

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA, INGENIERÍA PETROQUÍMICA,

INGENIERÍA AMBIENTAL E INGENIERÍA DE ALIMENTOS



PROYECTO DE GRADO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR ELECTROQUÍMICO CONTINUO A
NIVEL LABORATORIO PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR
ELECTROCOAGULACIÓN DE UNA INDUSTRIA TEXTIL

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

POSTULANTE: UNIV. RAMOS RICARDO RUBEN

TUTOR: ING. RENÉ ALVAREZ APAZA, PhD

LA PAZ- BOLIVIA

2021



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

DEDICATORIA

Primeramente, a Dios, por guiarme y acompañarme a lo largo de mi vida, por darme la oportunidad de tener a mi alrededor a grandes y buenas personas.

A mi pequeña Sofía, que es mi inspiración en todo lo que realizó, la que me da fuerza y energía para cualquier acontecimiento, la que me acompaña en cada paso que doy y la que con solo pensarla me da felicidad infinita.

A mis padres por haberme apoyado siempre en los pasos que fui dando a lo largo de mi vida, por siempre confiar en mí, durante todo el periodo universitario.

A todas las personas que siempre estuvieron allí apoyándome y confiando en mí.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradecer a Dios por haberme guiado y acompañado en todo mi camino.

Agradecer siempre a mi pequeña Sofía por toda la felicidad, fuerza y energía que me da, que, gracias a ella, siempre hallo el camino a seguir en lo que voy haciendo.

A mis padres por todo el apoyo en diversos aspectos, que siempre me brindaron.

A mi tutor, Ing. Rene Álvarez PhD. por haberme guiado con tan buena energía desde el inicio, por su tiempo, paciencia y por haber estado siempre dispuesto a aclarar mis dudas.

Agradezco a mi carrera ``Ingeniería Química'', por haberme dado mucho conocimiento en diferentes áreas, por cada momento en aula que en verdad disfruté, también al Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos (IIDEPROQ) por haberme dado la oportunidad de realizar mi proyecto en sus instalaciones.

Finalmente agradezco a todas las personas que siempre han aportado para la culminación de este proyecto.

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo principal diseñar y construir un reactor electroquímico continuo a nivel laboratorio para realizar el tratamiento por electrocoagulación del efluente procedente de la industria textil y lograr una alta remoción de la carga orgánica.

Se llevaron a cabo 9 ensayos preliminares en un reactor batch a escala laboratorio, con electrodos de aluminio, con un volumen de muestra de 0,594 litros y un área de electrodos sumergida de 131,72 cm². Se adoptó una distancia de electrodos de 0,5(cm) con electrodos de aluminio. El cálculo de la remoción de carga orgánica se realizó en función del DQO, las condiciones óptimas iniciales en el reactor batch fueron Tiempo de Residencia=90 [min] y Voltaje=14 [V].

El dimensionamiento del reactor electroquímico continuo se realizó sobre la base de todos los fenómenos observados en los distintos ensayos, dimensiones que posee la empresa para el tratamiento de aguas residuales, el caudal máximo que tiene la industria textil de la cual trate las aguas residuales y las condiciones óptimas iniciales. Una vez construido el reactor electroquímico continuo se realizó el ensayo con las condiciones óptimas iniciales halladas en el reactor batch, pero se necesitó realizar la optimización del reactor electroquímico continuo, realizando más ensayos, de esta forma se halló los valores óptimos finales, que resultaron ser Tiempo de Residencia: 150 (min), Voltaje= 14 (V) y Caudal= 0,045 (l/min). El reactor electroquímico continuo contaba con 9 celdas, cada celda con 2 electrodos, es decir, 18 electrodos de aluminio, con separación de 0,5 (cm). Con las condiciones óptimas finales se logró obtener una buena remoción de DQO, por debajo del límite permisible.

Del análisis económico del tratamiento se obtuvo que el costo de operación sea de 17,1 (Bs/metro cúbico de muestra tratada).

