la reacción o que transportan a la carga. Un electrodo se identifica como el ánodo o el cátodo, según la semireacción que se explica a continuación:

- La semireacción de oxidación ocurre en el ánodo. Los electrones son donados por la sustancia que oxida (agente reductor) y dejan la celda por el ánodo.
- La semireacción de reducción ocurre en el cátodo. Los electrones son aceptados por la sustancia que se reduce (agente oxidante) y entran a la celda por el cátodo (Silberberg, 2002)

1.2.3.4. POTENCIALES ESTÁNDAR DE ELECTRODO

La fuerza electromotriz o fem (E) de una celda en particular, es el potencial que se mide entre los 2 electrodos en ausencia de conexión externa. Su signo se define positivo para la celda voltaicas, $E > 0$ y negativos para celda electrolíticas, $E < 0$ (Lower, 2004).

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

La fem estándar de la celda electroquímica es la suma de los potenciales estándar de la oxidación y reducción (Chang, 2002):

$$\Delta E_{celda} = E_{Ox} + E_{Red}$$

Ec. 1 (Chang, 2002)

La fem también se puede calcular a partir de los potenciales de las semiceldas representado por el cátodo y el ánodo, utilizando la siguiente ecuación (Chang, 2002):

$$\Delta E_{celda} = E_{cátodo\ red} - E_{ánodo\ red}$$

Ec. 2 (Chang, 2002)

A continuación se detallan los potenciales estándar de las siguientes semireacciones químicas:

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

Tabla 1: Potenciales Estándar de Electrodo de distintas reacciones de semicelda. Fuente (Atkins, 2005)

| <i>Reduction half-reaction</i> | <i>E / V</i> | <i>Reduction half-reaction</i> | <i>E / V</i> |
|---|--------------|---|------------------|
| Strongly oxidizing | | | |
| $\text{H}_4\text{XeO}_6 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{XeO}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$ | +3.0 | $\text{BrO}^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Br}^- + 2\text{OH}^-$ | +0.76 |
| $\text{F}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{F}^-$ | +2.87 | $\text{Hg}_2\text{SO}_4 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Hg} + \text{SO}_4^{2-}$ | +0.62 |
| $\text{O}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ | +2.07 | $\text{MnO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{MnO}_2 + 4\text{OH}^-$ | +0.60 |
| $\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{SO}_4^{2-}$ | +2.05 | $\text{MnO}_4^- + \text{e}^- \rightarrow \text{MnO}_4^{2-}$ | +0.56 |
| $\text{Ag}^2+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}^+$ | +1.98 | $\text{I}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{I}^-$ | +0.54 |
| $\text{Co}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Co}^{2+}$ | +1.81 | $\text{Cu}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$ | +0.52 |
| $\text{HO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ | +1.78 | $\text{I}_3^- + 2\text{e}^- \rightarrow 3\text{I}^-$ | +0.53 |
| $\text{Au}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Au}$ | +1.69 | $\text{NiOOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ni(OH)}_2 + \text{OH}^-$ | +0.49 |
| $\text{Pb}^{4+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb}^{2+}$ | +1.67 | $\text{Ag}_2\text{CrO}_4 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Ag} + \text{CrO}_4^{2-}$ | +0.45 |
| $2\text{HClO} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ | +1.63 | $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ | +0.40 |
| $\text{Ce}^{4+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ce}^{3+}$ | +1.61 | $\text{ClO}_4^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{ClO}_3^- + 2\text{OH}^-$ | +0.36 |
| $2\text{HBrO} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Br}_2 + 2\text{H}$ | +1.60 | $[\text{Fe(CN)}_6]^{3-} + \text{e}^- \rightarrow [\text{Fe(CN)}_6]^{4-}$ | +0.36 |
| $\text{MnO}_4^- + 8\text{H}^+ + 5\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$ | +1.51 | $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$ | +0.34 |
| $\text{Mn}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+}$ | +1.51 | $\text{Hg}_2\text{Cl}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Hg} + 2\text{Cl}^-$ | +0.27 |
| $\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Au}$ | +1.40 | $\text{AgCl} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag} + \text{Cl}^-$ | +0.22 |
| $\text{Cl}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Cl}^-$ | +1.36 | $\text{Bi}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Bi}$ | +0.20 |
| $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 2\text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$ | +1.33 | $\text{Cu}^{2+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Cu}^+$ | +0.16 |
| $\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{OH}^-$ | +1.24 | $\text{Sn}^{4+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sn}^{2+}$ | +0.15 |
| $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ | +1.23 | $\text{AgBr} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag} + \text{Br}^-$ | +0.07 |
| $\text{ClO}_4^- + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{ClO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$ | +1.23 | $\text{Tl}^{4+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Tl}^{3+}$ | 0.00 |
| $\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$ | +1.23 | $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}$ | 0, by definition |
| $\text{Br}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Br}^-$ | +1.09 | $\text{Fe}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$ | -0.04 |
| $\text{Pu}^{4+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Pu}^{3+}$ | +0.97 | $\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{HO}_2^- + \text{OH}^-$ | -0.08 |
| $\text{NO}_3^- + 4\text{H}^+ + 3\text{e}^- \rightarrow \text{NO} + 2\text{H}_2\text{O}$ | +0.96 | $\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb}$ | -0.13 |
| $2\text{Hg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Hg}_2^{2+}$ | +0.92 | $\text{In}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{In}$ | -0.14 |
| $\text{ClO}^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cl}^- + 2\text{OH}^-$ | +0.89 | $\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sn}$ | -0.14 |
| $\text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Hg}$ | +0.86 | $\text{AgI} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag} + \text{I}^-$ | -0.15 |
| $\text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ | +0.80 | $\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}$ | -0.23 |
| $\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}$ | +0.80 | $\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Co}$ | -0.28 |
| $\text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Hg}$ | +0.79 | $\text{In}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{In}$ | -0.34 |
| $\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ | +0.77 | $\text{Tl}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Tl}$ | -0.34 |
| $\text{Ti}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ti}^{2+}$ | -0.37 | $\text{PbSO}_4 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb} + \text{SO}_4^{2-}$ | -0.36 |
| $\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cd}$ | -0.40 | $\text{Ti}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ti}$ | -1.63 |
| $\text{In}^{2+} + \text{e}^- \rightarrow \text{In}^+$ | -0.40 | $\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}$ | -1.66 |
| $\text{Cr}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Cr}^{2+}$ | -0.41 | $\text{U}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{U}$ | -1.79 |
| $\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$ | -0.44 | $\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}$ | -2.36 |
| $\text{In}^{3+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{In}^+$ | -0.44 | $\text{Ce}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Ce}$ | -2.48 |
| $\text{S} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{S}^{2-}$ | -0.48 | $\text{La}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{La}$ | -2.52 |
| $\text{In}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{In}^{2+}$ | -0.49 | $\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Na}$ | -2.71 |
| $\text{U}^{4+} + \text{e}^- \rightarrow \text{U}^{3+}$ | -0.61 | $\text{Ca}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ca}$ | -2.87 |
| $\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}$ | -0.74 | $\text{Sr}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sr}$ | -2.89 |
| $\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn}$ | -0.76 | $\text{Ba}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ba}$ | -2.91 |
| $\text{Cd(OH)}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cd} + 2\text{OH}^-$ | -0.81 | $\text{Ra}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ra}$ | -2.92 |
| $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ | -0.83 | $\text{Cs}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Cs}$ | -2.92 |
| $\text{Cr}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}$ | -0.91 | $\text{Rb}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Rb}$ | -2.93 |
| $\text{Mn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}$ | -1.18 | $\text{K}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{K}$ | -2.93 |
| $\text{V}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{V}$ | -1.19 | $\text{Li}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Li}$ | -3.05 |

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

Potenciales Estándar de Electrodo de distintas reacciones de semicelda. Fuente (Atkins, 2005)

(Continuación **Tabla 1**)

| <i>Reduction half-reaction</i> | <i>E / V</i> | <i>Reduction half-reaction</i> | <i>E / V</i> |
|---|--------------|---|------------------|
| <i>Strongly reducing</i> | | | |
| $\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}$ | +0.80 | $\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Co}$ | -0.28 |
| $\text{Ag}^{2+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}^+$ | +1.98 | $\text{Co}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Co}^{2+}$ | +1.81 |
| $\text{AgBr} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag} + \text{Br}^-$ | +0.0713 | $\text{Cr}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}$ | -0.91 |
| $\text{AgCl} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag} + \text{Cl}^-$ | +0.22 | $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 2\text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$ | +1.33 |
| $\text{Ag}_2\text{CrO}_4 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Ag} + \text{CrO}_4^{2-}$ | +0.45 | $\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}$ | -0.74 |
| $\text{AgF} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag} + \text{F}^-$ | +0.78 | $\text{Cr}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Cr}^{2+}$ | -0.41 |
| $\text{AgI} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag} + \text{I}^-$ | -0.15 | $\text{Cs}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Cs}$ | -2.92 |
| $\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}$ | -1.66 | $\text{Cu}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$ | +0.52 |
| $\text{Au}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Au}$ | +1.69 | $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$ | +0.34 |
| $\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Au}$ | +1.40 | $\text{Cu}^{2+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Cu}^+$ | +0.16 |
| $\text{Ba}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ba}$ | -2.91 | $\text{F}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{F}^-$ | +2.87 |
| $\text{Be}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Be}$ | -1.85 | $\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$ | -0.44 |
| $\text{Bi}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Bi}$ | +0.20 | $\text{Fe}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$ | -0.04 |
| $\text{Br}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Br}^-$ | +1.09 | $\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ | +0.77 |
| $\text{BrO}^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Br}^- + 2\text{OH}^-$ | +0.76 | $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-} + \text{e}^- \rightarrow [\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ | +0.36 |
| $\text{Ca}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ca}$ | -2.87 | $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ | 0, by definition |
| $\text{Cd}(\text{OH})_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cd} + 2\text{OH}^-$ | -0.81 | $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ | -0.83 |
| $\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cd}$ | -0.40 | $2\text{HBrO} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Br}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ | +1.60 |
| $\text{Ce}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Ce}$ | -2.48 | $2\text{HClO} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ | +1.63 |
| $\text{Ce}^{4+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ce}^{3+}$ | +1.61 | $\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ | +1.78 |
| $\text{Cl}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Cl}^-$ | +1.36 | $\text{H}_4\text{XeO}_6 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{XeO}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$ | +3.0 |
| $\text{ClO}^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cl}^- + 2\text{OH}^-$ | +0.89 | $\text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Hg}$ | +0.79 |
| $\text{ClO}_4^- + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{ClO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$ | +1.23 | $\text{Hg}_2\text{Cl}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Hg} + 2\text{Cl}^-$ | +0.27 |
| $\text{ClO}_4^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{ClO}_3^- + 2\text{OH}^-$ | +0.36 | $\text{Hg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Hg}$ | +0.86 |
| $2\text{Hg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Hg}_2^{2+}$ | +0.92 | $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ | +1.23 |
| $\text{Hg}_2\text{SO}_4 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Hg} + \text{SO}_4^{2-}$ | +0.62 | $\text{O}_2 + \text{e}^- \rightarrow \text{O}_2^-$ | -0.56 |
| $\text{I}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{I}^-$ | +0.54 | $\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{HO}_2^- + \text{OH}^-$ | -0.08 |
| $\text{I}_3^- + 2\text{e}^- \rightarrow 3\text{I}^-$ | +0.53 | $\text{O}_3 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ | +2.07 |
| $\text{In}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{In}$ | -0.14 | $\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{OH}^-$ | +1.24 |
| $\text{In}^{2+} + \text{e}^- \rightarrow \text{In}^+$ | -0.40 | $\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb}$ | -0.13 |
| $\text{In}^{3+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{In}^+$ | -0.44 | $\text{Pb}^{4+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb}^{2+}$ | +1.67 |
| $\text{In}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{In}$ | -0.34 | $\text{PbSO}_4 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb} + \text{SO}_4^{2-}$ | -0.36 |
| $\text{In}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{In}^{2+}$ | -0.49 | $\text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pt}$ | +1.20 |
| $\text{K}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{K}$ | -2.93 | $\text{Pu}^{4+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Pu}^{3+}$ | +0.97 |
| $\text{La}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{La}$ | -2.52 | $\text{Ra}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ra}$ | -2.92 |
| $\text{Li}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Li}$ | -3.05 | $\text{Rb}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Rb}$ | -2.93 |
| $\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}$ | -2.36 | $\text{S} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{S}^{2-}$ | -0.48 |
| $\text{Mn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}$ | -1.18 | $\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{SO}_4^{2-}$ | +2.05 |
| $\text{Mn}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+}$ | +1.51 | $\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sn}$ | -0.14 |
| $\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$ | +1.23 | $\text{Sn}^{4+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sn}^{2+}$ | +0.15 |
| $\text{MnO}_4^- + 8\text{H}^+ + 5\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$ | +1.51 | $\text{Sr}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sr}$ | -2.89 |
| $\text{MnO}_4^- + \text{e}^- \rightarrow \text{MnO}_4^{2-}$ | +0.56 | $\text{Ti}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ti}$ | -1.63 |
| $\text{MnO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{MnO}_2 + 4\text{OH}^-$ | +0.60 | $\text{Ti}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ti}^{2+}$ | -0.37 |
| $\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Na}$ | -2.71 | $\text{Ti}^{4+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ti}^{3+}$ | 0.00 |
| $\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}$ | -0.23 | $\text{Tl}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Tl}$ | -0.34 |
| $\text{NiOOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{OH}^-$ | +0.49 | $\text{U}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{U}$ | -1.79 |
| $\text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ | +0.80 | $\text{U}^{4+} + \text{e}^- \rightarrow \text{U}^{3+}$ | -0.61 |
| $\text{NO}_3^- + 3\text{H}^+ + 3\text{e}^- \rightarrow \text{NO} + 2\text{H}_2\text{O}$ | +0.96 | $\text{V}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{V}$ | -1.19 |
| $\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{NO}_2^- + 2\text{OH}^-$ | +0.10 | $\text{V}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{V}^{2+}$ | -0.26 |
| $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ | +0.40 | $\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn}$ | -0.76 |

1.2.3.5. LEYES DE FARADAY

Michael Faraday, químico y físico que sentó las bases para la aplicación de la electricidad, llamo electrolito al líquido conductor de la corriente eléctrica y electrodos a los conductores metálicos en contacto con la disolución, el recipiente que contiene la disolución y los electrodos reciben el nombre de celda electrolítica. El voltaje de una celda es una medida de la tendencia de una reacción a ocurrir. La energía de la celda se calcula de acuerdo a los potenciales normales de los electrodos (Vassos & Ewing, 1980).

Para emplear adecuadamente las relaciones cuantitativas entre la energía eléctrica y la materia, se estudian las relaciones establecidas por Michael Faraday, quien demostró básicamente que:

- Las cantidades de sustancias que intervienen y reaccionan en los electrodos de una celda electrolítica son directamente proporcionales a la cantidad de carga que pasa por la celda (Correa, 2004).
- Al pasar una cantidad a través de varios electrolitos en celdas diferentes, de cada sustancia se producen cantidades equivalentes (Correa, 2004).

Estas dos conclusiones se conocen como leyes de Faraday, las cuales son resumidas en una sola ecuación de amplia aplicación.

$$\frac{I * t}{F} = \frac{W}{\frac{PM}{n}}$$

Ec. 3 (Correa, 2004)

Donde: I = Intensidad de corriente en amperios

t = Tiempo en segundos

W= peso en gramos de la sustancia liberada en el electrodo

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

PM= peso molecular

n el número de oxidación que sufre la sustancia después de la electrolisis.

F= constante de Faraday

La constante de Faraday se determinó experimentalmente y es igual 96500 Culombios, y se entiende como la cantidad de electricidad necesaria para liberar un equivalente químico de cualquier elemento, esto es, para depositar un equivalente químico de cualquier elemento se necesitan una transferencia de 96500 culombios y para los iones positivos monovalentes un equivalente gramo es igual a la masa atómica en gramos, es decir, a una mol, ya que la valencia es 1 (Ríos, 2006).

$$\frac{96500 \text{ culombios}}{1 \text{ equivalente}} * \frac{1 \text{ equivalente}}{1 \text{ mol}} * \frac{1 \text{ mol}}{6.02 * 10^{23} \text{ electrón}} = 1.622 * 10^{-19} \frac{\text{culombios}}{\text{electrón}}$$

Ec. 4 (Ríos, 2006)

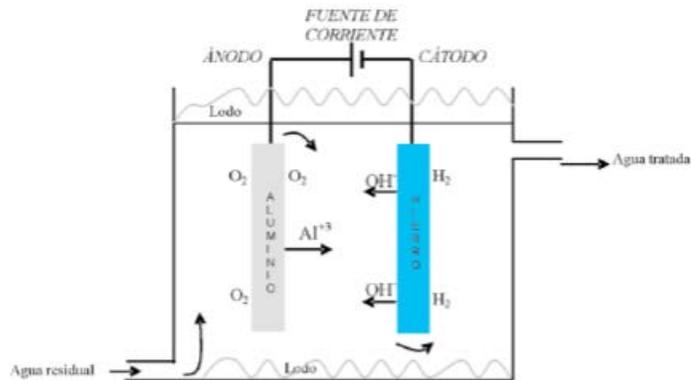
La cantidad de electricidad que se necesita para depositar un ión o un átomo de cualquier elemento es igual a un múltiplo de $1.622 * 10^{-19}$ culombios, lo que hace suponer que la electricidad está formada por partículas que contienen esta cantidad de carga eléctrica (Ríos, 2006).

Las leyes de Faraday son aplicadas en la electrocoagulación para determinar la cantidad de iones metálicos aportados por el ánodo (electrodo de sacrificio) y su desgaste.

1.2.3.6. ELECTROCOAGULACIÓN: es una técnica utilizada para el tratamiento de las aguas residuales. Los contaminantes de muy diversos efluentes son removidos aplicando el principio de coagulación, pero en este caso no se hace uso de un coagulante químico (cuya función es llevada a cabo por corriente eléctrica que es aplicada al medio líquido contaminado). Se puede entonces definir la electrocoagulación como un proceso en el cual son desestabilizadas las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, siendo el hierro y el aluminio los más utilizados (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006). A continuación se observa la electrocoagulación en la **Figura 3**

Figura 3: Sistema de electrocoagulación con ánodo de Aluminio.

Fuente (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006)



La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca una serie de reacciones químicas, cuyo resultado final es la estabilidad de las moléculas contaminantes. Por lo general este estado estable produce partículas sólidas menos coloidales y menos emulsionadas o solubles.

Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan o flotan, facilitando su remoción. Los iones metálicos se liberan y dispersan en el medio líquido y tienden a formar óxidos metálicos que atrae eléctricamente a los contaminantes que han sido desestabilizados (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

1.2.3.6.1. Factores que afectan la electrocoagulación.

Son muchos los factores que intervienen en el proceso de electrocoagulación; algunos de estos factores tienen mayor influencia sobre el proceso. A continuación se discuten aquellos que se relacionan más directamente con la efectividad del proceso (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

- **pH:** es una medida de la acidez o naturaleza básica (alcalina) de una solución. Es también una medida del balance de iones de hidrógeno y los iones hidroxilo negativo en el agua. Los valores de pH van de 0 a 14, considerándose neutral el valor de 7. El agua que contiene más iones de hidrógeno es ácida (valores menores a 7), mientras que el agua que tiene más iones hidroxilo es básica (valores mayores a 7) (Sánchez, Herzig, Peters, & Marquez, 2007). Influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación; esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar. El pH, durante el proceso, puede incrementarse para aguas residuales ácidas, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo; en contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer; a su vez, y dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso. Algunas aguas residuales presentan mejor eficiencia en la remoción de sus contaminantes al aplicar la electrocoagulación a pH

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

básicos, y otras, a pH ácidos. Se ha determinado, en algunos casos, que la mayor eficiencia en la remoción de un contaminante se da dentro de un rango específico de pH; incluso este rango puede ser amplio. En términos generales, las mejores remociones se han obtenido para valores de pH cercanos a 7 (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006)

- **Densidad de corriente:** es la cantidad de carga que pasa por unidad de tiempo y por unidad de sección transversal. Como las variables eléctricas en el proceso de electrocoagulación son los parámetros que más influyen en la remoción del contaminante de un agua residual y están ligados a factores económicos, se debe prestar mayor atención a su estudio. El porcentaje de remoción de un contaminante es dependiente de la corriente eléctrica aplicada al medio acuoso; es así como la eficiencia en la remoción y el consumo de energía incrementa con aumentos en la densidad de corriente. Para algunas conductividades del medio acuoso, el consumo de energía incrementa proporcionalmente con los incrementos de densidad de corriente, lo que conlleva a un consumo mayor de energía; para estos se presentan pérdidas por transformación de energía eléctrica en calórica, produciéndose un aumento en la temperatura del medio acuoso. El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio (Al^{+3}) o hierro (Fe^{+2}) liberados por los respectivos electrodos.