ABSTRACT

The main objective of the present study is to design and build a continuous electrochemical reactor at the laboratory level to carry out the treatment by electrocoagulation of the effluent from the textile industry and achieve a high removal of the organic load.

9 preliminary tests were carried out in a laboratory-scale batch reactor, with aluminum electrodes, with a sample volume of 0.594 liters and a submerged electrode area of 131.72 cm². An electrode distance of 0.5 (cm) was adopted with aluminum electrodes. The calculation of the removal of organic load was carried out based on the COD, the initial optimal conditions in the batch reactor were Residence Time = 90 [min] and Voltage = 14 [V].

The sizing of the continuous electrochemical reactor was carried out on the basis of all the phenomena observed in the different tests, dimensions that the company has for the treatment of wastewater, the maximum flow that the textile industry has that treats wastewater and optimal initial conditions. Once the continuous electrochemical reactor was built, the test was carried out with the initial optimal conditions found in the batch reactor, but it was necessary to optimize the continuous electrochemical reactor, carrying out more tests, in this way the final optimal values were found, which turned out to be Residence Time: 150 (min), Voltage = 14 (V) and Flow = 0.045 (l / min). The continuous electrochemical reactor had 9 cells, each cell with 2 electrodes, that is, 18 aluminum electrodes, with a separation of 0.5 (cm). With the final optimal conditions it was possible to obtain a good removal of COD, below the allowable limit.

From the economic analysis of the treatment it was obtained that the operating cost is 17.1 (Bs / cubic meter of treated sample).

Tabla de Contenido

Capítulo I 1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del Problema.....	2
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo General.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos	4
1.4. Justificación.....	4
1.4.1. Técnica.....	4
1.4.2. Económica	5
1.4.3. Social	5
1.4.4. Ambiental	6
Capítulo II 2. Marco Teórico	7
2.1. Industria Textil.....	7
2.1.1. Fibras Textiles	8
2.1.2. Colorantes.....	9
2.1.3. Procesos Textiles	14
2.2. Tratamientos Convencionales de Aguas Residuales.....	17
2.2.1. Tratamientos Primarios.....	18
2.2.2. Tratamientos Secundarios.....	19
2.2.3. Tratamientos Terciarios.....	19
2.2.4. Procesos Avanzados de Oxidación.....	20
2.3. Electroquímica	22
2.3.1. Reacciones Electroquímicas	23
2.3.2. Electrocoagulación	24
2.4. Características que Afectan un Proceso Electroquímico.....	34
2.4.1. Corrosión	34
2.4.2. Pasivación.....	34
2.5. Celda de Electrocoagulación.....	35
2.5.1. Reactor Electroquímico Continuo	36
2.6. Ventajas y Desventajas de la Electrocoagulación	37
2.7. Cinética Química.....	38
2.7.1. Método Integral	39

2.8. Leyes de Faraday.....	41
2.8.1. Primera Ley de Faraday.....	42
2.9. Diagrama de Pourbaix.....	42
2.9.1. Diagramas Eh – pH.....	42
2.10. Antecedentes en Proyectos de Tratamientos de Aguas Residuales por Métodos Electroquímicos.....	44
Capítulo III 3. Metodología.....	46
3.1. Equipos, Materiales y Reactivos.....	46
3.1.1. Equipos.....	46
3.1.2. Materiales.....	46
3.1.3. Reactivos.....	47
3.2. Preparación de las Soluciones Para Análisis de DQ.....	48
3.2.1. Solución Digestora.....	48
3.2.2. Solución de Ácido Sulfúrico.....	49
3.2.3. Solución Ftalato.....	49
3.3. Toma de Muestra en el Reactor Batch.....	50
3.4. Validación de las Soluciones Preparadas para DQO.....	51
3.4.1. Validación de las Soluciones en HACH.....	52
3.4.2. Validación de las Soluciones en Hanna.....	52
3.4.3. Validación de las Soluciones con Solución Patrón del IIDEPROQ.....	52
3.5. Caracterización de la Muestra de Agua.....	53
3.6. Parámetros a Tratar con el Reactor Electroquímico.....	53
3.7. Determinación de Parámetros Previos en el Reactor Batch.....	53
3.7.1. Armado del Reactor Electroquímico Batch.....	53
3.7.2. Ensayo en el Reactor Electroquímico Batch.....	55
3.8. Reactor Electroquímico Continuo.....	57
3.8.1 Electroodos.....	57
3.8.2. Diseño del Reactor.....	58
3.8.3. Celda Electroquímica.....	63
3.8.4. Construcción del Reactor Electroquímico Continuo.....	65
3.8.5. Muestreo de Agua Residual para el Reactor Electroquímico Continuo.....	66
3.8.6. Parámetros a Revisar.....	67
3.8.7. Ensayos en el Reactor Electroquímico Continuo.....	67