Una densidad de corriente demasiado grande puede producir una disminución significativa en la eficacia de la corriente. La selección de la densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación como pH y temperatura. La energía eléctrica que se suministra a la celda electroquímica puede ser mediante corriente alterna (CA) o bien como corriente directa (CD). Las características propias del paso de

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

cada una de las corrientes a través del medio acuoso generan diferentes respuestas electroquímicas entre las placas y el agua residual tratada. Cuando se suministra corriente directa se produce en el cátodo una impermeabilización, lo que causa una menor eficiencia en la remoción (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

- **Conductividad:** es una medida de la capacidad de una solución acuosa para transmitir una corriente eléctrica. Dicha capacidad depende de la presencia de iones; de su concentración, movilidad, valencia, y de la temperatura ambiental. Un incremento en la conductividad eléctrica genera un incremento en la densidad de corriente, manteniendo constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación; adicionalmente, el incremento de la conductividad que mantiene constante la densidad de corriente produce una disminución del voltaje aplicado. La adición de algunos electrolitos tales como NaCl o CaCl₂ genera un aumento en la conductividad del agua residual; además se ha encontrado que los iones de cloruro (Cl⁻) pueden reducir los efectos adversos de iones como el anión carbonato (HCO₃⁻) y el sulfato (SO₄²⁻), que producen la precipitación de cationes calcio(II) Ca⁺² y magnesio (II) Mg⁺² produciendo una capa insoluble que se deposita sobre los electrodos, lo que aumenta el potencial entre los electrodos y decrece así la eficiencia de la corriente (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).
- **Temperatura:** es una propiedad física que se refiere a las nociones comunes de calor o ausencia de calor. Los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente incrementa inicialmente hasta llegar a 60° C, para electrodos de aluminio, punto donde se hace

máxima, para luego decrecer. Cuando se usan electrodos de aluminio, el incremento de la eficiencia con la temperatura es atribuida al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo. (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

1.2.3.7. PARÁMETROS DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

1.2.3.7.1. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO: es la cantidad de oxígeno necesario para descomponer químicamente la materia orgánica e inorgánica (Sánchez, Herzig, Peters, & Marquez, 2007). Se usa para medir el oxígeno equivalente a la materia orgánica oxidable químicamente mediante un agente químico oxidante fuerte, por lo general dicromato de potasio, en un medio ácido y a alta temperatura. Se considera útil como un parámetro de concentración orgánica en aguas residuales industriales o municipales tóxicas a la vida biológica (Romero, 2002).

1.2.3.7.2. POTENCIAL DE HIDROGENO (pH)

El pH de un cuerpo de agua es un parámetro a considerar cuando queremos determinar la especiación química y solubilidad de varias sustancias orgánicas e inorgánicas en agua. Es un factor abiótico que regula procesos biológicos mediados por enzimas (ej.: fotosíntesis, respiración); la disponibilidad de nutrientes esenciales que limitan el crecimiento microbiano en muchos ecosistemas (ej. NH_4^+ , PO_4^{3-} y Mg^{2+}); la movilidad de metales pesados tales como cobre, que es tóxico para muchos microorganismos; así como también afecta o regula la estructura y función de macromoléculas y organelos tales como ácidos nucleicos, proteínas estructurales y sistemas de pared celular y membranas. Variaciones en pH pueden tener entonces efectos marcados sobre cada uno de los niveles de organización de la materia viva, desde el nivel celular hasta el nivel de ecosistemas (Atlas & Bartha, 2002).

1.2.3.7.3. TURBIDEZ Y TRANSPARENCIA: es una medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión. Las partículas en suspensión dispersan la luz, lo que provoca una disminución de la actividad fotosintética en plantas y algas, que atrae como consecuencia una baja en la concentración de oxígeno. La turbidez se mide en Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT) o (NTU) Nefelometric Turbidity Unit, por un proceso analítico que se basa en la dispersión de luz sobre las partículas de la muestra. El instrumento usado para su medición es el turbidímetro, que mide la intensidad de la luz dispersada, a 90 °C, cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua (Sánchez, Herzig, Peters, & Marquez, 2007).

1.2.3.7.4. TEMPERATURA: es un parámetro importante en aguas residuales por su efecto sobre las características del agua, sobre las operaciones y procesos de tratamiento, así como sobre el método de disposición final. En general, las aguas residuales son más cálidas que las de abastecimiento y, en aguas de enfriamiento, la polución térmica es significativa (Romero, 2002).

La temperatura afecta y altera la vida acuática, modifica la concentración de saturación de oxígeno disuelto y la velocidad de reacciones químicas y de actividad bacteriana. La tasa de sedimentación de sólidos en aguas cálidas es mayor que en aguas frías, por el cambio de viscosidad del agua (Romero, 2002).

1.2.3.8. EMPRESA TESQUIMSA

TESQUIMSA es una sociedad anónima domiciliada en la ciudad de Quito, fundada en el año 1995. Su objeto social es la fabricación y comercialización de productos químicos para las siguientes áreas (TESQUIMSA, 2014):

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

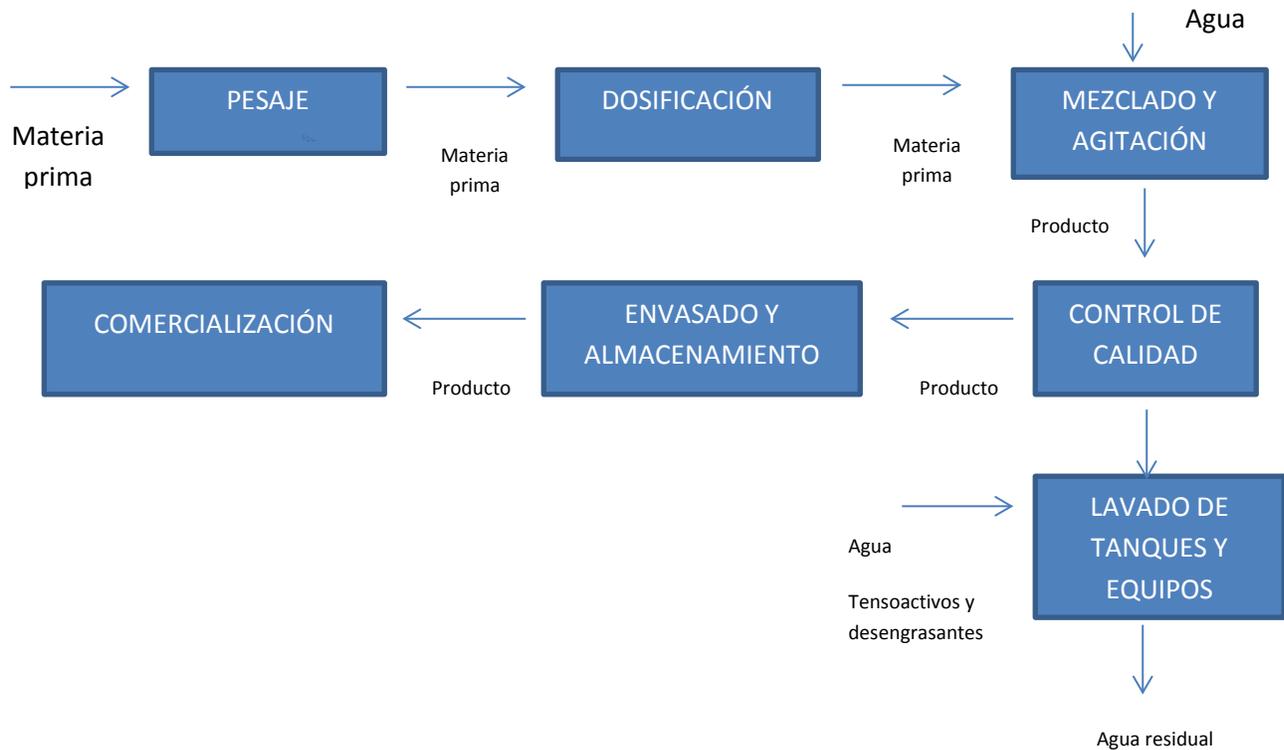
- Tratamiento de agua para caldero: la empresa brinda tratamientos y productos para calderos los cuales son alimentados con aguas con alta dureza o baja alcalinidad, además ofrece productos anticorrosivos para líneas de condensado (TESQUIMSA, 2014).
- Tratamiento de agua de enfriamiento: TESQUIMSA fabrica productos para tratamientos anti incrustantes, anti corrosivos, alguicida y biocida
- Tratamiento de agua potable y residual: comprenden procesos físico químicos (coagulación y floculación) y biológicos (sistemas modificados de lodos activados con aireación extendida). Se especializan en diseño, construcción, instalación, puesta en marcha, mantenimiento y optimización de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (TESQUIMSA, 2014).
- Desengrasantes para limpieza de cisternas, plantas de alimentos y grasa mineral, animal y vegetal. Además cuentan con una línea de productos descarbonizantes utilizables por inmersión.
- Desinfectantes para: uso doméstico, plantas alimenticias, papel reciclado, aseo personal y como aditivo para pinturas bactericidas.
- Detergentes en polvo universal y alcalino, neutralizantes, suavizantes- aromatizantes, blanqueador, humectante, quitamanchas y para lavado en seco.
- Productos para piscina como: cloro, regulador y elevador de pH, clarificador y alguicidas.

TESQUIMSA cuenta con 28 empleados que desarrollan sus actividades en las ciudades de Quito y Ambato. Además está dedicada a la investigación de productos químicos que satisfagan necesidades de sus clientes en de calidad, servicio, cuidado del ambiente (TESQUIMSA, 2014).

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

En el proceso productivo de la empresa únicamente existe salida de agua residual durante el lavado de tanques y equipos, con tensoactivos y desengrasantes, la cual es tratada por coagulación química. A continuación se detalla el diagrama de flujo del proceso de generación de aguas residuales de la empresa:



Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

CAPÍTULO II

2. METODOLOGÍA

2.1.TIPO DE ESTUDIO

El presente estudio es de tipo exploratorio, pues para diseñar y construir el electrocoagulador es necesario investigar, analizar y aplicar los fundamentos teóricos de fuentes bibliográficas e investigaciones antes realizadas sobre el tema, con lo cual se identifican las variables de diseño, así como su funcionamiento. Una vez construido el equipo se realizan ensayos a nivel de laboratorio, sin realizar comparaciones con otros equipos similares preexistentes, determinando así la efectividad del electrocoagulador en el tratamiento de aguas residuales, basando el estudio en el análisis parámetros de contaminación tales como demanda química de oxígeno, turbidez, pH y temperatura de la muestra antes y después del ingreso al sistema de electrocoagulación.

Además se establece al proyecto como descriptivo, debido a que se limita a estudiar y caracterizar únicamente al grupo de muestras de un tiempo determinado de la empresa TESQUIMSA en el laboratorio para comprobar la funcionalidad del equipo construido.

2.2.MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN

El diseño y construcción de un electrocoagulador es un Proyecto de Desarrollo y documental, debido al déficit de equipos en el Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK, por lo tanto la implantación de dicho equipo podrá ser aplicado a investigaciones pedagógicas, así como también profundizar y desarrollar habilidades de estudiantes y docentes sobre la temática de tratamiento de aguas residuales con

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

electrocoagulación. Además se registraran todas las pruebas y resultados realizados de aguas residuales de la Empresa TESQUIMSA tratadas por el sistema de electrocoagulación.

Se debe categorizar al proyecto como especial, pues es una solución al problema antes establecido con la aplicación de un producto tangible como lo es el electrocoagulador que responde a la necesidad de equipos para investigación en los Laboratorios de la Facultad.

2.3.MÉTODO

El método a aplicarse en el presente proyecto es el Inductivo- Deductivo, pues el diseño y construcción del electrocoagulador se basa en conocimientos y fundamentos teóricos generales ya establecidos con fin de lograr su funcionamiento.

2.4.DISEÑO DEL ELECTROCOAGULADOR

El electrocoagulador aplicado al tratamiento de aguas contaminadas es diseñado tomando en cuenta las necesidades pedagógicas e investigativas de los estudiantes y docentes de la Facultad, además el espacio físico del Laboratorio donde se ubicara el equipo. La selección de los materiales de construcción se basa en la factibilidad tanto económica y de disponibilidad en el mercado local. Se han tomado como referencia anteriores investigaciones que se han realizado al respecto para diseñar el presente equipo.

La funcionalidad y operatividad del equipo es tipo Batch, pues se puede adaptar a las características del contaminante y de su concentración, a su vez se determina y controla el volumen a tratar en un ciclo, así como el tiempo de retención y de reacción. Al ser el más simple y de bajo costo son los más utilizados a escala de laboratorio, debido al control y análisis de las condiciones dentro del reactor.

En su forma más simple el reactor batch es una cubeta en la cual, los electrodos se disponen en forma de placas paralelas conectados en serie a una fuente de voltaje (Mollah, 2001). El volumen de la celda ocupada por los electrodos se define como zona de reacción, en esta se dan los procesos de desestabilización de partículas, coagulación y sedimentación. Los lodos formados pueden depositarse en la parte superior de la celda cuando su densidad es baja o precipitar cuando su densidad es alta, para luego ser removidos (Arango & Garcés, 2007).

2.4.1. VARIABLES DE DISEÑO

2.4.1.1. CUERPO DEL EQUIPO:

El material seleccionado para la carcasa del electrocoagulador es polimetacrilato de metilo, por las siguientes razones: transparencia, termoplaticidad, alta resistencia, estado superficial excelente y buen comportamiento a lo largo del tiempo (Chemiller, 2005).

El polimetilmetacrilato, también conocido por sus siglas PMMA, se obtiene de la polimerización del metacrilato de metilo y su presentación más frecuente en la industria es en gránulos o en láminas. Es un plástico duro y transparente, estas propiedades hacen que tenga muchas aplicaciones, un plástico para aplicaciones específicas. El PMMA es un plástico sustituto del vidrio (Polo, Gómez, Prashar, & Fajardo, 2010).

Tabla 2: Propiedades del PMMA (Groover, 2000)

| | |
|--|---|
| Polímero representativo: | Polimetilmetacrilato (C₅H₈O₂)_n |
| Símbolo: | PMMA |
| Método de polimerización: | Adición |
| Grado de cristalinidad: | Ninguno (amorfo) |
| Módulo de elasticidad: | 400 lb/pulg ² (2800MPa) |
| Resistencia a la tensión: | 8000 lb/pulg ² (55 MPa) |
| Elongación: | 5% |
| Gravedad específica: | 1.2 |
| Temperatura de transición vítrea: | 221 °F (150°C) |
| Temperatura de fusión: | 392 °F (200°C) |
| Participación aproximada en el mercado: | Cerca del 1% |

A continuación se detallan las Propiedades físicas –químicas y las recomendaciones de uso del cemento acrílico adquirido en ACRILUX (Ficha técnica).

Propiedades Físicas

- Transmisión de la luz del 92-95% (transparencia superior a la del vidrio).
- Bajo peso (densidad 1,2 g/cm³).
- Extraordinaria resistencia al medio ambiente, excelente resistencia a la degradación por rayos ultravioleta.
- No se opaca con el tiempo.
- Larga vida útil.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

- Facilidad para el termo-formado: sometiéndole a temperaturas entre 140 a 180°C.
- Máxima temperatura recomendada para servicio o exposición continua 65 a 90°C.
- Mínima temperatura recomendada para servicio o exposición continua -40°C.
- Baja resistencia a la abrasión.
- Fácil limpieza, sólo se necesita un detergente doméstico y agua.

Propiedades químicas

Resiste la mayoría de productos químicos: bases, ácidos, amoníaco (no muy concentrado), hidrocarburos alifáticos (hexano, nafta y octanos).

No resiste hidrocarburos clorinados (cloruro de metileno, tetracloruro de carbono); solventes aromáticos como benceno, terpeno, tolueno, trementina; alcoholes etílicos y metílicos; ácidos orgánicos como el acético, fenoles, thinner, cetonas y éteres.

(Acrílicos. ACRILUX S.A)

Recomendaciones de uso

- No se debe exponer las láminas de acrílico a temperaturas superiores a los 50°C, a fin de evitar deformaciones del material; considerar que en láminas de bajo espesor la afectación podría ser mayor.
- No exponer el acrílico a agentes solventes puesto que éstos pueden tener componentes que destruyan el acrílico.
- Limpiar el acrílico con una solución de agua y un porcentaje mínimo de detergente suave con el fin de remover cualquier rastro de grasa o aceite de la superficie de ésta, no se

recomienda utilizar ninguna clase de solventes (alcohol, acetona, hexano, thinner, tolueno, benceno, etc.)

- Hay que considerar que el acrílico se expande o se contrae un promedio aproximado de 0,7 mm. por cada metro cuando existe una variación de temperatura de 10°C.
- Evitar el contacto prolongado del acrílico con todo tipo de material que contenga pvc.

Durabilidad del acrílico

No se presentan cambios significativos en el acrílico cuando éste se encuentra expuesto a temperaturas menores a 60°C, o durante largos períodos de tiempo a la intemperie.

La duración de la lámina de acrílico depende de la aplicación en la cual está siendo sometida, pudiendo ser desde pocos meses hasta muchos años.

El acrílico es más resistente que el vidrio, no se astilla y es un excelente aislante eléctrico.

Seguridad

El acrílico es un material de combustión lenta, sin embargo se recomienda no exponerlo o utilizarlo en sitios cercanos a fuentes de calor.

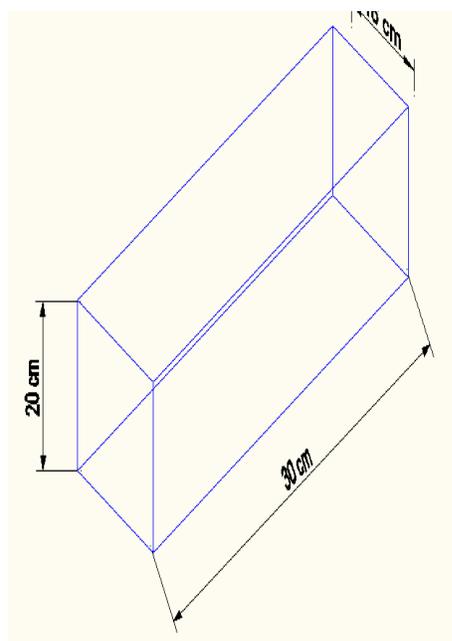
Utilizar todo el equipo de seguridad necesario (guantes, gafas de seguridad, orejeras, mascarilla), al momento de someter a la lámina de acrílico a procesos de maquinado o conformado.

Se recomienda que el sitio donde se realice procesos de maquinado, conformado o pegado de las láminas de acrílico cuente con la ventilación.

(Acrílicos. ACRI LUX S.A)

Se dimensionó el electrocoagulador con una capacidad para tratar 8 litros de agua residual, puesto que la capacidad del volumen a tratar está dada por el diseño del equipo; el volumen depende de la cantidad de agua que llene la zona de reacción y sedimentación, además el líquido debe sobrepasar ligeramente el límite superior de los electrodos, para facilitar la remoción de espumas. . Las dimensiones del cuerpo del electrocoagulador se presentan a continuación en la **Figura 4**.

Figura 4: Dimensionamiento de la carcasa del electrocoagulador



Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

Cálculo del volumen del reactor sin placas:

$$v = a \times l \times h$$

Ec. 5 (Máximo & Alvarenga, 2002)

Donde v = volumen del reactor

a = ancho

l = longitud

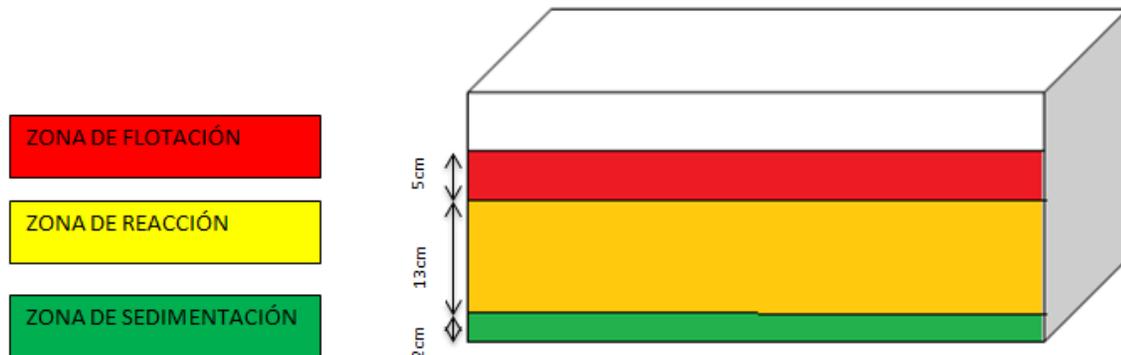
h = altura

$$v = 20\text{cm} \times 30\text{cm} \times 23\text{cm}$$

$$v = 13800 \text{ cm}^3$$

El reactor se divide en tres secciones: zona de reacción (13cm), zona de flotación (5cm), zona de sedimentación (2cm). En la **Figura 5**. se pueden observar las secciones antes mencionadas

Figura 5: Zonas del electrocoagulador

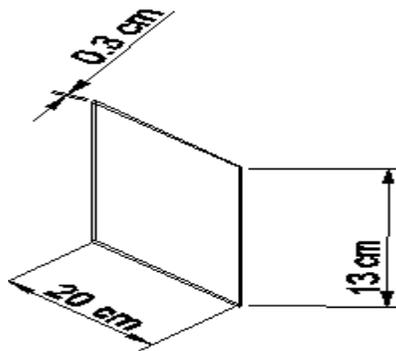


2.4.1.2. ELECTRODOS:

Los metales escogidos como electrodos son el aluminio y el hierro, ambos metales pueden ser utilizados como electrodos de sacrificio, según Faraday, debido a que en el proceso electrolítico desprenden en el agua los iones que desestabilizan los coloides, iones multivalentes como Fe^{3+} , Cu^{3+} y Al^{3+} .

Las dimensiones de las placas son las propuestas en la **Figura 6**.

Figura 6: Dimensionamiento de electrodos



Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

En un electrocoagulador se utilizan varias placas, ya que para una buena disolución de iones metálicos, es preciso aumentar el área de los electrodos sin aumentar las dimensiones del tanque exageradamente.

2.4.1.3. DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS

La separación entre electrodos influye sobre la resistencia eléctrica y la densidad de corriente dentro del reactor de electrocoagulación. Las distancias de separación entre placas menores a 1cm no son recomendables debido a que aumentan el tiempo del tratamiento.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

La densidad de corriente empleada en el reactor determina la cantidad de burbujas generadas. Se ha podido observar de la experimentación que a bajas corrientes se producen bajas densidades de burbujas, obteniéndose una baja cantidad de floculos hacia arriba que hace que predomine la sedimentación sobre la flotación. Situación contraria se presenta cuando se aumenta la corriente, pues la densidad de burbujas aumenta resultando en un aumento del flux de momentum hacia arriba, favoreciendo la flotación de las partículas contaminantes (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

Para mejorar esta disolución se debe aumentar el área superficial de los electrodos, lo cual se logra aumentando el número de placas, disponiéndolas en serie en forma paralela monopolar o bipolar (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

Las separaciones entre electrodos inferiores a 10 mm se determina que los tratamientos se hacen prolongados, adicionalmente se presentan atascamientos por deposición de lodo sobre la superficie de los electrodos, impidiendo la circulación del medio acuoso y la generación de turbulencias que favorecen la coagulación dando como resultado bajas remociones de DQO (Arango & Garcés, 2007)

Para distancias entre electrodos mayores a 10 mm no se presentan cambios importantes en el proceso, la separación entre electrodos que permite un proceso de electrocoagulación con buenas remociones de DQO y grasas y aceites es de 10 mm (Arango & Garcés, 2007)

Se ha determinado una distancia mínima entre electrodos de 1cm, fijadas gracias a rieles instaladas en el interior del equipo, a su vez se pueden movilizar las rieles e instalarlas a

diferentes distancias tales como 2.3 cm, 3.6 cm o 4.9 cm. Durante la electrocoagulación se mantendrán las placas totalmente aisladas con el fin de evitar su contacto y daños al equipo.

2.4.1.4. NÚMERO DE ELECTRODOS:

$$n = \frac{a - 2\hat{\partial}}{d + \sigma}$$

Ec. 6 (Arango & Garcés, 2007)

Donde; n= número de electrodos

a= ancho del reactor

$\hat{\partial}$ = distancia de los electrodos a la cara lateral del reactor

d= distancia entre electrodos

σ = espesor de la placa

Realizando los respectivos cálculos se obtiene que:

$$n = \frac{30cm - 2(2cm)}{1cm + 0,3cm}$$

n= 20 placas

Se determina un número total de 20 placas, 10 de aluminio que actúan como electrodos de sacrificio y 10 de hierro que son los cátodos.

2.4.1.5. AREA DE REACCION DE LOS ELECTRODOS:

$$A = (l * a) - 2(\pi * r^2)$$

Ec. 7 (Máximo & Alvarenga, 2002)

Donde; A= área por placa

l = largo de la placa

a = ancho de la placa

r= radio del hueco en la placa

$$A = (13cm * 20cm) - 2(\pi * 0.35cm^2)$$

Se determina un área por placa de 260 cm², esto multiplicado por el número de placas, se obtiene el área total de reacción dentro del electrocoagulador

$$A_{total} = 260 \text{ cm}^2 * 20 \text{ placas}$$

$$A_{total} = 5200 \text{ cm}^2 \cong 0.52 \text{ m}^2$$

2.4.1.6. VOLUMEN DEL AGUA RESIDUAL DENTRO DEL ELECTROCOAGULADOR

El agua residual únicamente ocupa las zonas de reacción y de sedimentación, debido a que la zona de coagulación se destina para los coágulos formados durante la electrocoagulación, por tanto;

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

$$v_{carcasa} = v_{zona\ reacción} + v_{zona\ sedimentación}$$

Ec. 8 (Chemiller, 2005)

$$v_{carcasa} = (20cm * 30cm * 13cm) + (20cm * 30cm * 2cm)$$

$$v_{carcasa} = 9000cm^3$$

Es importante establecer el volumen que va a ser ocupado por los electrodos, pues disminuye el volumen del agua residual a tratar.

$$v_{placas} = A_{total} * \varepsilon$$

Ec. 9 (Chemiller, 2005)

Donde: v_{placas} = volumen de las placas

A_{total} = área total de las placas

ε = espesor de las placas

$$v_{placas} = 5200\ cm^2 * 0.3cm$$

$$v_{placas} = 1560\ cm^3$$

El volumen total de la capacidad del electrocoagulador se determina por la diferencia entre volumen de la carcasa y el de las placas o electrodos;

$$v_{EC} = v_{carcasa} - v_{placas}$$

Ec. 10. (Chemiller, 2005)

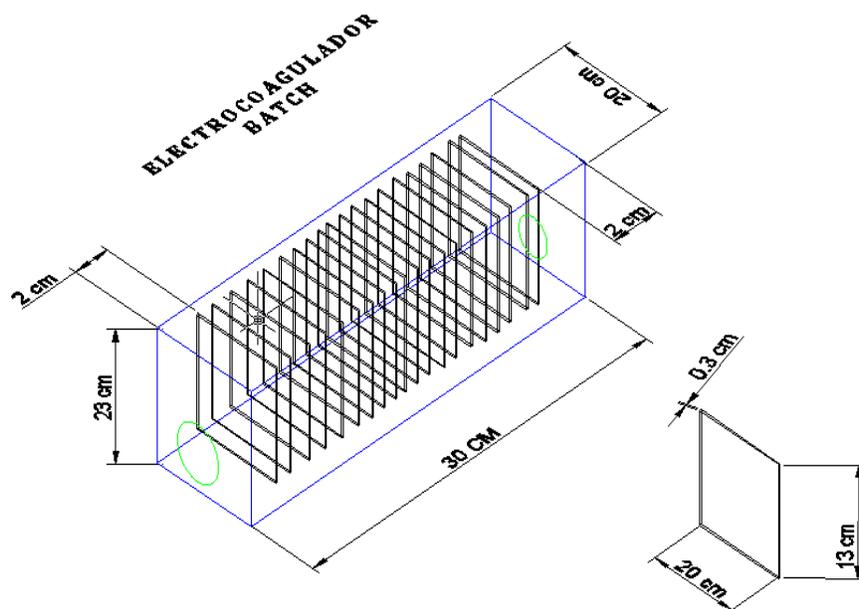
$$v_{EC} = 9000\text{cm}^3 - 1560\text{ cm}^3$$

$$v_{EC} = 7440\text{ cm}^3$$

2.4.2. DISEÑO DÍGITAL DEL ELECTROCOAGULADOR

El diseño digital se lo realizó en el programa AUTO-CAD. A continuación en la **Figura 7** se observa el diseño digital del electrocoagulador.

Figura 7: Diseño digital del reactor de electrocoagulación



Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014)

2.5.CONSTRUCCIÓN DEL ELECTROCOAGULADOR

2.5.1. CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR

Para la construcción de la carcasa del reactor fue necesario adquirir el material previamente establecido que se muestra en la **Tabla 3:**

Tabla 3: Material y cantidad para la construcción del reactor

| MATERIAL | CANTIDAD |
|---|----------|
| Plancha de Polimetilmetacrilato 1,2*1,8 metros y 6 mm de espesor | 1 |
| Plancha de polimetilmetacrilato de 1,2*1,8 metros y 4 mm de espesor | 1 |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014)

Se construyó la carcasa del reactor con la plancha de 6 mm de espesor siguiendo las dimensiones del diseño ya realizado. Con la plancha de PMMA de 4 mm de espesor se adaptaron 20 rieles cada 1 centímetro con el objetivo de inmovilizar los electrodos para evitar su contacto y daños al personal que opera el equipo y su alrededor por cortocircuitos. Como se ilustra a continuación en las **Figuras 8 y 9:**

Figura 8: Vista superior de la carcasa del electrocoagulador



Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

Figura 9: Vista lateral de la carcasa del electrocoagulador



Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

Durante la construcción de los electrodos de hierro y aluminio se adicionó al área de reacción del diseño un aza conductora de 7 cm de largo y 2 de ancho que sirve para facilitar las conexiones eléctricas del sistema de electrocoagulación. Los orificios permiten el movimiento del agua entre electrodos, y así evitar áreas muertas entre la carcasa y los electrodos. En las **Figuras 10 y 11**, se pueden observar los electrodos.

Figura 10: Vista lateral del electrodo de Hierro



PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

Figura 11: Vista lateral del electrodo de Aluminio

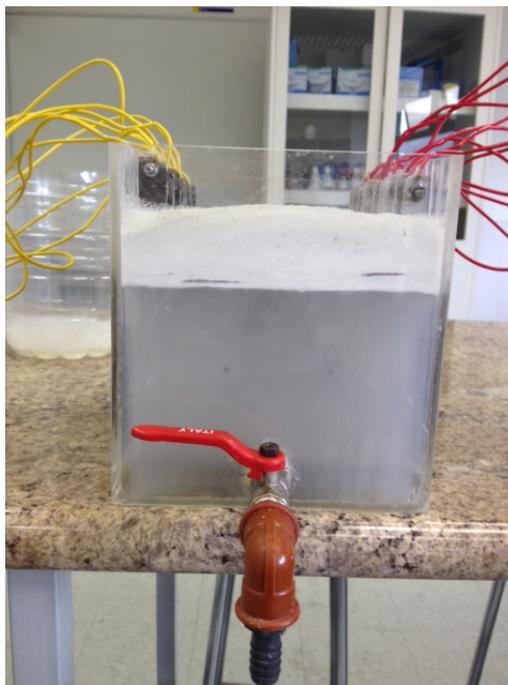


Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

2.5.2. TOMA DE MUESTRA

Para facilitar la toma de muestras durante la electrocoagulación en el tiempo de retención establecido, se instaló una línea de salida de media pulgada y se adaptó una válvula bola de cierre rápido como se observa en la **Figura 12:**

Figura 12: Toma de muestra del electrocoagulador



Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

2.5.3. FUENTE DE ENERGÍA

En las **Figuras 13 y 14** se observa el equipo utilizado como fuente de alimentación de energía CB-50, el cual opera con entrada de 110[v] y flujo de corriente continuo, es decir las cargas o electrones suministrados por la fuente de energía fluyen siempre en el mismo sentido en un circuito eléctrico cerrado, moviendo del polo negativo hacia el positivo de una fuente de fuerza electromotriz (Caballero, 2008).

La fuente de alimentación de corriente continua regula voltajes de 6, 12 y 24 [v]. Además consta de un estabilizador de intensidad de corriente y para su medición de un amperímetro.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

Figura 13: Vista frontal de la fuente de energía



Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

Figura 14: Partes de la fuente de energía



Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

2.5.4. CONEXIONES ELÉCTRICAS

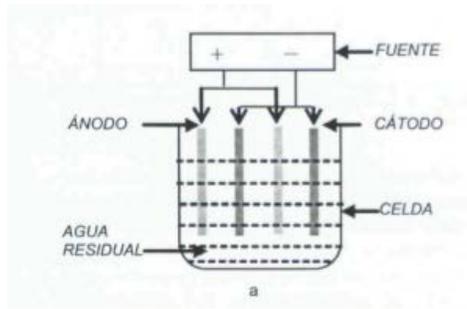
Se realizaron conexiones monopares (**Figura 15**) a la fuente de energía con los electrodos en paralelo, utilizando cables flexibles de cobre tamaño 14 adaptados al aza (porción de la placa

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

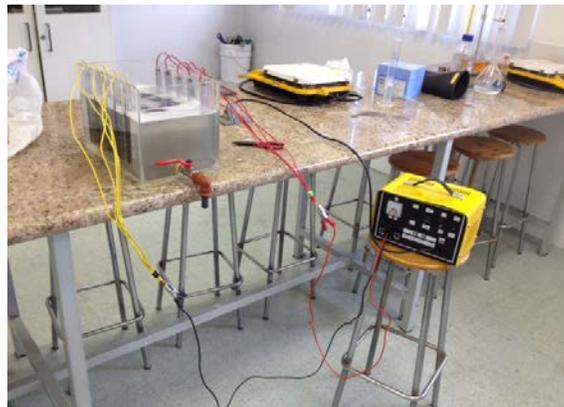
metálica en donde no ocurre reacción) conductora de los electrodos por medio de tornillos ajustados con tuercas.

Figura 15: Conexión monopolar con electrodos en serie (Arango & Garcés, 2007)



Todos los cables fueron acoplados, de tal manera que puedan se conectados a las pinzas polarizadoras positivo y negativo de la fuente de energía.

Figura 16: Conexiones eléctricas del electrocoagulador y fuente de energía



Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

2.6.MUESTRAS:

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

Las muestras son tomadas en el ingreso del agua residual a la planta de tratamiento de la empresa TESQUIMSA, se realizó un muestreo simple, el cual proporciona las características del agua residual en el momento en el que es muestreada. El agua residual proviene del lavado de tanques y maquinaria de la empresa.

Se tomó una muestra principal de 85 litros, con la cual se realizaran 10 electrocoagulaciones de 8 litros cada una, pues es la capacidad del equipo construido. Se realizaron 3 repeticiones del procedimiento antes descrito, ejecutando un total de 30 electrocoagulaciones, que proporcionan resultados para análisis estadísticos.

Es importante recalcar que las muestras principales fueron tomadas una por semana, por tanto las concentraciones de contaminantes del agua residual pueden variar debido a que la empresa TESQUIMSA cambia su proceso productivo dependiendo de los requerimientos de sus clientes o ventas.

Las muestras madre fueron caracterizadas según sus contaminantes principales que fueron:

- Sólidos sedimentables
- Sólidos suspendidos
- Sustancias solubles en hexano (aceites y grasas)
- Fenoles
- Sustancias activas al azul de metileno (detergentes aniónicos)

2.6.1. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE MUESTRAS

2.6.1.1. METODOLOGÍA PARA ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO

Las muestras son analizadas antes del tratamiento de electrocoagulación y después del mismo. Los parámetros de contaminación del agua residual seleccionados para determinar la efectividad del tratamiento y la funcionalidad del equipo construido son demanda química de oxígeno (DQO), turbidez, pH, conductividad eléctrica y temperatura.

- Espectrofotometría por determinación colorimétrica con el equipo marca HACH, modelo DR- 2010, para la medición de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).
- Espectrofotometría con el equipo marca HACH, modelo DR-4000. Para medición de turbidez.

Figura 17: Equipo de medición de DQO



HACH, modelo DR- 2010.

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

A continuación se detalla el procedimiento de medición de DQO utilizado en éste proyecto y establecido en el MANUAL DE ANALISIS DE AGUA, HACH.

Digestión



1. Homogeneizar 100 ml de muestra durante 30 segundos en una mezcladora.

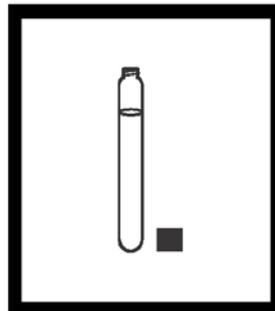
Nota: Mezclar la muestra antes de homogeneizarla. Para mejorar la exactitud y la reproducibilidad, verter la muestra homogeneizada en un vaso de precipitación de 250 ml y agitar suavemente con una placa agitadora magnética. Para muestras con grandes cantidades de sólidos, aumentar el tiempo de homogeneización.

Nota: Algunos de los productos químicos y aparatos utilizados en este procedimiento pueden atentar contra la salud y seguridad del usuario si se manejan incorrectamente o se utilizan accidentalmente de forma inapropiada. Sírvase leer todas las advertencias y la sección de seguridad de este manual. Usar protección para ojos y vestimentas adecuadas para la correcta protección del usuario. Si se produce un contacto, lavar el área afectada con agua corriente. Seguir las instrucciones cuidadosamente.



2. Conectar el reactor de DQO (demanda química de oxígeno). Precalear a 150°C. Colocar el escudo plástico enfrente del reactor.

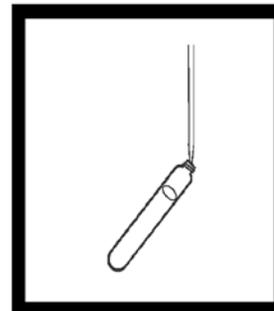
Nota: Asegurarse de que los dispositivos de seguridad estén en su lugar para proteger al analista de salpicaduras en caso de que ocurra una pérdida de reactivo.



3. Extraer la tapa de un tubo de reactivo para digestión de DQO para el rango apropiado:

| Rango de conc. de muestra (mg/l) | Tipo de tubo de reactivo para DQO |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| 0 a 150 | Rango bajo |
| 0 a 1500 | Rango alto |
| 0 a 15000 | Rango alto plus |

Nota: La mezcla de reactivo es sensible a la luz. Mantener los frascos no utilizados en el recipiente de envío opaco; si es posible, en un refrigerador. La luz que dé en los frascos durante la prueba no afectará los resultados.



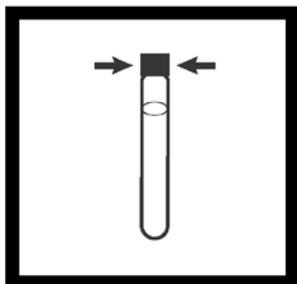
4. Sostener el tubo en un ángulo de 45 grados. Colocar con la pipeta 2,00 ml (0,2 ml para el rango 0 a 15000 mg/l) de muestra en el frasco.

Nota: Para el rango 0-15000 mg/l, colocar con la pipeta sólo 0,20 ml de muestra, no 2,00 ml, utilizando una pipeta TenSette. Para obtener mayor exactitud se debe analizar un mínimo de tres reproducciones y los resultados se deben promediar.

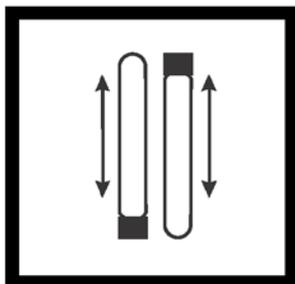
Nota: El reactivo derramado afectará la exactitud de la prueba y es peligroso para la piel y otros materiales. No realizar pruebas con frascos que han sido derramados. Si se produce un derrame, lavar con agua corriente.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

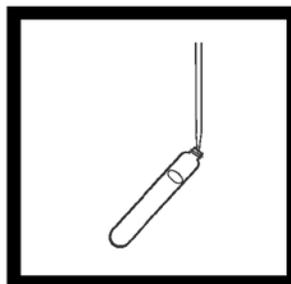


5. Volver a colocar la tapa del tubo bien ajustada. Enjuagar la parte exterior del tubo de DQO con agua desionizada y secarlo con una toalla de papel.



6. Sostener el tubo por la tapa y colocarlo sobre una tina. Invertir suavemente varias veces para mezclar los contenidos. Colocar el tubo en el Reactor DQO precalentado.

Nota: El tubo se calentará mucho durante la mezcla.



7. Preparar un blanco repitiendo los pasos 3 a 6, sustituyendo 2,00 ml (0,2 ml para el rango 0 a 15000 mg/l) de agua desionizada por la muestra.

Nota: Asegurarse de que la pipeta esté limpia.

Nota: Se debe realizar un blanco con cada juego de muestras. Realizar muestras y blancos con el mismo lote de tubos.

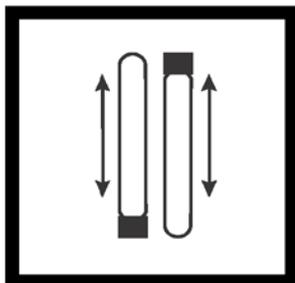


8. Calentar los tubos durante 2 horas.

Nota: Muchas muestras se digieren completamente en menos de dos horas. Si se desea, medir la concentración (mientras todavía está caliente) con intervalos de 15 minutos hasta que la lectura siga igual. Enfriar los tubos hasta temperatura ambiente para las mediciones finales.



9. Desconectar el reactor. Esperar aproximadamente 20 minutos hasta que los tubos se enfrien a 120°C o menos.



10. Invertir cada tubo varias veces mientras están aún calientes. Colocarlos en un estante. Esperar hasta que hayan alcanzado temperatura ambiente.