3.9. Nuevos Ensayo en el Reactor Batch	68
3.10. Ensayos para una Mayor Remoción de DQO en el Reactor Electroquímico Continuo...	69
3.11. Ensayo Final en el Reactor Electroquímico Continuo	69
Capítulo IV 4. Resultados	71
4.1. Resultados de la Validación de las Soluciones Preparadas para DQO	71
4.1.1. Validación de las Soluciones en HACH.....	71
4.1.2. Validación de las Soluciones en HANNA.....	72
4.1.3. Validación de las Soluciones con Solución Patrón DEL IIDEPROQ	73
4.1.4. Resultados de las Validaciones para Elección de Equipo	73
4.2. Caracterización de la Muestra de Agua.....	74
4.3. Resultados de los Ensayos en el Reactor Electroquímico Batch	74
4.4. Ensayos en el Reactor Electroquímico Continuo	78
4.5. Resultados de Nuevos Ensayos en el Reactor Electroquímico Batch.....	79
4.6. Resultados de Ensayos para una Mayor Remoción de DQO en el Reactor Electroquímico Continuo	80
4.7. Resultados del Ensayo Final del Reactor Electroquímico Continuo.....	81
4.7.1. Cinética del Reactor Electroquímico Continuo	83
Capítulo V 5. Análisis Económico y Propuesta.....	89
5.1. Costo de Operación del Tratamiento.....	89
5.2. Propuesta para Implementar el Sistema	91
Capítulo VI 6. Conclusiones Recomendaciones y Bibliografía.....	93
6.1. Conclusiones	93
6.2. Recomendaciones.....	94
6.3. Bibliografía.....	95
Capítulo VII 7. Anexos	99
7.1. Anexo A. Cantidades en Cada Vial para Hallar DQO	99
7.2. Anexo B. Referencia para la Pureza del Aluminio	100
7.3. Anexo C. Caudales Hallados en la Bomba Peristáltica Del IIDEPROQ	101
7.4. Anexo D. Caudales para los Ensayos en el Reactor Electroquímico Continuo	102
7.5. Anexo E. Determinación del Potencial de Hidrógeno	102
7.6. Anexo F. Determinación de Conductividad.....	103
7.7. Anexo G. Determinación de Turbidez	104
7.8. Anexo H. Determinación de Demanda Química de Oxígeno	106

7.9. Anexo I. Flexibilidad de la Escala del Diseño con el Caudal	108
7.10. Anexo J. Resultados del Primer Muestreo para el Reactor Batch, de SGLAB	109
7.11. Anexo K. Resultados Finales del Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos	110
7.12. Anexo L. Reglamento Ambiental del Sector Industrial Manufacturero (RASIM)	111
7.13. Anexo M. Valores Máximos Admisibles de Parámetros en Cuerpos de Agua (Anexo 13-A, RASIM)	114
7.14. Anexo N. Límites Permisibles para Descargas Liquidas en mg/l (Anexo 13-C, RASIM)	116