Nota: Si en la muestra reaccionada aparece un color verde puro, medir la DQO y, si es necesario, repetir la prueba con una muestra diluida.

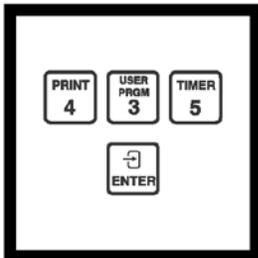


11. Utilizar una de las siguientes técnicas analíticas para medir la DQO:

- Método colorimétrico, 150 mg/l DQO
- Método colorimétrico, 1500 mg/l DQO
- Método colorimétrico, 15000 mg/l DQO

Nota: También hay disponible un método titulométrico. Contactar el Servicio al consumidor de Hach para obtener más detalles.

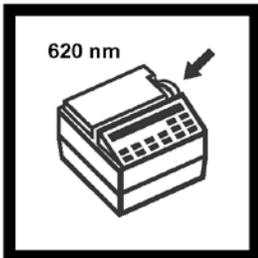
Determinación colorimétrica, 0 a 1500 y 0 a 15000 mg/l de DQO



1. Ingresar el número de programa almacenado para demanda química de oxígeno, alto rango.

Presionar: **4 3 5 ENTER**

La pantalla mostrará:
Fijar nm par 620



2. Girar el cuadrante de longitud de onda hasta que la pantalla pequeña muestre:

620 nm

Cuando se ajuste la longitud de onda correcta, en la pantalla aparecerá rápidamente:

Muestra cero

luego:

mg/LCOD HR



3. Colocar el adaptador para tubos de DQO en el soporte de celdas con el marcador hacia la derecha.



4. Limpiar la parte exterior del blanco con una toalla.

Nota: Limpiarla con una toalla húmeda seguida de una seca eliminará las huellas dactilares y otras marcas.



5. Colocar el blanco en el adaptador con el logotipo de Hach hacia el frente del instrumento. Colocar la tapa en el adaptador.

Nota: El blanco es estable cuando se almacena en la oscuridad; remitirse a Blancos para determinación colorimétrica a continuación de estos procedimientos.



6. Presionar: **ZERO**

La pantalla mostrará:

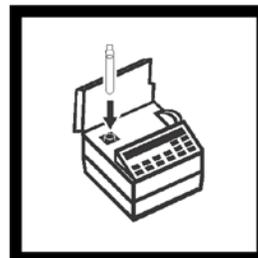
Puesta a cero...

luego:

0 mg/L COD HR



7. Limpiar la parte exterior del tubo de muestra con una toalla.



8. Colocar el tubo en el adaptador con el logotipo de Hach hacia el frente del instrumento. Colocar la tapa en el adaptador.



9. Presionar: **READ**

La pantalla mostrará:

Leyendo...

luego aparecerá el
resultado en mg/l de
DQO.

En la **Figura 18** se muestra el equipo de medición Multiparámetro que determina pH, temperatura y conductividad.

Figura 18: Equipo de medición de pH, temperatura y conductividad eléctrica



Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

Posteriormente se detalla el procedimiento que se siguió para la utilización del Multimetro:

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

1. Encender el equipo
2. Lavar rápidamente las sondas con agua destilada.



Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

3. Presionar el botón **READ**, y confirmar que el equipo esté encendido.
4. Escoger el parámetro a medir.
5. Presionar el botón **READ**, hasta que sean las unidades deseadas.
6. Sumergir las sondas en la muestra de la que se requiere la medición de parámetros.
7. Presionar **READ**, y esperar hasta que se estabilice la lectura.
8. A continuación se despliegan los valores de pH, temperatura o turbidez.

PROTOCOLO DE REGULARIZACIÓN DE pH

Protocolo de regularización de pH de Muestra 1

Agua residual de la Empresa TESQUIMSA

A continuación se presenta el procedimiento para regular el pH de la primera muestra (cuyo volumen por cada electrocoagulación es de 8 L) de agua residual:

| ACTIVIDAD | DESCRIPCIÓN |
|---|---|
| <p data-bbox="240 1037 555 1146">1. Medición Inicial de pH</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="639 1037 1349 1146">▪ Realizar éste procedimiento previo a cada una de las diez electrocoagulaciones (8L c/u). <li data-bbox="639 1184 1260 1220">▪ Medir el pH, utilizando un pH metro HACH. <li data-bbox="639 1257 1349 1367">▪ El promedio del pH inicial sin ajustar, de las 10 muestras es: <p data-bbox="781 1402 1268 1438" style="text-align: center;">$\text{pH Inicial}_{\text{promedio}} = 3,4392$ (pH ácido)</p> |

| | |
|---|--|
| <p>2. Regulación de pH a un rango entre 5-6</p>  | <p>Adición de una base, Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M), para regular el pH de la muestra.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Se tomó una muestra de 150 ml de agua residual. Mediante experimentación se determinó un volumen de 0,06 ml de base para regular dicha muestra a un $\text{pH}_{\text{promedio}} = 5,5217$ ▪ Mediante extrapolación se determinó un total de 0,35 ml $(\text{NaOH})/\text{L}_{\text{muestra}}$. ▪ Previo a cada electrocoagulación, por lo tanto, se añadieron 2,8 ml de Hidróxido de Sodio (NaOH), por cada 8 L de agua residual. |
| <p>3. Medición del pH después de la regulación</p>  | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Medir el pH, utilizando un pH metro HACH y confirmar que la muestra a ser tratada esté en un rango de pH entre 5-6 <p style="text-align: center;">$\text{pH Final}_{\text{promedio}} = 5,5217$</p> |

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

A continuación se presenta un ejemplo de los resultados de la regularización del pH de la MUESTRA 1 (TENSOACTIVOS):

| MUESTRA 1, SEMANA 1 (TENSOACTIVOS) | | | | | | |
|---|------------|--------------------|-------------------|-----------------------------------|-----------|---------------------|
| N° | pH | SIN AJUSTAR | CON AJUSTE | REGULADOR DE Ph [ml] | ml | L de muestra |
| 1 | pH: | 3,406 | 5,846 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,8 | 8 |
| 2 | pH: | 3,406 | 5,576 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,8 | 8 |
| 3 | pH: | 3,435 | 5,665 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,8 | 8 |

Protocolo de regularización de pH de Muestra 2

Agua residual de la Empresa TESQUIMSA

A continuación se presenta el procedimiento para regular el pH de la segunda muestra (cuyo volumen por cada electrocoagulación es de 8 L) de agua residual:

| ACTIVIDAD | DESCRIPCIÓN |
|---|---|
| <p>1. Medición Inicial de pH</p>  | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Realizar éste procedimiento previo a cada una de las diez electrocoagulaciones (8L c/u). ▪ Medir el pH, utilizando un pH metro HACH. ▪ El promedio del pH inicial sin ajustar, de las 10 muestras es: <p style="text-align: center;">$\text{pH Inicial}_{\text{promedio}} = 11,2688$ (pH básico)</p> |
| <p>2. Regulación de pH a un rango entre 5-6</p>  | <p>Adición de un ácido, Ácido Clorhídrico (HCL), para regular el pH de la muestra.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ En cada electrocoagulación, se añadieron 20 ml de Ácido Clorhídrico (HCL 0,2M), por cada 8 L de agua residual. |
| <p>3. Medición del pH después de la regulación</p>  | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Medir el pH, utilizando un pH metro HACH y confirmar que la muestra a ser tratada esté en un rango de pH entre 5-6 <p style="text-align: center;">$\text{pH Final}_{\text{promedio}} = 5,4649$</p> |

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

A continuación se presenta un ejemplo de los resultados de la regularización del pH de la MUESTRA 2 (ACEITES Y GRASAS):

| MUESTRA 2, SEMANA 2 (ACEITES Y GRASAS) | | | | | | |
|---|------------|--------------------|-------------------|---------------------------------|-----------|---------------------|
| N° | pH | SIN AJUSTAR | CON AJUSTE | REGULADOR DE pH [ml] | ml | L de muestra |
| 1 | pH: | 11,951 | 5,134 | Ácido Clorhídrico (HCL 0,2M) | 20 | 8 |
| 2 | pH: | 11,481 | 5,367 | Ácido Clorhídrico (HCL 0,2M) | 20 | 8 |
| 3 | pH: | 10,936 | 5,79 | Ácido Clorhídrico (HCL 0,2M) | 20 | 8 |

Protocolo de regularización de pH de Muestra 3

Agua residual de la Empresa TESQUIMSA

A continuación se presenta el procedimiento para regular el pH de la tercera muestra (cuyo volumen por cada electrocoagulación es de 8 L) de agua residual:

| ACTIVIDAD | DESCRIPCIÓN |
|--|--|
| <p>4. Medición Inicial de pH</p>  | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Realizar éste procedimiento previo a cada una de las diez electrocoagulaciones (8L c/u). ▪ Medir el pH, utilizando un pH metro HACH. ▪ El promedio del pH inicial sin ajustar, de las 10 muestras es: $\text{pH Inicial}_{\text{promedio}} = 3,4364 \text{ (pH ácido)}$ |
| <p>5. Regulación de pH a un rango entre 5-6</p>  | <p>Adición de un ácido, Ácido Clorhídrico (HCL), para regular el pH de la muestra.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ En cada electrocoagulación, se añadieron 20 ml de Ácido Clorhídrico (HCL 0,2M), por cada 8 L de agua residual. |

| | |
|---|--|
| <p>6. Medición del pH después de la regulación</p>  | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Medir el pH, utilizando un pH metro HACH y confirmar que la muestra a ser tratada esté en un rango de pH entre 5-6 <p style="text-align: center;">pH Final promedio= 5,714</p> |
|---|--|

A continuación se presenta un ejemplo de los resultados de la regularización del pH de la MUESTRA 3(TENSOACTIVOS):

| MUESTRA 3, SEMANA 3 (TENSOACTIVOS) | | | | | | |
|---|------------|-------------|------------|--------------------------------|------|--------------|
| N° | pH | SIN AJUSTAR | CON AJUSTE | REGULADOR DE Ph [ml] | ml | L de muestra |
| 1 | pH: | 3,396 | 5,691 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,56 | 8 |
| 2 | pH: | 3,41 | 5,637 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,56 | 8 |
| 3 | pH: | 3,429 | 5,803 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,56 | 8 |

En el **Anexo 2**, se encuentran las tablas comparativas de pH completas de las tres muestras.

2.6.1.2.METODOLOGÍA PARA ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE RESULTADOS

Un problema de análisis común es el que resulta de situaciones en las que los individuos se miden al principio de un periodo (por ejemplo al comienzo de un tratamiento) y después del periodo (después del tratamiento). Este diseño requiere un test nuevo, el test de la t por parejas que tiene en cuenta de una forma explícita la varianza sistemática entre individuos (Norman & Streiner, 1998).

$$tp = \frac{r}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$$

Ec. 11 (Norman & Streiner, 1998)

Donde r = diferencia entre antes y después del tratamiento

S = desviación estándar de r

n = número de muestras

La comparación de diferencias entre grupos de tratamiento y de control con el uso de un test por parejas sobre diferencia de valores (entre las observaciones inicial y final) es el más utilizado a nivel mundial. La estrategia básica consiste en utilizar pares de observaciones para eliminar la variancia entre individuos a partir del denominador del test. El test se emplea en diseños previos y posteriores y una variante de estrategia, en los diseños antes y después más potentes del grupo de control. La ventaja del test es mayor en cuanto los individuos o pares tienen diferencias sistemáticas entre ellos (Norman & Streiner, 1998).

2.7. OPERACIONALIDAD DEL ELECTROCOAGULADOR

Las variables de operación en el proceso de electrocoagulación son: voltaje, intensidad de corriente y tiempo de retención.

2.7.1. TIEMPO DE RETENCIÓN: es proporcional a la cantidad de iones metálicos disueltos del electrodo de sacrificio (ánodo). Cuando mayor es el tiempo de duración del proceso, mayor es la cantidad de iones disueltos en el sistema (Pantoja, 2012)

Por tanto,
$$t = \frac{Qv}{I}$$

Ec. 12 (Pantoja, 2012)

Donde; t = tiempo de reacción en segundos

Q = carga por unidad de volumen del agua residual en columbios/ litro

v = volumen del agua residual a tratar en litros

I = Intensidad de corriente

Dependiendo de las condiciones físicas y técnicas del reactor, la interacción de las variables: espacio y voltaje entre electrodos, determinan la magnitud del tiempo de reacción, así, entre más grande sea el espacio que separe los electrodos y más corto sea el tiempo de retención, habrá menos posibilidades de tratar todos los contaminantes. Debido a que la velocidad de movimiento iónico de un electrolito viene dada en centímetros por segundo, por unidad de diferencia de potencial, y el promedio de esta velocidad para la gran mayoría de los contaminantes por la necesidad de removerlos es cerca de una pulgada por hora por voltio por pulgada (Atkins, 2005).

$$tr = \frac{d^2}{1 \left[\frac{in^2}{hv} \right] * Vplaca}$$

Ec. 13 (Atkins, 2005)

Donde; d: distancia entre electrodos (pulgadas in)

tr: tiempo de retención (horas h)

V placa: voltaje por electrodo (voltios v)

2.7.2. DIFERENCIA DE POTENCIAL ELÉCTRICA O VOLTAJE: representa la cantidad de energía que una fuerza eléctrica imparte a la carga en su desplazamiento desde un punto A hasta B (Máximo & Alvarenga, 2002). El voltaje total suministrado por la fuente de energía al sistema de electrocoagulación determina el voltaje de cada electrodo, se determina por la siguiente ecuación:

$$Vp = \frac{Vtotal}{n}$$

Ec. 14 (Atkins, 2005)

Donde: Vp: voltaje por placa

V total: voltaje total de la fuente de poder

n: número de placas

2.7.3. INTESIDAD DE CORRIENTE: se define como la relación que existe entre una cantidad de carga y un intervalo de tiempo (Máximo & Alvarenga, 2002). La intensidad de corriente dentro del electrocoagulador depende del electrolito, es decir de la conductividad

eléctrica que el agua residual posea. Si la conductividad electrolítica (siemens) es conocida se puede determinar el amperaje al que se va a tratar el agua residual, dada por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1}{R} = \frac{CA}{d}$$

Ec. 15 (Maron y Prutton, 1994)

Donde; C= conductividad electrolítica

A= área de la superficie del electrodo

d= distancia entre electrodos

R= resistencia eléctrica

La ley de Ohm establece que la intensidad de una corriente eléctrica que pasa por un conductor, esto es la cantidad de electricidad que fluye por un segundo, viene determinada por la diferencia de potencial aplicado a través del mismo, y por la resistencia ofrecida por el conductor de la corriente (Maron y Prutton, 1994)

$$I = \frac{V}{R}$$

Ec. 16 (Maron y Prutton, 1994)

Donde; I= Intensidad de la corriente en amperios

V= voltaje

R= Resistencia

Al reemplazar la ecuación 15 en la ecuación 14, se obtiene:

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

$$I = \frac{C * A * V}{d}$$

Ec. 17 Reemplazo de la ec. 15 y ec.14

También se puede determinar la intensidad de corriente, si se conoce la conductividad eléctrica del agua residual por medio de la siguiente ecuación:

$$I = \frac{A * V_{total}}{C_i * d}$$

Ec. 18 (Ríos, 2006)

Donde: A: área de reacción en centímetros al cuadrado

C_i : Conductividad de agua a tratar en μ ohm/cm.

I : Corriente total en Amperios.

V total : Voltaje del sistema en Voltios.

d : Distancia entre electrodos.

Conociendo la intensidad de corriente y el área transversal de reacción (área mojada del electrodo), se determina la densidad de corriente al aplicar la siguiente ecuación:

$$i = \frac{I}{A}$$

Ec. 19 (Hernandez, 2011)

Donde; i = Densidad de corriente en Amperios/ metro cuadrado

I = intensidad de corriente en Amperios

A= Área de reacción del electrodo en un metro cuadrado

2.7.4. CÁLCULO TEÓRICO DE VARIABLES DE OPERACIÓN

2.7.4.1. CÁLCULO TEÓRICO DEL VOLTAJE

El voltaje total es aquel generado por la fuente de poder, en la cual se puede regular un voltaje de 6, 12 y 24 voltios, por lo tanto (Ec. 13. Atkins, 2005);

$$Vp = \frac{Vtotal}{n}$$

- CALCULO A 6 v

$$Vp = \frac{6 [v]}{20}$$

$$Vp = 0,3 [v]$$

- CALCULO A 12v

$$Vp = \frac{12 [v]}{20}$$

$$Vp = 0,6 [v]$$

- CALCULO A 24v

$$Vp = \frac{24 [v]}{20}$$

$$Vp = 1,2 [v]$$

2.7.4.2. CÁLCULO TEÓRICO DEL TIEMPO DE RETENCIÓN: depende del voltaje por electrodo, a continuación se realizan los cálculos respectivos para cada nivel de voltaje (Ec. 12 Pantoja, 2012)

$$tr = \frac{d^2}{1 \left[\frac{in^2}{hv} \right] * V}$$

1 cm \approx 0,39 in

- Calculo para 0,3 v

$$tr = \frac{(0,39[in])^2}{1 \left[\frac{in^2}{hv} \right] * 0,3[v]}$$

$$tr = 0,502 [h] \approx 30 \text{ minutos}$$

- Calculo para 0,6 v

$$tr = \frac{(0,39[in])^2}{1 \left[\frac{in^2}{hv} \right] * 0,6[v]}$$

$$tr = 0,25 [h] \approx 15 \text{ minutos}$$

- Calculo para 1,2 v

$$tr = \frac{(0,39[in])^2}{1 \left[\frac{in^2}{hv} \right] * 1,2 [v]}$$

$$tr = 0,13 [h] \approx 7,6 \text{ minutos}$$

2.7.4.3. CÁLCULO TEÓRICO DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE (Ec. 17. Marton y Prutton, 1994)

$$I = \frac{A * V}{Ci * d}$$

Se determina la conductividad eléctrica de las 3 muestras principales:

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

Tabla 4: Promedio de Conductividad eléctrica por muestra

| MUESTRA 1, SEMANA 1 (TENSOACTIVOS) | | | |
|---|--------------------------------|--------------|-------------------|
| DÍA | CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA | | DIFERENCIA |
| | INICIAL | FINAL | |
| L | 1096 | 1184 | -88 |
| | 1097 | 1177 | -80 |
| M | 1093 | 1200 | -107 |
| | 1084 | 1181 | -97 |
| X | 1097 | 1192 | -95 |
| | 1096 | 1199 | -103 |
| J | 1081 | 1196 | -115 |
| | 1084 | 1181 | -97 |
| V | 1093 | 1171 | -78 |
| | 1081 | 1187 | -106 |
| PROMEDIO | 1090,2 | 1186,8 | -96,6 |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

| MUESTRA 2, SEMANA 2 (ACEITES Y GRASAS) | | | |
|---|--|--------------------------------------|-------------------|
| DÍA | CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA INICIAL | CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA FINAL | DIFERENCIA |
| L | 1527 | 1753 | -226 |
| | 1406 | 1774 | -368 |
| M | 1478 | 1836 | -358 |
| | 1452 | 1832 | -380 |
| X | 1596 | 1726 | -130 |
| | 1490 | 1844 | -354 |
| J | 1518 | 1826 | -308 |
| | 1464 | 1895 | -431 |
| V | 1512 | 1819 | -307 |
| | 1479 | 1830 | -351 |
| PROMEDIO | 1492,2 | 1813,5 | -321,3 |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

| MUESTRA 3, SEMANA 3 (TENSOACTIVOS) | | | |
|---|--|--|-------------------|
| DÍA | CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA INICIAL | CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA FINAL | DIFERENCIA |
| L | 1025 | 1369 | -344 |
| | 1060 | 1349 | -289 |
| M | 1080 | 1345 | -265 |
| | 974 | 1348 | -374 |
| X | 1012 | 1350 | -338 |
| | 1061 | 1369 | -308 |
| J | 1092 | 1368 | -276 |
| | 980 | 1355 | -375 |
| V | 1028 | 1354 | -326 |
| | 1081 | 1337 | -256 |
| PROMEDIO | 1039,3 | 1354,4 | -315,1 |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

$$1[\mu\text{S}/\text{cm}] = 1 [\mu\text{Ohm}/\text{cm}]$$

El nivel de voltaje total seleccionado para comprobar la funcionalidad del equipo construido es de 6 [v]

- Cálculo de intensidad de corriente para la muestra 1

$$I = \frac{5200[\text{cm}^2] * 6[\text{v}]}{1090 \left[\frac{\mu\text{Ohm}}{\text{cm}} \right] * 1[\text{cm}]}$$

$$I = 28,62 [\text{A}]$$

- Cálculo de intensidad de corriente para la muestra 2

$$I = \frac{5200[\text{cm}^2] * 6[\text{v}]}{1492 \left[\frac{\mu\text{Ohm}}{\text{cm}} \right] * 1[\text{cm}]}$$

$$I = 20,9 [\text{A}]$$

- Cálculo de intensidad de corriente para la muestra 3

$$I = \frac{5200[\text{cm}^2] * 6[\text{v}]}{1039 \left[\frac{\mu\text{Ohm}}{\text{cm}} \right] * 1[\text{cm}]}$$

$$I = 30 [\text{A}]$$

2.7.4.4. MANUAL DE FUNCIONAMIENTO DEL ELECTROCOAGULADOR.

Advertencia: operar el electrocoagulador después de haber leído el manual de funcionamiento del mismo, puesto que éste equipo opera con corrientes eléctricas y contaminantes, que podrían causar serias lesiones y daños a la salud.

2.7.4.4.1. Indicaciones generales y de seguridad

- a. **Uso de equipo de protección personal durante el manejo del electrocoagulador.**



El electrocoagulador es un equipo del tipo celda electrolítica, transforma energía eléctrica en reacciones químicas. Al operar el equipo se trabaja con electricidad y por tanto éste constituye un peligro, aunque se opera con corrientes de muy baja tensión pues no superan en ningún momento los 50 [v].|



Durante el proceso de electrocoagulación se genera Hidrógeno (H_2) altamente inflamable. Ésta generación es imperceptible al oído, al olfato y casi en su totalidad a la vista. Por lo

que es necesario utilizar éste equipo lejos de toda posibilidad de generación de chispa o fuego, para evitar explosiones o incendios.



Además se debe utilizar gafas de protección, mandil y guates de látex para la manipulación de las aguas residuales destinadas al tratamiento de electrocoagulación, así como para el posterior lavado del equipo, ya que dependiendo de las aguas éstas pueden contener químicos nocivos para la salud.

b. Transporte

El peso del equipo en total suma 17.5 [kg], siendo 11.4 [kg] para el reactor conjuntamente con las 10 placas de metal y 6.1 [kg] para la fuente de alimentación. Cargas de entre 20-25 [kg] se las considera como una carga de difícil manipulación para la mayoría de personas. El peso del equipo no supone un peligro, sin embargo, se recomienda levantarlo correctamente.



La forma correcta de levantar el equipo es doblando las rodilla, manteniendo la columna recta. Colocando los pies en la posición que se observa en la imagen superior. Dado que el equipo no supera los 20 Kg y la frecuencia de su transporte no es significativa, pues se encontrará instalado en el laboratorio, no hay más recomendaciones.

2.7.4.4.2. Manejo del equipo

a. Procedimiento previo al encendido del equipo

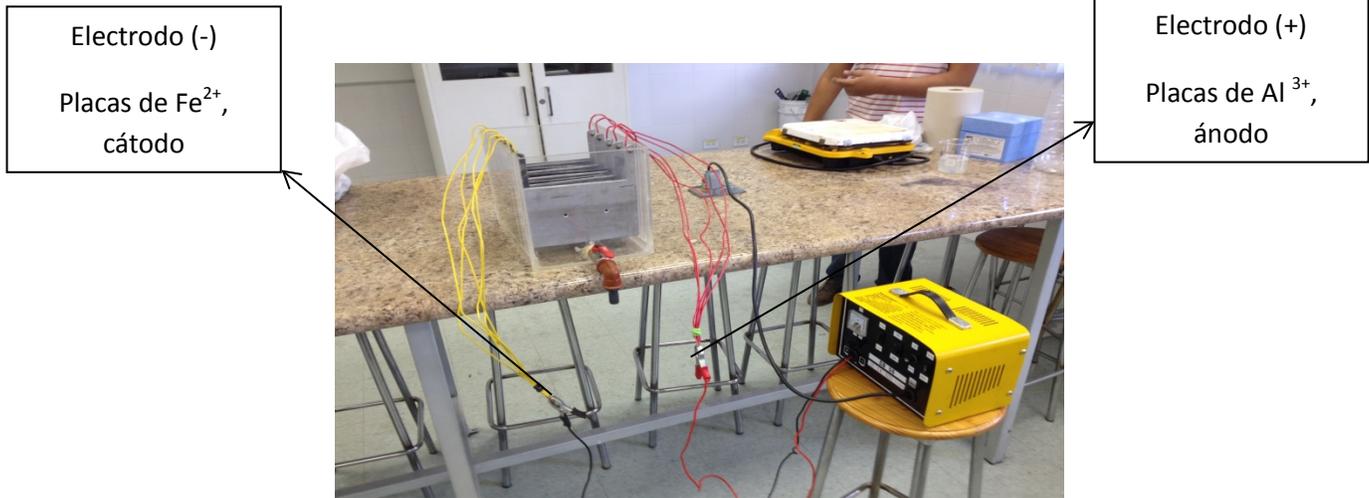
Antes de prender el electrocoagulador, cerciorarse de que las placas de aluminio (Al^{3+}) y hierro (Fe^{2+}), se encuentren correctamente emplazadas en sus rieles, para que no tengan contacto entre sí y evitar un cortocircuito.

Los electrodos de aluminio (Al^{3+}) son aquellos de color gris plateado y los de hierro (Fe^{2+}) de color gris oscuro. Deben estar fijos y correctamente conectados con los electrodos de la fuente de alimentación.

Las placas de aluminio (Al^{3+}) funcionarán como ánodo y deberán ser conectadas con el electrodo de carga positiva (rojo) de la fuente de energía. Las placas de hierro (Fe^{2+}) actuarán como cátodos y serán conectadas con el electrodo de carga negativa (negro) de la fuente de energía.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño



Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

Verter el agua residual dentro del reactor, mientras el equipo se encuentre apagado.

El equipo está diseñado para el tratamiento de 8 L de agua residual, para que la espuma constituida por los flóculos de contaminantes pueda ser removida con facilidad.

Importante: es recomendable previo a la utilización del electrocoagulador, el cálculo del tiempo de retención e intensidad de corriente con el que se va tratar un determinado tipo de agua residual.

b. Encendido del equipo

La fuente de energía se conecta a un tomacorriente de 110[v]. Tiene amperaje regulable que va desde 0-50 [A] y voltajes de 6,12 y 24 [v].

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño



Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

Cuando la fuente de energía está en MAXIMO, el voltaje puede ser de 12 o de 24 [v].



Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

Si la fuente de energía está en MINIMO, los voltajes se reducen a la mitad. Es decir el botón de 12 [v] equivale a 6 [v] y el de 24 [v] a 12[v].

2.7.4.4.3. Mantenimiento preventivo del equipo

a. Limpieza del equipo

La limpieza del reactor y las placas metálicas después de electrocoagular es esencial, puesto que, quedan remanentes de óxido, espuma y sustancias contaminantes. Al ser las placas metálicas removibles, se puede lavar tanto el reactor como las placas por separado.

La limpieza del reactor empieza por el desfogue del agua tratada, a través de la llave de paso instalada en el mismo. Los remanentes de espuma y suciedad pueden ser limpiados con detergente, agua y estropajo.

La limpieza de las placas metálicas, dependiendo de las sustancias contaminantes del agua residual, puede ser simplemente con detergente, agua y estropajo o si existiesen sustancias muy corrosivas u oxidantes se debe limpiar con productos de limpieza industrial. Es imperativo que se remueva la capa de óxido formado en las placas, ya que al no hacerlo, disminuiría la eficiencia del proceso en tratamientos posteriores.

b. Cambio de piezas

Reactor: el polimetilmetacrilato (PMMA) es un material resistente y duradero, el cambio del mismo no será necesario hasta dentro de algunos años, puesto que no se encuentra a la interperie y no se lo utiliza periódicamente. Aproximadamente cinco años, más o menos dependiendo del manejo que se le dé.

Placas de metal (electrodos): las placas de aluminio (Al^{3+}) y hierro (Fe^{2+}) se recomienda cambiarlas en su totalidad en un período de un año, puesto que se oxidan y corroen inevitablemente y éstas capas de óxido disminuyen la efectividad del tratamiento.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

Cables de Cobre N°16: el cambio de estas piezas debe hacerse únicamente si presentan roturas o desgaste, es recomendable verificar el buen estado de los mismos antes de cualquier uso del equipo.

Fuente de alimentación de energía CB 50 DC: dependiendo del uso que se le dé, no se prevé un cambio de ésta en un corto plazo, sin embargo, en el manual se establece un tiempo aproximado de vida de 3 años.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

Tabla 5 : REFERENCIAS DE RANGOS DE TRABAJO SEGÚN DIFERENTES TIPOS DE AGUAS RESIDUALES

| Agua residual | Corriente | Ánodo / cátodo | Parámetro eléctrico | Conductividad $\mu\text{S}/\text{cm}$ | pH | Contaminante | Remoción % | Tiempo (min) | Referencia |
|--|-----------|----------------|---------------------------------|---------------------------------------|-------|---------------------------------|-----------------------|--------------|------------|
| Colorantes textiles | CD | Al/Fe | $\geq 150 \text{ A}/\text{m}^2$ | 1000-4000 | 3- 6 | Turbiedad | 98 | 15 | 33 |
| | | | | | | DQO | 61-65 | | |
| | | Fe/Al | 80-100 A/m^2 | 1000-4000 | 3-7 | Turbiedad | 75-98 | 10 | |
| | | | | | | DQO | 47-77 | | |
| cercano a 10 | Turbiedad | 87 | | | | | | | |
| | DQO | 26 | | | | | | | |
| Electroplataado, industria del Cr, fertilizantes e industria de los metales. | — | Fe/Fe | 30 A/m^2 | 1500 | 5-6 | Cr ⁺⁺ | 97 | — | 20 |
| Restaurantes | CD | Al/Al | 1,8-6,8V | 1290 | 6,94 | DQO | 67 | 15 | 14 |
| | | | | | | Grasas y aceites | >97 | | |
| | | | | | | SS | 90 | | |
| Alimentos(gelatinas) | CD | Fe/Al | 6,26 A/m^2 | 1,2Mhos | 10,86 | Grasas y aceites | Agua cruda 1195ppm | 15 | 16 |
| | | | | | | | Agua tratada 115ppm | | |
| | | | | | | DQO | Agua cruda 3104ppm | | |
| | | | | | | | Agua tratada 931,2ppm | | |
| Lavandería | CA | Al/ | 32V/30A | — | 5-9 | DQO | 70 | 5 | 28 |
| | | | | | | Turbiedad P-fosfato surfactante | 90 | | |
| Agua consumo humano | | Fe/ | 1,53 A/m^2 | — | 6-9 | As | >99 | 20 | 36 |
| | | Al/ | | | | | 37 | | |
| | | Ti/ | | | | | >58 | | |
| Industria del boro | CD | Al/ | 1,2-6 mA/cm^2 | bajos | 8 | B | 97 | — | 41 |
| Suspensión de látex | CD | Fe/Fe | 1,1 A/Dm^2 | 0,6-1 S/m | 6,5-7 | estireno | Remanente 7% | 26 | 38 |
| | | | | | | vinilo | Remanente 8% | | |
| Industria semiconductores (pulido mecánico químico) | CD | Al/Fe | 93 A/m^2 | 450-470 | 7,3 | color | 96 | < 30 | 19 |
| | | | | | | Cu | 99 | | |
| | | | | | | DQO | 88,7 | | |
| Producción aceite de oliva | CD | Al/ | 75 mA/cm^2 | — | 4-6 | DQO | 76 | 25 | 22 |
| | | | | | | polifenoles | 91 | | |
| | | | | | | color | 65 | | |

2.8. SELECCIÓN DE INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

Se establece a la experimentación como instrumento de medición de variables o parámetros de investigación para el presente proyecto, en el cual se diseña y construye el electrocoagulador aplicado a nivel de laboratorio con fines pedagógicos. Además para comprobar su funcionalidad se realizan pruebas piloto y estudios experimentales analizando el comportamiento de las muestras dentro del electrocoagulador dependiendo de las variables de funcionalidad de equipo por ejemplo voltaje, intensidad de corriente de la fuente de energía, componentes y concentraciones de los contaminantes de la muestra antes establecidos.

2.9. VALIDEZ Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS

Se asegura que todos los equipos utilizados para la medición de parámetros de contaminación del agua estén calibrados previo a su utilización. Se determinan protocolos y procedimientos a seguir para realizar una correcta caracterización del agua residual antes y después del ingreso al sistema de electrocoagulación. Se toma una muestra blanco la cual no será sometida a la electrocoagulación, pues será la base para los análisis a realizar.

Se realizan varias repeticiones y pruebas experimentales hasta obtener datos estadísticamente confiables, de este modo realizar un manual de operación del equipo construido.

2.10. PROCESAMIENTO DE DATOS

Los datos recopilados de los análisis realizados del agua residual antes y después del tratamiento de electrocoagulación serán procesados en bases de datos de hojas electrónicas en el programa Microsoft Excel.

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS

A continuación en las **Tablas 6, 7 y 8** se presentan la cuantificación de los contaminantes principales de las tres muestras madre.

Tabla 6: MUESTRA 1 (DETERGENTES ANIÓNICOS O TENSOACTIVOS)

| PARÁMETRO | UNIDADES | RESULTADOS | MÉTODO |
|--|----------|------------|--|
| Sustancia Activa al Azul de Metileno (Detergentes Aniónicos) | mg/L | 4,9 | MAM-74/APHA 5540 C MODIFICADO |
| Fenoles | mg/L | < 0,013 | MAM-46/APHA 5530 B MODIFICADO Y COLORIMETRIA DE HACH |
| Sustancias Solubles en Hexano (Aceites y Grasas) | mg/L | 2,4 | MAM-40/APHA5520 B MODIFICADO |

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

| | | | |
|-----------------------|------|------|-------------------------------------|
| Sólidos suspendidos | mg/L | 2120 | MAM-31/APHA 2540 D MODIFICADO |
| Sólidos sedimentables | mg/L | 6 | MAM-28/APHA 2540 F MODIFICADO |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

La MUESTRA 1 es un agua residual constituida mayoritariamente por tensoactivos, aceites y grasas, con una alta cantidad de sólidos suspendidos. Siendo los tensoactivos el contaminante principal de ésta muestra.

Tabla 7: MUESTRA 2 (ACEITES Y GRASAS)

| PARÁMETRO | UNIDADES | RESULTADOS | MÉTODO |
|---|----------|------------|--|
| Sustancia Activa al Azul de Metileno (Detergentes Aniónicos) | mg/L | 0,889 | MAM-74/APHA 5540 C MODIFICADO |
| Fenoles | mg/L | 0,162 | MAM-46/APHA 5530 B MODIFICADO Y COLORIMETRIA DE HACH |

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

| | | | |
|--|------|-----|-------------------------------|
| Sustancias Solubles en Hexano (Aceites y Grasas) | mg/L | 3,8 | MAM-40/APHA5520 B MODIFICADO |
| Sólidos suspendidos | mg/L | 72 | MAM-31/APHA 2540 D MODIFICADO |
| Sólidos sedimentables | mg/L | <2 | MAM-28/APHA 2540 F MODIFICADO |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

La MUESTRA 2, presenta como contaminante principal las grasas y aceites, estando los tensoactivos en una cantidad muy por debajo de los mismos.

Tabla 8: MUESTRA 3 (DETERGENTES ANIÓNICOS O TENSOACTIVOS)

| PARÁMETRO | UNIDADES | RESULTADOS | MÉTODO |
|--|----------|------------|-------------------------------|
| Sustancia Activa al Azul de Metileno (Detergentes Aniónicos) | mg/L | 4,2 | MAM-74/APHA 5540 C MODIFICADO |

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

| | | | |
|--|------|-------|--|
| Fenoles | mg/L | 0,026 | MAM-46/APHA 5530 B MODIFICADO Y COLORIMETRIA DE HACH |
| Sustancias Solubles en Hexano (Aceites y Grasas) | mg/L | 1,4 | MAM- 40/APHA5520 B MODIFICADO |
| Sólidos suspendidos | mg/L | 1023 | MAM-31/APHA 2540 D MODIFICADO |
| Sólidos sedimentables | mg/L | 2 | MAM-28/APHA 2540 F MODIFICADO |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

La MUESTRA 3 es tensoactiva y presenta un alto número de sólidos suspendidos.

A continuación en la **Tabla 9** se presentan las variables de funcionamiento seleccionadas para comprobar la operacionalidad del electrocoagulador batch construido.

Tabla 9: Variables de funcionamiento para pruebas experimentales

| VARIABLES DE FUNCIONAMIENTO | CANTIDAD/ TIPO |
|------------------------------------|---------------------------|
| Ánodo | Aluminio |
| Electrodos | 20 |
| Voltaje | 6 [v] |
| Intensidad de corriente | 20 [A] |
| Tiempo de retención | 30 min |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

El nivel de voltaje depende de la capacidad de la fuente de energía, la cual se regula para 6[v], 12 [v] y 24[v]. Para estandarizar el tratamiento y someter a la muestras a iguales variables de operación, se seleccionó un nivel de 6[v] Y 20 [A], pues mediante pruebas experimentales se pudo deducir que las instalaciones eléctricas de la Facultad no soportan cambios bruscos de flujos eléctricos, por lo tanto se evitan daños a las instalaciones y equipos electrónicos de los laboratorios, además de un sobrecalentamiento de la fuente de energía. Mediante los cálculos teóricos realizados previamente, se determina un tiempo de retención de 30 minutos.

3.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1.1. RESULTADOS SEGÚN LOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS POR EL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN

En la **Tabla 10** se presentan los resultados obtenidos de la muestra 1 en base a los análisis físicos químicos de la demanda química de oxígeno antes y después de las 10 repeticiones realizadas dentro del electrocoagulador.

Tabla 10: Resultados comparativos DQO inicial vs final de la muestra principal 1, semana 1

| MUESTRA 1, SEMANA 1 | | | | |
|---------------------|-------------------|----------------------------|------------|------------------------|
| DÍA | DQO INICIAL (ppm) | DQO FINAL (ppm) | DIFERENCIA | EFICIENCIA DE REMOCIÓN |
| L | 2180 | 625 | -1555 | 71,330 |
| | 2190 | 687 | -1503 | 68,630 |
| M | 2160 | 638 | -1522 | 70,463 |
| | 2210 | 641 | -1569 | 70,995 |
| X | 2190 | 623 | -1567 | 71,553 |
| | 2180 | 619 | -1561 | 71,606 |
| J | 2160 | 644 | -1516 | 70,185 |
| | 2150 | 625 | -1525 | 70,930 |
| V | 2140 | 616 | -1524 | 71,215 |
| | 2180 | 647 | -1533 | 70,321 |
| PROMEDIO | 2174 | 636,5 | -1537,5 | 70,723 |
| | | desviación estándar | 23,505 | 0,888 |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

Se deduce un promedio de DQO inicial para la muestra 1 de 2174 ppm y después de los 30 minutos de electrocoagulación a 6 [v] y 20 [A] la DQO disminuye a un promedio de 636 ppm. Se puede evidenciar una reducción promedio de 1537 ppm de DQO para la muestra 1, lo que indica un porcentaje de remoción de DQO promedio del 70,72%.

En la **Tabla 11** se indican los resultados obtenidos de los análisis de DQO para la muestra 2 antes y después de las 10 repeticiones realizadas del proceso de electrocoagulación.

Tabla 11: Resultados comparativos DQO inicial vs final de la muestra principal 2, semana 2

| MUESTRA 2, SEMANA 2 | | | | |
|---------------------|-------------------|----------------------------|------------|------------------------|
| DÍA | DQO INICIAL (ppm) | DQO FINAL (ppm) | DIFERENCIA | EFICIENCIA DE REMOCIÓN |
| L | 2610 | 1040 | -1570 | 60,153 |
| | 2620 | 1080 | -1540 | 58,779 |
| M | 2610 | 1070 | -1540 | 59,004 |
| | 2690 | 1080 | -1610 | 59,851 |
| X | 2540 | 1020 | -1520 | 59,843 |
| | 2670 | 1070 | -1600 | 59,925 |
| J | 2670 | 1090 | -1580 | 59,176 |
| | 2610 | 1070 | -1540 | 59,004 |
| V | 2620 | 1060 | -1560 | 59,542 |
| | 2590 | 1090 | -1500 | 57,915 |
| PROMEDIO | 2623 | 1067 | -1556 | 59,319 |
| | | desviación estándar | 34,7051069 | 0,679 |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

Se determina un promedio de DQO inicial de 2623 ppm para la muestra 2, después de las 10 repeticiones de electrocoagulación realizadas se establece un promedio de DQO final de 1067 ppm, lo que indica un porcentaje de remoción promedio de DQO de 50,31% y una disminución promedio de DQO de 1556 ppm para la muestra 2.

En la **Tabla 12** se presentan los resultados de DQO antes y después de las 10 repeticiones de electrocoagulación realizadas para la muestra 3.