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CLASIFICACIÓN DE FIBRAS TEXTILES.....	8
FIGURA 2. TIPOS DE TRATAMIENTOS DE EFLUENTES INDUSTRIALES.....	21
FIGURA 3. REACCIONES ELECTROQUÍMICAS	22
FIGURA 4. ELECTRODISOLUCIÓN DE UN METAL EN UN PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN	25
FIGURA 5. CELDA ELECTROLÍTICA.....	26
FIGURA 6. PROCESOS INVOLUCRADOS EN UN REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN.....	27
FIGURA 7. DIAGRAMA DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN	28
FIGURA 8. CONEXIÓN MONOPOLAR EN PARALELO	33
FIGURA 9. ZONAS DEL REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN.....	36
FIGURA 10. MÉTODO INTEGRAL PARA UNA REACCIÓN DE ORDEN 1.....	40
FIGURA 11. CONDICIONES TEÓRICAS DE CORROSIÓN, PASIVACIÓN E INMUNIDAD DE ALUMINIO A 25 [°C]	43
FIGURA 12. CARACTERÍSTICAS DEL REACTOR BATCH.....	54
FIGURA 13. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE TURBIDEZ.....	104
FIGURA 14. PROCEDIMIENTO DE LECTURA DE TURBIDEZ	105

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. CLASIFICACIÓN DE COLORANTES POR ESTRUCTURA QUÍMICA.....	10
TABLA 2. CLASIFICACIÓN DE COLORANTES POR MÉTODO DE APLICACIÓN	12
TABLA 3. CLASIFICACIÓN DE COLORANTES POR MÉTODO DE APLICACIÓN	14
TABLA 4. PROCESOS MÁS COMUNES DE BLANQUEO	16
TABLA 5. VARIABLES PRINCIPALES DEL PROCESO DE TINTURADO.....	17
TABLA 6. PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN.....	20

TABLA 7. CARACTERÍSTICAS DE LOS CIRCUITOS EN SERIE Y EN PARALELO	33
TABLA 8. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN	37
TABLA 9. ANTECEDENTES DE PROYECTOS SOBRE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR MÉTODOS ELECTROQUÍMICOS	44
TABLA 10. EQUIPOS UTILIZADOS	46
TABLA 11. MATERIALES DE LABORATORIO	47
TABLA 12. REACTIVOS	48
TABLA 13. CANTIDADES DE MUESTRA Y REACTIVOS USADOS	52
TABLA 14. MEDIDAS CONSTANTES PARA REACTOR ELECTROQUÍMICO CONTINUO	58
TABLA 15. MEDIDAS SEGÚN LA ESCALA	59
TABLA 16. ESPACIO PARA PASO DE AGUA SEGÚN NÚMERO DE CELDA	62
TABLA 17. RESULTADOS COMPARANDO LOS VIALES PREPARADOS DE HACH CON MIS VIALES PARA UNA MUESTRA DE AGUA	71
TABLA 18. RESULTADOS COMPARANDO LOS VIALES PREPARADOS DE HANNA CON MIS VIALES PARA UNA MUESTRA DE AGUA	72
TABLA 19. COMPARACIÓN DE VALORES DE DQO, PARA UNA MISMA MUESTRA	73
TABLA 20. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL AGUA PREVIO AL TRATAMIENTO	74
TABLA 21. RESULTADOS DE REMOCIÓN DE DQO DE LOS ENSAYOS PRELIMINARES	75
TABLA 22. NUEVAS RÉPLICAS DE LOS MEJORES RESULTADOS DE REMOCIÓN DE DQO DE LOS ENSAYOS PRELIMINARES	76
TABLA 23. VARIACIÓN DE TEMPERATURA Y PH DE ENSAYOS PRELIMINARES	77
TABLA 24. MEJOR RESULTADO DE LOS ENSAYOS	77
TABLA 25. COMPARACIÓN DEL CONSUMO DE ALUMINIO EN EL ÁNODO PRÁCTICO Y TEÓRICO	78