Tabla 12: Resultados comparativos DQO inicial vs final de la muestra principal 3, semana 3

| MUESTRA 3, SEMANA 3 | | | | |
|---------------------|-------------------|---------------------|------------|------------------------|
| DÍA | DQO INICIAL (ppm) | DQO FINAL (ppm) | DIFERENCIA | EFICIENCIA DE REMOCIÓN |
| L | 1810 | 520 | -1290 | 71,271 |
| | 1880 | 541 | -1339 | 71,223 |
| M | 1870 | 509 | -1361 | 72,781 |
| | 1890 | 534 | -1356 | 71,746 |
| X | 1860 | 595 | -1265 | 68,011 |
| | 1880 | 586 | -1294 | 68,830 |
| J | 1870 | 558 | -1312 | 70,160 |
| | 1850 | 554 | -1296 | 70,054 |
| V | 1840 | 504 | -1336 | 72,609 |
| | 1870 | 526 | -1344 | 71,872 |
| PROMEDIO | 1862 | 542,7 | -1319,3 | 70,86 |
| | | desviación estándar | 32,328 | 1,572 |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

Se determina un promedio de DQO inicial de la muestra 3 de 1862 ppm, después del tratamiento de electrocoagulación se establece un promedio de DQO final de 543 ppm. Se puede deducir un porcentaje de remoción de DQO promedio del 70,85% y una reducción promedio de DQO de 1319 ppm.

A fin de establecer si es que existe diferencia estadísticamente significativa entre los niveles de DQO se utilizó el test de significación de t pareada antes establecida, el cual se basa en el análisis de la diferencia de cada una de las muestras antes y después del tratamiento. La hipótesis estadística que se desea comprobar es que los valores de DQO posterior al tratamiento son menores a los valores de DQO antes del tratamiento, al realizar el cálculo se comprueba la hipótesis estadística de trabajo, pues se obtuvo una t de 41,1 la cual al validar en la tabla crítica de los valores de t con 29 grados de libertad, indica que p es menor a 0,0005; resultado que demuestra entonces que los valores de DQO son menos después del tratamiento que antes del mismo, por ende esta diferencia es estadísticamente significativa.

3.1.2. RESULTADOS SEGÚN LOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS DE LA TURBIDEZ DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS POR EL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN

A continuación en la **Tabla 13** se detalla los resultados de turbidez obtenidos antes y después del proceso de electrocoagulación realizados a las 10 repeticiones de la muestra 1.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

Tabla 13: Resultados comparativos turbidez inicial vs final de la muestra principal 1, semana 1

| MUESTRA 1, SEMANA 1 | | | | |
|---------------------|------------------|----------------------------|------------|------------------------|
| DÍA | TURBIDEZ INICIAL | TURBIDEZ FINAL | DIFERENCIA | EFICIENCIA DE REMOCIÓN |
| L | 87 | 58 | -29 | 33,333 |
| | 91 | 60 | -31 | 34,066 |
| M | 90 | 61 | -29 | 32,222 |
| | 87 | 62 | -25 | 28,736 |
| X | 90 | 57 | -33 | 36,667 |
| | 92 | 63 | -29 | 31,522 |
| J | 86 | 59 | -27 | 31,395 |
| | 92 | 60 | -32 | 34,783 |
| V | 93 | 59 | -34 | 36,559 |
| | 88 | 62 | -26 | 29,545 |
| PROMEDIO | 89,6 | 60,1 | -29,5 | 32,883 |
| | | desviación estándar | 2,991 | 2,706 |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

Se denota un promedio de turbidez inicial para la muestra 1 de 89,6 [NTU], después de que la muestra 1 fue sometida al proceso de electrocoagulación con 10 repeticiones se determina un promedio final de turbidez de 60 [NTU], obteniendo un porcentaje promedio de remoción de turbidez del 32,33% y una disminución promedio de 29,5 [NTU] para la muestra 1.

En la **Tabla 14** se muestran los resultados de los análisis realizados de turbidez antes y después el proceso de electrocoagulación con 10 repeticiones para la muestra 2.

Tabla 14: Resultados comparativos turbidez inicial vs final de la muestra principal 2, semana 2

| MUESTRA 2, SEMANA 2 | | | | |
|----------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------|-------------------------------|
| DÍA | TURBIDEZ INICIAL | TURBIDEZ FINAL | DIFERENCIA | EFICIENCIA DE REMOCIÓN |
| L | 108 | 71 | -37 | 34,259 |
| | 105 | 72 | -33 | 31,429 |
| M | 99 | 74 | -25 | 25,253 |
| | 102 | 70 | -32 | 31,373 |
| X | 110 | 72 | -38 | 34,545 |
| | 102 | 73 | -29 | 28,431 |
| J | 98 | 72 | -26 | 26,531 |
| | 104 | 74 | -30 | 28,846 |
| V | 97 | 72 | -25 | 25,773 |
| | 112 | 71 | -41 | 36,607 |
| PROMEDIO | 103,7 | 72,1 | -31,6 | 30,305 |
| | | desviación estándar | 5,661 | 3,968 |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

Se deduce que el promedio inicial de la turbidez para la muestra 2 es de 103,7 [NTU], después del tratamiento se calcula un promedio de turbidez final de 72,1 [NTU] para las 10 repeticiones realizadas con la muestra 2, con lo cual se denota un porcentaje de remoción promedio de turbidez del 30,3% y una disminución promedio de 31,6 [NTU].

A continuación en la **Tabla 15** se muestran los resultados obtenidos de los análisis de turbidez realizados a la muestra 3 antes y después de la electrocoagulación con 10 repeticiones.

Tabla 15: Resultados comparativos turbidez inicial vs final de la muestra principal 3, semana 3

| MUESTRA 3, SEMANA 3 | | | | |
|---------------------|------------------|----------------------------|------------|------------------------|
| DÍA | TURBIDEZ INICIAL | TURBIDEZ FINAL | DIFERENCIA | EFICIENCIA DE REMOCIÓN |
| L | 85 | 49 | -36 | 42,353 |
| | 82 | 48 | -34 | 41,463 |
| M | 83 | 51 | -32 | 38,554 |
| | 84 | 50 | -34 | 40,476 |
| X | 80 | 46 | -34 | 42,500 |
| | 81 | 51 | -30 | 37,037 |
| J | 83 | 48 | -35 | 42,169 |
| | 80 | 45 | -35 | 43,750 |
| V | 84 | 47 | -37 | 44,048 |
| | 82 | 45 | -37 | 45,122 |
| PROMEDIO | 82,4 | 48 | -34,4 | 41,747 |
| | | desviación estándar | 2,171 | 2,492 |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

Se establece un promedio de la turbidez inicial para la muestra 3 de 82,4 [NTU] y un promedio de turbidez final de 48 [NTU] después del tratamiento. Se puede denotar un porcentaje de remoción promedio de turbidez de 41,74% y una disminución promedio de 34,4 [NTU] de la muestra 3.

Con el objetivo de establecer si es que existe diferencia estadísticamente significativa entre los valores de turbidez antes y después de la electrocoagulación, se utilizó el test de significación de t pareada antes establecida, el cual se basa en el análisis de la diferencia de cada una de las muestras antes y después del tratamiento. La hipótesis estadística que se desea comprobar es que los valores de turbidez posterior al tratamiento son menores a los valores de turbidez antes del tratamiento, al realizar el cálculo se comprueba la hipótesis estadística de trabajo, pues se obtuvo una t de 23,49 la cual al validar en la tabla crítica de los valores de t con 29 grados de libertad, indica que p es menor a 0,001; resultado que demuestra entonces que los valores de turbidez son menos después del tratamiento que antes del mismo, por ende esta diferencia es estadísticamente significativa.

3.1.3. RESULTADOS SEGÚN LOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS DEL pH DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS POR EL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN

Se debe recalcar que el pH de las muestras fue previamente regulado, mediante el protocolo de regularización de pH a un rango de trabajo de 5 a 6, debido a que investigaciones previas demuestran mejor disolución del ánodo de aluminio (electrodo de sacrificio).

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

Una vez regulado el pH de las muestras a un rango de trabajo de entre 5-6, se procedió a realizar los tratamientos de electrocoagulación, obteniendo los siguientes resultados:

En la **Tabla 16** se presentan los resultados y las variaciones de pH obtenidos para la muestra 1 antes y después de las electrocoagulaciones realizadas.

Tabla 16: Resultados comparativos pH iniciales vs final de la muestra principal 1, semana 1

| MUESTRA 1, SEMANA 1 (TENSOACTIVOS) | | | |
|------------------------------------|------------|----------|------------|
| DÍA | pH INICIAL | pH FINAL | DIFERENCIA |
| L | 5,846 | 10,4 | -4,554 |
| | 5,576 | 10,7 | -5,124 |
| M | 5,665 | 11,1 | -5,435 |
| | 5,194 | 10,6 | -5,406 |
| X | 5,545 | 10,7 | -5,155 |
| | 5,132 | 10,1 | -4,968 |
| J | 5,711 | 10,3 | -4,589 |
| | 5,901 | 10,2 | -4,299 |
| V | 5,349 | 10,9 | -5,551 |
| | 5,298 | 10,8 | -5,502 |
| PROMEDIO | 5,5217 | 10,58 | -5,0583 |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014)

Se establece un promedio inicial de pH para la muestra 1 de 5.52, después de someter al tratamiento de electrocoagulación a la muestra 1 por 10 repeticiones, se determina un pH final

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

promedio de 10,58. Se puede calcular un incremento de 5,06 unidades adimensionales de pH, es decir la muestra final se muestra básica.

A continuación en la **Tabla 17** se indican los resultados de pH para la muestra 2 antes y después de las electrocoagulaciones.

Tabla 17: Resultados comparativos pH inicial vs final de la muestra principal 2, semana 2

| MUESTRA 2, SEMANA 2 (ACEITES Y GRASAS) | | | |
|--|------------|----------|------------|
| DÍA | pH INICIAL | pH FINAL | DIFERENCIA |
| L | 5,134 | 10,801 | -5,667 |
| | 5,367 | 10,261 | -4,894 |
| M | 5,79 | 10,301 | -4,511 |
| | 5,921 | 10,519 | -4,598 |
| X | 5,356 | 10,681 | -5,325 |
| | 5,212 | 10,906 | -5,694 |
| J | 5,173 | 10,869 | -5,696 |
| | 5,505 | 10,316 | -4,811 |
| V | 5,943 | 10,184 | -4,241 |
| | 5,248 | 10,201 | -4,953 |
| PROMEDIO | 5,4649 | 10,5039 | -5,039 |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

Se denota un promedio inicial de pH de 5,46 y un promedio de pH final de 10,5 lo que indica un aumento promedio de pH de 5,04 unidades para la muestra 2 después del proceso de electrocoagulación al realizar 10 repeticiones.

En la **Tabla 18** se detallan los resultados obtenidos de pH antes y después de las electrocoagulaciones de la muestra 3.

Tabla 18: Resultados comparativos pH inicial vs final de la muestra principal 3, semana 3

| MUESTRA 3, SEMANA 3 (TENSOACTIVOS) | | | |
|------------------------------------|------------|----------|------------|
| DÍA | pH INICIAL | pH FINAL | DIFERENCIA |
| L | 5,6 | 9,8 | -4,2 |
| | 5,8 | 10,2 | -4,4 |
| M | 5,6 | 10,1 | -4,5 |
| | 5,8 | 9,7 | -3,9 |
| X | 5,7 | 9,8 | -4,1 |
| | 5,8 | 9,9 | -4,1 |
| J | 5,7 | 10,1 | -4,4 |
| | 5,6 | 10,2 | -4,6 |
| V | 5,9 | 9,9 | -4 |
| | 5,6 | 9,7 | -4,1 |
| PROMEDIO | 5,71 | 9,94 | -4,23 |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

Se puede deducir un promedio inicial de pH para la muestra 3 de 5,71 y un promedio final de 9,94 lo que demuestra un aumento promedio de pH de 4,23 unidades.

Se determina un aumento significativo de pH, esto se debe a la electrolisis del agua que ocurre en el momento de la electrocoagulación, en donde se genera al hidrogeno molecular en el cátodo de hierro del electrocoagulador.

3.1.4. RESULTADOS SEGÚN LOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS DE LA TEMPERATURA DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS POR EL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN

Se realizó la medición del promedio de la temperatura antes y después de la electrocoagulación para determinar la existencia de pérdidas de energía eléctrica transformadas en energía calorífica, se denotan los siguientes resultados comparativos.

En la **Tabla 19** se detallan los resultados de la variación de temperatura de la muestra 1 antes y después del tratamiento de electrocoagulación

Tabla 19: Resultados comparativos temperatura inicial vs final de la muestra principal 1, semana 1

| MUESTRA 1, SEMANA 1 (TENSOACTIVOS) | | | |
|------------------------------------|------------|----------|------------|
| DÍA | T° INICIAL | T° FINAL | DIFERENCIA |
| L | 17,7 | 20,4 | -2,7 |
| | 17,7 | 20,2 | -2,5 |
| M | 17 | 19,7 | -2,7 |
| | 17,4 | 20,4 | -3 |
| X | 17,1 | 20,1 | -3 |
| | 17,9 | 19,5 | -1,6 |
| J | 17 | 20,1 | -3,1 |
| | 17,2 | 20 | -2,8 |
| V | 17,5 | 19,8 | -2,3 |
| | 17,6 | 20,3 | -2,7 |
| PROMEDIO | 17,41 | 20,05 | -2,64 |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

Se determina una temperatura inicial promedio de 17,41° C y final de 20,05°C Se observa un aumento promedio de 2,64° C para la muestra 1 después de las 10 repeticiones de electrocoagulación realizadas.

A continuación en la **Tabla 20** se observan los resultados obtenidos de las variaciones de temperatura antes y después de las electrocoagulaciones de la muestra 2.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

Tabla 20: Resultados comparativos temperatura inicial vs final de la muestra principal 2, semana

2

| MUESTRA 2, SEMANA 2 (ACEITES Y GRASAS) | | | |
|--|------------|----------|------------|
| DÍA | T° INICIAL | T° FINAL | DIFERENCIA |
| L | 17,4 | 20,1 | -2,7 |
| | 17,7 | 19,9 | -2,2 |
| M | 17,1 | 20,2 | -3,1 |
| | 17,5 | 20 | -2,5 |
| X | 17,3 | 20,1 | -2,8 |
| | 17,2 | 19,7 | -2,5 |
| J | 17,3 | 19,8 | -2,5 |
| | 17,9 | 19,8 | -1,9 |
| V | 17,1 | 20,2 | -3,1 |
| | 17,8 | 20,1 | -2,3 |
| PROMEDIO | 17,43 | 19,99 | -2,56 |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

Se puede deducir una temperatura inicial promedio de 17,13°C y una final de 19,9°C para la muestra 2 después de las 10 repeticiones de electrocoagulación realizadas. Por ende, se establece un aumento promedio de temperatura de 2,56°C para la muestra 2.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

En la Tabla 21 se detallan los resultados de las mediciones de temperatura realizadas para la muestra 3 antes y después de las electrocoagulaciones realizadas.

Tabla 21: Resultados comparativos temperatura inicial vs final de la muestra principal 3, semana

3

| MUESTRA 3, SEMANA 3 (TENSOACTIVOS) | | | |
|------------------------------------|------------|----------|------------|
| DÍA | T° INICIAL | T° FINAL | DIFERENCIA |
| L | 18,2 | 20,3 | -2,1 |
| | 18,4 | 20,8 | -2,4 |
| M | 18,2 | 20,6 | -2,4 |
| | 18,3 | 20,6 | -2,3 |
| X | 18,4 | 20,5 | -2,1 |
| | 18,2 | 20,4 | -2,2 |
| J | 18,2 | 20,5 | -2,3 |
| | 18,4 | 20,8 | -2,4 |
| V | 18,4 | 20,4 | -2 |
| | 18,3 | 20,8 | -2,5 |
| PROMEDIO | 18,3 | 20,57 | -2,27 |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

Se determina una temperatura promedio inicial y final de 18,3°C y 20,57°C respectivamente durante las 10 repeticiones de electrocoagulación realizadas a la muestra 3. Se calcula un aumento promedio de la temperatura de 2,27°C

Se puede deducir un aumento no considerable de temperatura, por ende se establece que no existe pérdida significativa de energía eléctrica transformada en calor durante la electrocoagulación del agua residual de la empresa TESQUIMSA a rangos de trabajo de 6[v], 20 [A] y 30 minutos.

Calculo de la energía eléctrica transformada en calor:

$$Q = m * Cp * \Delta t$$

En donde; Q= Calor

m= masa

Cp= calor específico

Δt = variación de temperatura

MUESTRA 1

$$Q = 8000 * [g] * 1 \left[\frac{cal}{g \cdot ^\circ C} \right] * 2,64 [^\circ C]$$

$$Q = 21120 [cal] = 0,02 [Kwh]$$

$$\% \text{ de transformación energética} = \frac{0,02 [Kwh]}{0,06 [Kwh]}$$

$$\% \text{ de transformación energética} = 0,33 = 33\%$$

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

Se determina un porcentaje de transformación de energía eléctrica en calor de un 33% para la muestra 1.

MUESTRA 2

$$Q = 8000 * [g] * 1 \left[\frac{cal}{g \cdot ^\circ C} \right] * 2,56 [^\circ C]$$

$$Q = 20480 [cal] = 0,02 [Kwh]$$

$$\% \text{ de transformación energética} = \frac{0,02 [Kwh]}{0,06 [Kwh]}$$

$$\% \text{ de transformación energética} = 0,33 = 33\%$$

Se deduce un porcentaje de transformación de energía eléctrica en calor de un 33% para la muestra 2.

MUESTRA 3

$$Q = 8000 * [g] * 1 \left[\frac{cal}{g \cdot ^\circ C} \right] * 2,27 [^\circ C]$$

$$Q = 18160 [cal] = 0,02 [Kwh]$$

$$\% \text{ de transformación energética} = \frac{0,02 [Kwh]}{0,06 [Kwh]}$$

$$\% \text{ de transformación energética} = 0,33 = 33\%$$

Se denota un porcentaje de transformación de energía eléctrica en calor de un 33% para la muestra 3.

3.1.5. RESULTADOS SEGÚN LOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS POR EL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN

Se pueden observar los resultados de la medición de conductividad eléctrica de la muestra 1 antes y después de las electrocoagulaciones realizadas en la **Tabla 22**.

Tabla 22: Resultados comparativos conductividad eléctrica inicial vs final de la muestra principal 1, semana 1

| MUESTRA 1, SEMANA 1 (TENSOACTIVOS) | | | |
|---|--|--------------------------------------|-------------------|
| DÍA | CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA INICIAL | CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA FINAL | DIFERENCIA |
| L | 1096 | 1184 | -88 |
| | 1097 | 1177 | -80 |
| M | 1093 | 1200 | -107 |
| | 1084 | 1181 | -97 |
| X | 1097 | 1192 | -95 |
| | 1096 | 1199 | -103 |
| J | 1081 | 1196 | -115 |
| | 1084 | 1181 | -97 |
| V | 1093 | 1171 | -78 |
| | 1081 | 1187 | -106 |
| PROMEDIO | 1090,2 | 1186,8 | -96,6 |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

Se establece una conductividad eléctrica promedio inicial de 1090,2 [uS/cm] y final de 1186,8 [uS/cm] para la muestra 1, lo que indica un aumento promedio de conductividad eléctrica de 96,6 [uS/cm].

En la **Tabla 23** se presentan los resultados de la conductividad eléctrica obtenidos para la muestra 2.

Tabla 23: Resultados comparativos conductividad eléctrica inicial vs final de la muestra principal 2, semana 2

| MUESTRA 2, SEMANA 2 (ACEITES Y GRASAS) | | | |
|---|--------------------------------|--------------|-------------------|
| DÍA | CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA | | DIFERENCIA |
| | INICIAL | FINAL | |
| L | 1527 | 1753 | -226 |
| | 1406 | 1774 | -368 |
| M | 1478 | 1836 | -358 |
| | 1452 | 1832 | -380 |
| X | 1596 | 1726 | -130 |
| | 1490 | 1844 | -354 |
| J | 1518 | 1826 | -308 |
| | 1464 | 1895 | -431 |
| V | 1512 | 1819 | -307 |
| | 1479 | 1830 | -351 |
| PROMEDIO | 1492,2 | 1813,5 | -321,3 |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

Se determina una conductividad eléctrica promedio inicial y final para la muestra 2 de 1492,2 [uS/cm] y 1813,5 [uS/cm] respectivamente. Por los tanto, se deduce un aumento de conductividad eléctrica promedio de 321,3 [uS/cm].

En la **Tabla 24** se muestran los resultados obtenidos de la conductividad eléctrica de la muestra 3, antes y después del tratamiento de electrocoagulación.

Tabla 24: Resultados comparativos de conductividad eléctrica inicial vs final de la muestra principal 3, semana 3

| MUESTRA 3, SEMANA 3 (TENSOACTIVOS) | | | |
|------------------------------------|-------------------------|--------|------------|
| DÍA | CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA | | DIFERENCIA |
| | INICIAL | FINAL | |
| L | 1025 | 1369 | -344 |
| | 1060 | 1349 | -289 |
| M | 1080 | 1345 | -265 |
| | 974 | 1348 | -374 |
| X | 1012 | 1350 | -338 |
| | 1061 | 1369 | -308 |
| J | 1092 | 1368 | -276 |
| | 980 | 1355 | -375 |
| V | 1028 | 1354 | -326 |
| | 1081 | 1337 | -256 |
| PROMEDIO | 1039,3 | 1354,4 | -315,1 |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014).

Se denota un promedio de la conductividad eléctrica inicial para la muestra 3 de 1039,3 [uS/cm] y un final de 1354,4 [uS/cm], por tanto una aumento promedio de la conductividad eléctrica de 315,1 [uS/cm].

Se observa que la conductividad eléctrica aumenta en todos los casos después del tratamiento de electrocoagulación, debido a la generación de iones de Aluminio en el ánodo y a la aplicación de una carga eléctrica en el proceso.

3.1.6. ANÁLISIS DE COSTOS DEL TRATAMIENTO DE ELECTROCOAGULACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE TESQUIMSA.

3.1.6.1. COSTOS ECONÓMICOS POR CONSUMO ENERGÉTICO

Los costos energéticos dependen de la potencia a la que esté trabajando la fuente de energía y se determina mediante:

$$P = I * V$$

Ec. 20 (Máximo & Alvarenga, 2002)

Donde: P= potencia en watts

I= intensidad de corriente en amperios [A]

V= voltaje en voltios [v]

$$P = 20[A] * 6[v]$$

$$P = 120 [w]$$

Actualmente el costo económico del Kwh es de 8 centavos de dólar, por lo tanto:

$$120[w] * \frac{1[Kw]}{1000[w]} * 30[min] * \frac{1[h]}{60[min]} * \frac{8 [centavos]}{1[Kwh]}$$

El costo económico de cada tratamiento de electrocoagulación de 8 litros de agua residual de la empresa TESQUIMSA disminuyendo un aproximado de 1500 ppm de DQO durante 30 minutos es de 0,48 centavos de dólar, es decir aproximadamente medio centavo de dólar por cada tratamiento realizado a 8 litros de muestra obtenida para la presente investigación. Por tanto el precio de la electrocoagulación por litro es de 0,06 centavos/litro de agua residual

3.1.6.2. COSTO DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN

3.1.6.3.ASPECTOS ADMINISTRATIVOS

3.1.6.3.1. RECURSOS HUMANOS

- ✓ Dos investigadores.
- ✓ Un docente para tutorías.
- ✓ Personal colaborador en la construcción del electrocoagulador.

3.1.6.4.RECURSOS MATERIALES Y TÉCNICOS

3.1.6.4.1. EQUIPOS DE LABORATORIO

- Multímetro para medición de pH, conductividad eléctrica y temperatura
- Espectrofotómetros HACH para medición de DQO y turbidez
- Digestor
- Cronómetro

3.1.6.4.2. REACTIVOS

- Viales para medición de DQO.
- Agua destilada

3.1.6.4.3. COSTOS DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN

A continuación, en la **Tabla 25** se detalla el costo total del sistema de electrocoagulación.

Tabla 25: Costos del sistema de electrocoagulación

| ITEM | COSTO [\$] |
|---|------------|
| Cuerpo de reactor de Polimetilmetacrilato | 200 |
| Electrodos de hierro y aluminio | 250 |
| Fuente de energía regulable | 350 |
| Conexiones eléctricas | 75 |
| Base del equipo | 50 |
| Tanques de muestra | 50 |
| TOTAL | 975 |

Elaborado por: Grijalva y Mariño (2014)

3.1.6.4.4. LOGÍSTICA

- Vehículo propio

3.1.6.4.5. OTROS

- Mandil
- Guantes dieléctricos
- Computadora portátil

CAPÍTULO IV

4. DISCUSIÓN

4.1. APLICACIÓN PRÁCTICA

El presente proyecto fue encaminado al diseño y construcción de un electrocoagulador capaz de tratar aguas residuales, con el fin de equipar los laboratorios de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK, de esta forma los estudiantes puedan aplicar de forma práctica y experimental los fundamentos teóricos con respecto a tratamiento de aguas residuales por medio de la electrocoagulación.

4.2. CONCLUSIONES

- Las dimensiones, así como el material utilizados para la construcción del cuerpo del reactor se consideran apropiadas tomando en cuenta que servirá como un equipo pedagógico a ser utilizado por los estudiantes de la Facultad de Ciencias Ambientales de Universidad Internacional SEK.
- El polimetil de metacrilato es un material resistente que durante la manipulación en las pruebas experimentales de funcionamiento no presentó daños como fisuras, deformaciones o disminución de su transparencia. Además la transparencia del material permite visualizar las reacciones que ocurren durante el proceso de electrocoagulación.
- Los electrodos de hierro y aluminio seleccionados para la construcción del electrocoagulador fueron adecuados ya que aportaron el coagulante necesario, además de su fácil acceso y disponibilidad en el mercado.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

- La distancia entre electrodos influye sobre la densidad de corriente, mientras menor sea la distancia de los electrodos mayor será la densidad de corriente, estableciendo como una distancia apropiada 1 cm, pues un valor menor aumentan el tiempo del tratamiento y desestabilizan la intensidad de corriente.
- La densidad de corriente dependen del número de electrodos utilizados durante la electrocoagulación y la intensidad de corriente aplicada desde la fuente de energía. Durante las pruebas de funcionamiento de la presente investigación se mantuvieron constantes los números de electrodos, por ende el área de reacción, y la intensidad de corriente, obteniendo resultados favorables en cuanto a remoción de DQO y turbidez de las aguas residuales de la empresa TESQUIMSA. Comparar que es favorable con respecto a equipos
- Las variables de funcionamiento u operación experimentales del equipo construido se determinaron según la capacidad de las instalaciones eléctricas del Laboratorio donde el electrocoagulador es instalado y las bases teóricas aplicadas para el cálculo de las mismas, por lo cual se establecieron 6[v], 20[A] y 30 minutos como variables usadas para ésta investigación.
- Con la finalidad de no causar daños a los equipos del Laboratorio de la Facultad de Ciencias Ambientales se deduce por medio de pruebas experimentales que la fuente de alimentación de energía debe operar con corriente continua.
- La instalación adecuada del equipo antes de ser utilizado es de suma importancia, de no ser así puede ser un riesgo para el operador y las instalaciones, pues cualquier chispa o corto circuito puede causar la explosión del hidrogeno generado durante la electrolisis del agua residual. Por lo cual se realizó un manual de funcionamiento del electrocoagulador

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

para evitar lo antes mencionado, donde se detallan el correcto uso, manipulación y mantenimiento preventivo del equipo.

- Durante la fase de operación y experimentación, se observó un desgaste del ánodo de aluminio, mientras que el cátodo de hierro permanece intacto.
- Después de la caracterización de la MUESTRA 1, se concluye que ésta efectivamente presenta más sustancias tensoactivas que aceites, grasas y fenoles. Tensoactivos cuyo valor es 4,9 mg/L, lo que produce una alta cantidad de sólidos suspendidos (ver Tabla 6).
- Después de la caracterización de la MUESTRA 2, el principal contaminante en la misma son los aceites y grasas, con una cantidad de 3,8 mg/L, muy por encima de los valores obtenidos para tensoactivos, fenoles y sólidos sedimentables (ver Tabla 7).
- Después de la caracterización de la MUESTRA 3, se concluye que es tensoactiva con 4,2 mg/L y con gran cantidad de sólidos suspendidos, puesto que la cantidad de los otros contaminantes presentes en ésta muestra no superan los 2 mg/L (ver Tabla 8).
- En conclusión las aguas residuales utilizadas en éste proyecto de investigación, provenientes del lavado y mantenimiento de tanques de la empresa TESQUIMSA, presentan tensoactivos y aceites y grasas como sustancias contaminantes principales, por lo que se precedió a realizar el tratamiento mediante electrocoagulación, tomando en cuenta ésta descripción para las tres muestras principales. Siendo: MUESTRA 1 (TENSOACTIVOS), MUESTRA 2 (ACEITES Y GRASAS) y la MUESTRA 3 (TENSOACTIVOS).
- La efectividad del electrocoagulador para la muestra 1 (tensoactivos) fue comprobada por medio del análisis físico químicos del DQO y turbidez obtenidos antes y después de la

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

electrocoagulación, donde se obtuvo un porcentaje de remoción de DQO del 70,72% y un porcentaje de remoción de turbidez del 32,33%.

- La efectividad del electrocoagulador para la muestra 2 (aceites y grasas) fue comprobada por medio del análisis físico químicos del DQO y turbidez obtenidos antes y después de la electrocoagulación, donde se obtuvo un porcentaje de remoción de DQO del 50,32% y un porcentaje de remoción de turbidez del 30,30%.
- La efectividad del electrocoagulador para la muestra 3 (tensoactivos) fue comprobada por medio del análisis físico químicos del DQO y turbidez obtenidos antes y después de la electrocoagulación, donde se obtuvo un porcentaje de remoción de DQO del 70,86% y un porcentaje de remoción de turbidez del 41,74%.
- Por medio de los resultados obtenidos de las mediciones de temperatura de la muestra 1 (tensoactivos) antes y después del tratamiento, se determinan transformaciones de energía eléctrica en calor, puesto que se observa un aumento de temperatura de 2,64°C.
- Se deduce transformación de energía eléctrica en calor, durante las pruebas realizadas a la muestra 2 (aceites y grasas), ya que existe un incremento de temperatura de 2,56°C.
- Se determina transformación de energía eléctrica en calor, durante las pruebas realizadas a la muestra 3 (tensoactivos), ya que existe un incremento de temperatura de 2,27°C.
- Al comparar los resultados obtenidos de la experimentación con la muestra 1 (tensoactivos) en la presente investigación con los de trabajos científicos de Restrepo y Arango (2006), quienes experimentan con aguas residuales de lavanderías y obtienen porcentajes de remoción de DQO del 70%, por lo que se concluye en un funcionamiento óptimo y eficiente del electrocoagulador.

4.3. RECOMENDACIONES

- El operador del equipo debe usar guantes dieléctricos para salvaguardar su salud e integridad física.
- Antes de empezar cada ensayo lijar los terminales de conexión eléctrica del electrodo para disminuir la resistencia eléctrica en los electrodos, ya que estos se cubren de óxido y sólidos flotantes secos.
- Después de realizar las pruebas experimentales lavar el equipo de electrocoagulación con detergente, de tal forma que se retire la capa antioxidante de los electrodos.
- Se debe operar la fuente de energía con sumo cuidado, utilizando guantes dieléctricos y realizar las conexiones eléctricas con la fuente de energía apagada y desconectada.
- Establecer futuros proyectos de investigación que deseen continuar con el presente estudio.
- Tomar en cuenta un proceso posterior a la electrocoagulación para neutralización de pH, dependiendo del punto receptor en donde se descargarán las aguas tratadas, puesto que la electrocoagulación aumenta el pH de las aguas y esto podría afectar el ecosistema del punto receptor.
- Se recomienda realizar una investigación sobre el tratamiento de los lodos derivados del tratamiento por electrocoagulación, puesto que están formados por contaminantes y no pueden ser descargados directamente.
- Para futuras investigaciones de tratamiento de aguas a nivel industrial se recomienda adaptar el equipo para que funcione con un flujo de entrada continuo, ya que éste es tipo batch.

ANEXOS

ANEXO 1.- PRODUCTOS DE LA EMPRESA TESQUIMSA

Tratamiento de agua para calderos

| | |
|--------------------|---|
| TQ-SOFT-ADL | Compuesto líquido para tratamiento de aguas de calderos alimentados con aguas duras. |
| TQ-SOFT-ADP | Compuesto en polvo para tratamiento de aguas de calderos alimentados con aguas duras. |
| TQ-SOFT-AAL | Compuesto líquido para tratamiento de aguas de calderos alimentados con agua de baja alcalinidad. |
| TQ-SOFT-PL | Compuesto líquido a base de polímeros para tratamiento de aguas de calderos. |
| TQ-SOFT-ANL | Producto anticorrosivo para líneas de condensado a base de aminas neutralizantes. |
| TQ-SOFT-AFL | Producto anticorrosivo para líneas de condensado a base de aminas fílmicas. |

Tratamiento de agua potable y residual

| | |
|----------------------------|---|
| TQ-FLOC-C | Floculantes catiónicos para tratamiento de aguas de proceso y residuales. |
| TQ-FLOC-A | Floculantes anióticos para tratamiento de aguas de proceso y residuales. |
| TQ-FLOC-PCA | Floculantes a base de policloruro de aluminio. |
| SULFATO DE ALUMINIO | Sulfato de aluminio en polvo. |
| TQ FLOC HNA | Hipoclorito de Sodio Activado |
| TQ FLOC CN | Controlador de pH |
| TQ FLOC A130 | Floculante |

Tratamiento de agua de enfriamiento

| | |
|---------------------|--|
| TQ-TOWER-FEL | Tratamiento anti-incrustante y anti-corrosivo a base de fosfonatos especiales. |
|---------------------|--|

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

| | |
|---------------------|--|
| TQ-TOWER_ACL | Tratamiento algicidabiocida a base de amonios cuaternarios. |
| TQ-TOWER_NL | Tratamiento anti-incrustante y anti-corrosivo a base de nitritos para circuitos cerrados. |
| TQ-TOWER-IC | Tratamiento anti-incrustante y anti-corrosivo para calentadores y radiadores industriales. |

Aditivos para combustible

| | |
|--------------------|--|
| TQ-FLAM-D | Aditivo para diesel usado en calderos o motores de combustión interna. |
| TQ-FLAM-B | Aditivo para bunker utilizado en calderos y hornos. |
| TQ-FLAM-INH | Aditivo de combustible inhibidor de formación de gomas. |

Limpieza química de circuitos térmicos

| | |
|--------------------|---|
| TQ-SOFT-LI | Producto líquido para limpieza inicial de calderos nuevos. |
| TQ-SOFT-LAI | Producto líquido desincrustante para limpieza química en circuitos térmicos. |
| TQ-SOFT-LS | Producto cristalino para remoción de sílice en calderos incrustados. |
| TQ-SOFT-PL | Compuesto líquido a base de polímeros para tratamiento de aguas de calderos. |
| TQ-SOFT-LN | Producto líquido neutralizante para después de la limpieza química de calderos. |

Desengrasantes y limpiadores industriales

| | |
|----------------------|---|
| TESCLEANER-CL | Detergente clorado para limpieza de cisternas y plantas de alimentos. |
| TQ-HTP | Detergente líquido universal especial para industria alimenticia. |

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

| | |
|-----------------|--|
| TQ-PAL | Limpiador desengrasante líquido para plantas de alimentos. |
| TQ-HD | Limpiador desengrasante industrial para trabajo pesado. |
| TQ-H12-0 | Desengrasante especial biodegradable para grasas minerales, animal y vegetal. |
| TQ-HDS | Desengrasante , descarbonizante y limpiador muy potente , de uso industrial, utilizable por inmersión. |
| TQ-HGD | Descarbonizante para piezas de hierro y acero, utilizable por inmersión. |

Desengrasantes y limpiadores institucionales

| | |
|--------------------|---|
| ULTRA SARRO | Desinfectante ácido para sanitarios. Remueve y evita formación de sarro. Elimina malos olores |
| TESCLEAN | Limpiador desodorante y desinfectante para pisos, paredes y baños. Diferentes fragancias. |
| TQ-PLATE | Detergente líquido altamente concentrado para el lavado manual de vajilla. No ataca la piel. |
| CARPETCLEAN | Shampoo para limpieza de alfombras .Producto neutro de abundante espuma y acción efectiva. |
| AMBIENTAL | Desodorante y aromatizante ambiental, para ser utilizado con pulverizador. |
| TQ-GLASS | Limpiavidrios. No deja manchas y forma una película protectora que mantiene limpias las superficies por más tiempo. |
| TQ-GRILL | Limpiador de grasas quemadas, en hornos , parrillas y cocinas. No utilizar en superficies pintadas. |
| TQ-SOAP | Jabón líquido de manos, formulado para que las manos queden suaves y con grato aroma. |
| TQ-MANOL | Pasta limpiadora de manos para personal de talleres de mantenimiento. No requiere enjuague posterior. Contiene glicerina. |
| TQ-WAX | Cera auto brillante para pisos de cerámica y vinil lacado. |

Insecticidas

| | |
|---------------------|--|
| TQ-INSECT-PR | Insecticida para vectores voladores de uso interior. |
| TQ-INSECT-VP | Insecticida para vectores voladores y rastreros de uso exterior. |

Tratamiento para madera

| | |
|---------------------|--|
| TESWOOD-CP10 | Insecticida - antipolilla para tratamiento de madera cortada. |
| TESWOOD-CP20 | Insecticida - antipolilla para plywood y aglomerados. |
| TESWOOD-CU | Fungicida-insecticida a base de cobre para tratamiento de la madera. |

Desinfectantes

| | |
|------------------------|---|
| TESBACTER-10 | Desinfectante a base de amonios cuaternarios para uso general. |
| TESBACTER-APA | Desinfectante sanitizante para uso en plantas alimenticias. |
| TESBACTER-PAPER | Desinfectante para papel reciclado. |
| HTP-YODO | Jabón desinfectante para la industria alimenticia. |
| TESTBACTER-AL | Desinfecta en base de amonios cuaternarios de cuarta generación para industria alimenticia. |
| TQ-SOAP-M | Jabón líquido desinfectante de manos. |
| TESBACTER-PT | Algicida-bactericida usado como aditivo para pinturas. |

Desoxidantes fostatizantes

| | |
|------------------|---|
| D-OXI-ALC | Detergente desengrasante en polvo para procesos de fosfatizado por inmersión. |
|------------------|---|

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

| | |
|-------------------|--|
| D-OXI-DS | Desengrasante ácido para procesos de fosfatizado en frío. |
| D-OXI-R | Desincrusante y removedor de óxido en circuitos térmicos , para equipos de hierro o acero. |
| D-OXI-SR | Limpiador concentrado ácido para remoción de residuos de cemento u otros materiales calcáreos. |
| D-OXI-Q | Desengrasante , desoxidante y fosfatizante para trabajos ligeros. |
| D-OXI-Z | Desengrasante , desoxidante y fosfatizante para piezas de hierro y acero |
| D-OXI-Z40 | Desengrasante , desoxidante y fosfatizante concentrado para piezas de hierro y acero. |
| D-OXI-CO | Convertidor de óxido para piezas que se encuentran oxidadas. Reemplaza al sand-blasting. |
| D-OXI-INOX | Removedor de negro de suelda en acero inoxidable. |
| D-OXI-RO | Removedor de óxido en piezas de hierro. |
| D-OXI-INH | Inhibidor de corrosión neutralizante para piezas en proceso. |

Lavandería industrial

| | |
|-----------------------|---|
| TESCLEANER-PQL | Detergente en polvo universal para lavandería. |
| TESCLEANER-A20 | Detergente en polvo alcalino para lavandería. |
| TESCLEANER-ES | Detergente en polvo universal de alta espuma concentrada para lavandería. |
| TESCLEANER-BDL | Bloqueador-desinfectante en líquido para lavandería. |
| TESCLEANER-N | Neutralizante para lavandería. |
| TESCLEANER-SAB | Suavizante-aromatizante bacteriostático para lavandería. |
| TESCLEANER-TS | Detergente blanqueador, utilizado como regenerador de prendas. |
| TESCLEANER-HL | Detergente humectante líquido concentrado para uso de lavado de ropa. |

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

| | |
|------------------------|---|
| TESCLEANER-DESH | Desengrasante, desmanchador superconcentrado para lavandería. |
| TESCLEANER-HTP | Detergente humectante líquido para lavandería. |
| TQ-STARCH | Apresto sintético para almidonado de ropa. |
| TQ-OXICLEAN | Producto líquido para quitar manchas de óxido de las prendas. |
| TESCLEANER-LS | Detergente líquido para lavado en seco, activador de percloroetileno. |

Limpiadores solventes

| | |
|--------------------|--|
| TQ-SOLV-OIL | Dispersante para derrames de petróleo derivados. |
| TQ-SOLV-5 | Desengrasante tipo solvente para limpieza de motores eléctricos. |
| TQ-SOLV-CT | Solvente amulsionable para limpieza de tanques de almacenamiento de petróleo y derivados. |
| PRINTER | Solvente limpiador para equipos que usan tintas flexográficas. |
| TQ-SOLVCAR | Desengrasante en base solvente para limpieza de motores y piezas de talleres automotrices. |

Automotriz

| | |
|------------------|---|
| ICR | Refrigerante inhibidor de corrosión para radiadores de vehículos. |
| LNR | Limpiador neutro para radiadores. |
| CLEAN-CAR | Shampoo auto-brillante para autos. |
| SILICONA | Emulsión de silicona para protección de paneles de vehículos. |
| SOLV-CAR | Limpiador base solvente para vehículos nuevos. |

Tratamiento para piscinas

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

| | |
|------------------------------|---|
| HIPOCLORITO DE CALCIO | Cloro granulado al 65% de concentración para tratamiento de piscinas. |
| TESPOOL-ACID | Reductor de pH para piscinas. |
| TESPOOL-BASIC | Elevador de pH para piscinas. |
| TESPOOL-FLO | Clarificador de agua para piscinas. |
| TESPOOL-SC | Algicida tonificante para piscinas. |
| TESPOOL-10 | Algicida a base de amonios cuaternarios para uso en piscinas. |
| PASTILLAS DE CLORO | Cloro orgánico super concentrado utilizado como desinfectante de aguas en "skimmers", filtros y cisternas. No necesita de reguladores de pH |
| TESBACTER-PCI | Algicida para piscinas contra incendios |

ANEXO 2.- RESULTADOS DE LA REGULARIZACIÓN DE pH DE LAS MUESTRAS 1, 2 Y 3

PH de Muestra 1(TENSOACTIVOS)

En la siguiente tabla se presentan los datos de ajuste de pH para las diez electrocoagulaciones correspondientes a la Muestra 1:

| MUESTRA 1, SEMANA 1 (TENSOACTIVOS) | | | | | | |
|---|------------|--------------------|-------------------|-----------------------------------|-----------|---------------------|
| N° | pH | SIN AJUSTAR | CON AJUSTE | REGULADOR DE Ph [ml] | ml | L de muestra |
| 1 | pH: | 3,406 | 5,846 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,8 | 8 |
| 2 | pH: | 3,406 | 5,576 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,8 | 8 |
| 3 | pH: | 3,435 | 5,665 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,8 | 8 |
| 4 | pH: | 3,482 | 5,194 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,8 | 8 |
| 5 | pH: | 3,467 | 5,545 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,8 | 8 |
| 6 | pH: | 3,4510 | 5,132 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,8 | 8 |

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

| | | | | | | |
|-----------------|------------|---------------|---------------|-----------------------------------|-----|----|
| 7 | pH: | 3,439 | 5,711 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,8 | 8 |
| 8 | pH: | 3,475 | 5,901 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,8 | 8 |
| 9 | pH: | 3,42 | 5,349 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,8 | 8 |
| 10 | pH: | 3,411 | 5,298 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,8 | 8 |
| PROMEDIO | pH: | 3,4392 | 5,5217 | TOTAL | 28 | 80 |

pH de Muestra 2 (ACEITES Y GRASAS)

En la siguiente tabla se presentan los datos de ajuste de pH para las diez electrocoagulaciones correspondientes a la Muestra 2:

| MUESTRA 2, SEMANA 2 (ACEITES Y GRASAS) | | | | | | |
|---|------------|--------------------|-------------------|---------------------------------|-----------|---------------------|
| N° | pH | SIN AJUSTAR | CON AJUSTE | REGULADOR DE Ph [ml] | ml | L de muestra |
| 1 | pH: | 11,951 | 5,134 | Ácido Clorhídrico (HCL 0,2M) | 20 | 8 |
| 2 | pH: | 11,481 | 5,367 | Ácido Clorhídrico (HCL 0,2M) | 20 | 8 |
| 3 | pH: | 10,936 | 5,79 | Ácido Clorhídrico (HCL 0,2M) | 20 | 8 |
| 4 | pH: | 11,037 | 5,921 | Ácido Clorhídrico (HCL 0,2M) | 20 | 8 |
| 5 | pH: | 10,825 | 5,356 | Ácido Clorhídrico (HCL 0,2M) | 20 | 8 |
| 6 | pH: | 11,701 | 5,212 | Ácido Clorhídrico (HCL 0,2M) | 20 | 8 |
| 7 | pH: | 11,037 | 5,173 | Ácido Clorhídrico (HCL 0,2M) | 20 | 8 |

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

| | | | | | | |
|-----------------|------------|----------------|---------------|---------------------------------|-----|----|
| 8 | pH: | 11,106 | 5,505 | Ácido Clorhídrico (HCL 0,2M) | 20 | 8 |
| 9 | pH: | 11,71 | 5,943 | Ácido Clorhídrico (HCL 0,2M) | 20 | 8 |
| 10 | pH: | 10,904 | 5,248 | Ácido Clorhídrico (HCL 0,2M) | 20 | 8 |
| PROMEDIO | pH: | 11,2688 | 5,4649 | TOTAL | 200 | 80 |

pH de Muestra 3 (TENSOACTIVOS)

En la siguiente tabla se presentan los datos de ajuste de pH para las diez electrocoagulaciones correspondientes a la Muestra 3:

| MUESTRA 3, SEMANA 3 (TENSOACTIVOS) | | | | | | |
|---|------------|--------------------|-------------------|-----------------------------------|-----------|---------------------|
| N° | pH | SIN AJUSTAR | CON AJUSTE | REGULADOR DE Ph [ml] | ml | L de muestra |
| 1 | pH: | 3,396 | 5,691 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,56 | 8 |
| 2 | pH: | 3,41 | 5,637 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,56 | 8 |
| 3 | pH: | 3,429 | 5,803 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,56 | 8 |
| 4 | pH: | 3,471 | 5,794 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,56 | 8 |
| 5 | pH: | 3,459 | 5,679 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,56 | 8 |
| 6 | pH: | 3,4620 | 5,706 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,56 | 8 |
| 7 | pH: | 3,443 | 5,71 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,56 | 8 |
| 8 | pH: | 3,48 | 5,681 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,56 | 8 |

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

| | | | | | | |
|----------|------------|--------|-------|-----------------------------------|------|----|
| 9 | pH: | 3,395 | 5,726 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,56 | 8 |
| 10 | pH: | 3,419 | 5,713 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 2,56 | 8 |
| PROMEDIO | pH: | 3,4364 | 5,714 | Hidróxido de Sodio (NaOH 0,1M) | 25,6 | 80 |

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

| N° | DQO INICIAL | DQO FINAL | DIFERENCIA | TURBIDEZ INICIAL | TURBIDEZ FINAL | DIFERENCIA |
|-----------|--------------------|------------------|-------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | 2180 | 625 | -1555 | 87 | 58 | -29 |
| 2 | 2190 | 687 | -1503 | 91 | 60 | -31 |
| 3 | 2160 | 638 | -1522 | 90 | 61 | -29 |
| 4 | 2210 | 641 | -1569 | 87 | 62 | -25 |
| 5 | 2190 | 623 | -1567 | 90 | 57 | -33 |
| 6 | 2180 | 619 | -1561 | 92 | 63 | -29 |
| 7 | 2160 | 644 | -1516 | 86 | 59 | -27 |
| 8 | 2150 | 625 | -1525 | 92 | 60 | -32 |
| 9 | 2140 | 616 | -1524 | 93 | 59 | -34 |
| 10 | 2180 | 647 | -1533 | 88 | 62 | -26 |
| 11 | 2610 | 1040 | -1570 | 108 | 71 | -37 |
| 12 | 2620 | 1080 | -1540 | 105 | 72 | -33 |
| 13 | 2610 | 1070 | -1540 | 99 | 74 | -25 |
| 14 | 2690 | 1080 | -1610 | 102 | 70 | -32 |
| 15 | 2540 | 1020 | -1520 | 110 | 72 | -38 |
| 16 | 2670 | 1070 | -1600 | 102 | 73 | -29 |
| 17 | 2670 | 1090 | -1580 | 98 | 72 | -26 |
| 18 | 2610 | 1070 | -1540 | 104 | 74 | -30 |
| 19 | 2620 | 1060 | -1560 | 97 | 72 | -25 |

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

| | | | | | | |
|-----------|------|----------------------------|-----------|-----|----------------------------|---------|
| 20 | 2590 | 1090 | -1500 | 112 | 71 | -41 |
| 21 | 1810 | 520 | -1290 | 85 | 49 | -36 |
| 22 | 1880 | 541 | -1339 | 82 | 48 | -34 |
| 23 | 1870 | 509 | -1361 | 83 | 51 | -32 |
| 24 | 1890 | 534 | -1356 | 84 | 50 | -34 |
| 25 | 1860 | 595 | -1265 | 80 | 46 | -34 |
| 26 | 1880 | 586 | -1294 | 81 | 51 | -30 |
| 27 | 1870 | 558 | -1312 | 83 | 48 | -35 |
| 28 | 1850 | 554 | -1296 | 80 | 45 | -35 |
| 29 | 1840 | 504 | -1336 | 84 | 47 | -37 |
| 30 | 1870 | 526 | -1344 | 82 | 45 | -37 |
| | | PROMEDIO | -1470,933 | | PROMEDIO | -31,833 |
| | | DESVIACIÓN ESTÁNDAR | 113,232 | | DESVIACIÓN ESTÁNDAR | 4,284 |
| | | t PARIADA | -41,080 | | t PARIADA | -23,499 |
| | | p < | 0,001 | | p < | 0,001 |

ANEXO 4.- ANEXOS FOTOGRÁFICO



FOTO 1: Muestra 1(TENSOACTIVOS), agua residual antes del tratamiento, con color más oscuro debido a una mayor turbidez.

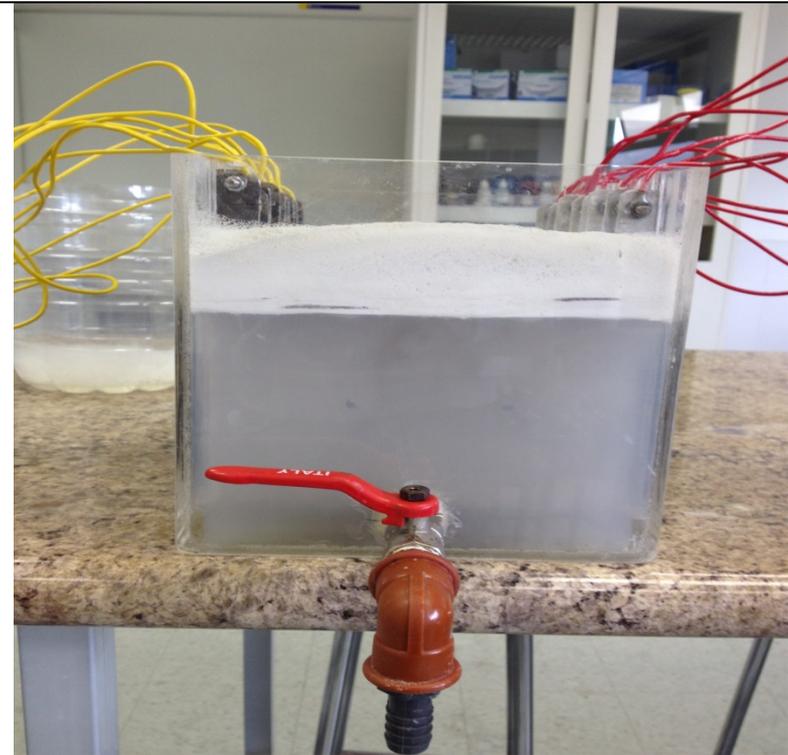


FOTO 2: Muestra 1, agua residual después de 30 min de electrocoagulación. Espuma formada por flóculos de contaminantes. Agua menos turbia.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño



FOTO 3: Muestra 2 (ACEITES Y GRASAS), agua residual antes del tratamiento, con color más oscuro debido a una mayor turbidez.

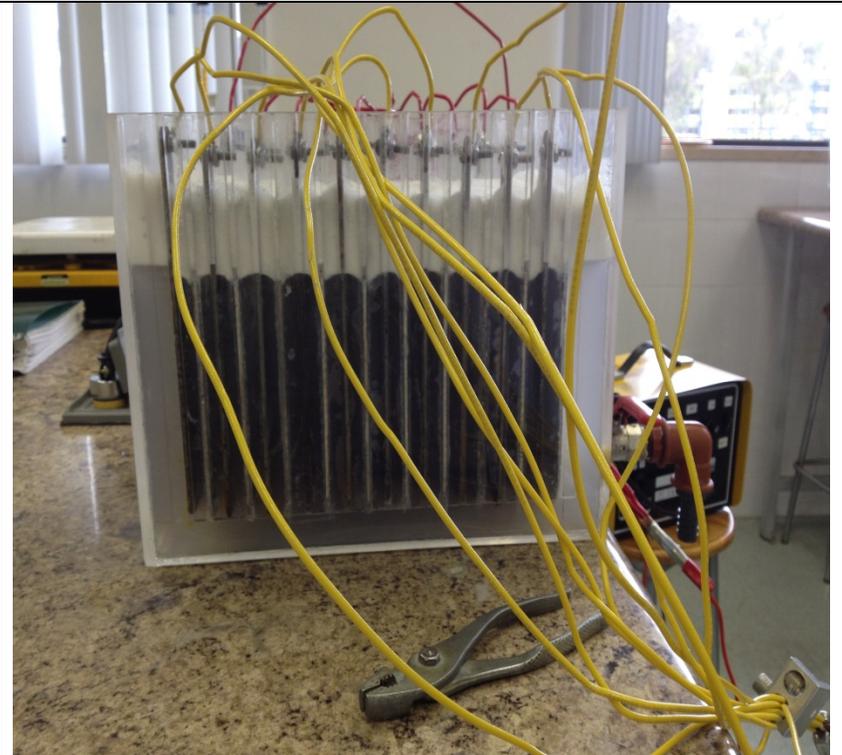


FOTO 4: Muestra 2, agua residual después de 30 min de electrocoagulación. Espuma formada por flóculos de contaminantes. Agua menos turbia.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DE FIN CARRERA

Realizado por: Ma. Belén Grijalva y Daniel Mariño

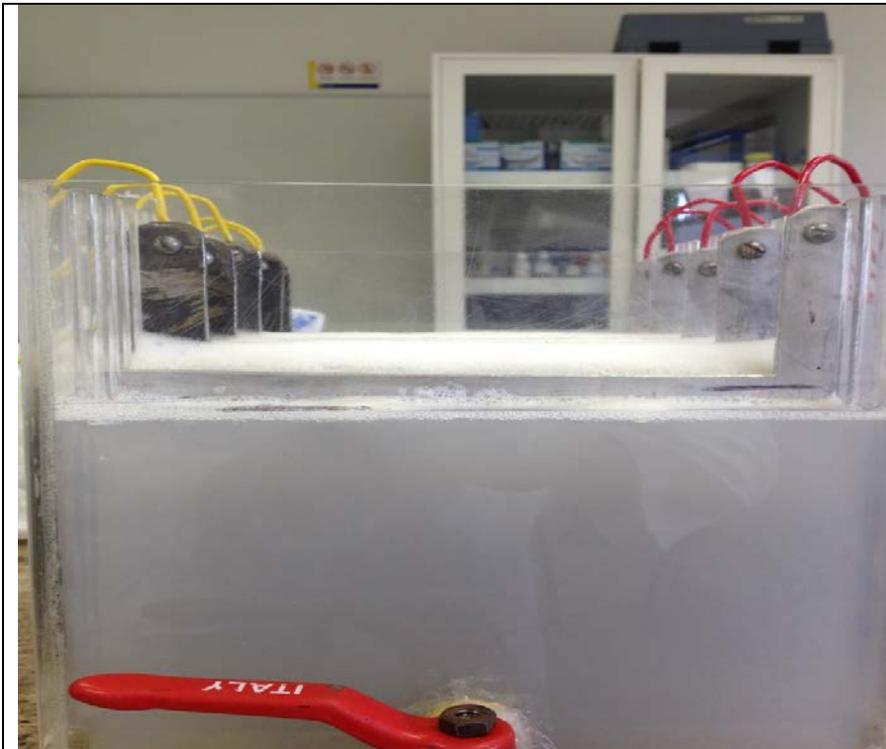


FOTO 5: Muestra 3(TENSOACTIVOS), agua residual antes del tratamiento, con color más oscuro debido a una mayor turbidez.

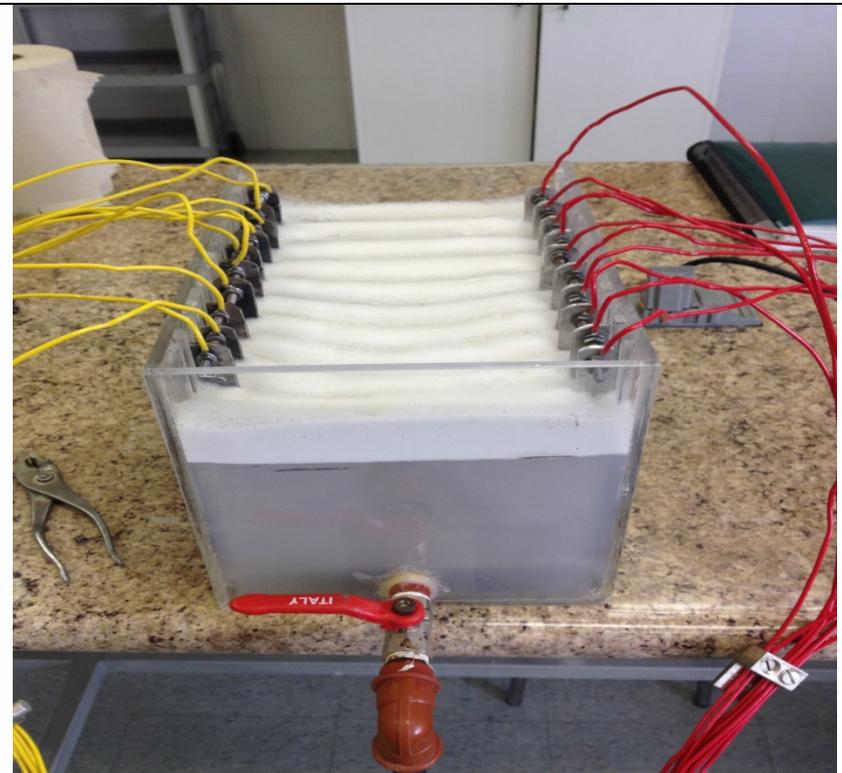


FOTO 6: Muestra 3, agua residual después de 30 min de electrocoagulación. Espuma formada por flóculos de contaminantes. Agua menos turbia.

Bibliografía

- Arango, A., & Garcés, F. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Revista Universidad EAFIT*, 56- 67.
- Atkins, P. (2005). *The elements of Physical Chemistry*. Nueva York: WH Freeman and Company.
- Atlas, R., & Bartha, R. (2002). *Ecología microbiana y microbiología ambiental*. Chicago: Westley.
- Caballero, J. (2008). Corriente continua y alterna. *Electrosector*, 70-76.
- Cabildo, P., Cornago, P., Esolástigo, C., Esteban, S., Lopez, C., & Saenz, D. (2013). *Bases químicas del Medio Ambiente*. Madrid: Universidad Nacional.
- Chang, R. (2002). *Química*. Mexico D.F.: McGRAW-HILL.
- Chemiller, P. (2005). *Industrialización de la construcción*. Barcelona: Editores Tecnicos Asociados S.A.
- Correa, C. (2004). *Fenómenos Químicos*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Daub, W., & Seese, W. (2003). *Química*. Claremont.
- Groover, M. (2000). *Fundamentos de Manufctura Moderna*. Mexico: PEARSON.
- Hernandez, S. (2011). *investigacion sobre procesos avanzados de tratamiento y depuracion de aguas mediante electrocoagulación*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- La guía Química*. (s.f.). Recuperado el 15 de Julio de 2014, de <http://quimica.laguia2000.com/general/celdas-electroquimicas>

Lower, S. (2004). Chemical reactions at an electrode, galvanic and electrolytic cells, Electrochemistry. *Simon Fraser University*, 35-38.

Maron, S., & Prutton, C. (1994). *Fundamentos de Físico- Química*. Mexico: Limusa Noriega Editores.

Maron, S., & Prutton, C. (1994). *Fundamentos de FISICOQUÍMICA*. México: LIMUSA.

Máximo, A., & Alvarenga, B. (2002). *Física General*. Mexico: Oxford.

Mollah, Y. (2001). Electrocoagulation Science and applicatins. *Journal of Hazardous Materials*, 29-41.

Norman, G., & Streiner, D. (1998). *Bioestadística*. Harcourt Brance.

Pantoja, E. (2012). *APLICACIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN SOBRE EL TRATAMIENTO DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINAS DE CARBÓN*. Santiago de Cali: UNIVERSIDAD DEL VALLE.

Polo, D., Gómez, S., Prashar, S., & Fajardo, M. (2010). *Aplicaciones de nuevos complejos metaloceno en polimerización de olefinas*. Madrid: Editorial Dykinson.

Ramírez, T. (2010). *Electroquímica, flotación y electricidad*.

Restrepo, A., Arango, A., & Garcés, F. (2006). La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producción mas limpia*, 59- 77.

Ríos, N. (2006). *REMOCIÓN DE AMONIO Y DE METALES PESADOS DE LOS LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO “LA ESMERALDA” DE LA CIUDAD DE MANIZALES POR ELECTROCOAGULACIÓN*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.

Romero, J. (2002). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Bogotá: Escuela Colombiana de ingeniería.

Sánchez, O., Herzig, M., Peters, E., & Marquez, R. (2007). *Perspectivas sobre la conservación de ecosistemas acuáticos*. Mexico: Universidad Michoacana.

Silberberg, M. (2002). *Química General*. New York: McGraw- Hill.

TESQUIMSA. (2014). *Manual de Sistema Integrado de Gestion TESQUIMSA*. Quito.

Vassos, B., & Ewing, G. (1980). *Electroquímica analítica*. México: Editorial Limusa.

Whitten, K. W. (2006). *QUÍMICA GENERAL*. México: MCGRAWHILL.