TABLA 26.RESULTADO DE LA DECANTACIÓN Y FILTRACIÓN PREVIA	78
TABLA 27.RESULTADO CON LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS HALLADOS.....	79
TABLA 28.RESULTADO DE PH Y TEMPERATURA	79
TABLA 29.RESULTADOS PARA OPTIMIZAR RESULTADOS.....	80
TABLA 30. RESULTADOS DE PH Y TEMPERATURA PARA OPTIMIZAR RESULTADOS.....	80
TABLA 31.RESULTADOS CON LOS PARÁMETROS OPTIMIZADOS.....	81
TABLA 32.RESULTADOS DEL DQO EN CADA CELDA Y A LA SALIDA DEL REACTOR.....	81
TABLA 33.RESULTADO DEL REACTOR ELECTROQUÍMICO CONTINUO	83
TABLA 34. DATOS PARA HALLAR CINÉTICA DEL REACTOR ELECTROQUÍMICO CONTINUO.....	84
TABLA 35. COMPARACIÓN DE RESULTADOS EN LABORATORIO Y EL MODELO	88
TABLA 36. INFORMACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LOS COSTOS OPERACIONALES.....	89
TABLA 37. CONDICIONES DURANTE EL TRATAMIENTO ÓPTIMO	89
TABLA 38.RESULTADO DE CONSUMO DE ENERGÍA Y ELECTRODO	90
TABLA 39.CÁLCULO DE COSTO DE OPERACIÓN.....	91
TABLA 40. DIMENSIONES DEL ESPACIO PARA IMPLEMENTAR EL SISTEMA	91
TABLA 41. DIMENSIONES DEL REACTOR ELECTROQUÍMICO CONTINUO SI FUERA IMPLEMENTADO	92
TABLA 42 .CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL EFLUENTE	93
TABLA 43.CANTIDADES DE MUESTRA Y REACTIVOS PARA VARIOS VASOS DE DIGESTIÓN.....	99
TABLA 44. VALORES INCÓGNITA PARA AÑADIR 2 ML DE MUESTRA.....	99
TABLA 45.CAUDALES SEGÚN EL NIVEL DE CAUDAL DE LA BOMBA PERISTÁLTICA.....	102
TABLA 46.CAUDALES PARA EL REACTOR ELECTROQUÍMICO CONTINUO	102

INDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICO 1. RESULTADOS DE ENSAYOS EN EL REACTOR BATCH.....	76
GRÁFICO 2. DISMINUCIÓN DEL DQO EN EL REACTOR ELECTROQUÍMICO CONTINUO	82
GRÁFICO 3. ORDEN DE REACCIÓN (N=0)	85
GRÁFICO 4.ORDEN DE REACCIÓN (N=1)	85
GRÁFICO 5.ORDEN DE REACCIÓN (N=2)	86
GRÁFICO 6.ESPECTRO DE ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X PARA MUESTRA DE ALUMINIO. INTENSITY COUNT VS ENERGY KEV	100

INDICE DE FOTOGRAFÍAS

FOTOGRAFÍA 1.SOLUCIONES PARA DQO	49
FOTOGRAFÍA 2. PROCESO DE MUESTREO PARA EL REACTOR BATCH.....	51
FOTOGRAFÍA 3.PIEZAS DEL REACTOR ELECTROQUÍMICO BATCH Y CORTES EN EL REACTOR ELECTROQUÍMICO BATCH	54
FOTOGRAFÍA 4.REACTOR BATCH ARMADO	55
FOTOGRAFÍA 5.ENSAYO EN REACTOR ELECTROQUÍMICO BATCH	57
FOTOGRAFÍA 6.PIEZAS DEL REACTOR ELECTROQUÍMICO CONTINUO Y ELECTRODOS.....	65
FOTOGRAFÍA 7.ARMADO DEL REACTOR ELECTROQUÍMICO CONTINUO	66
FOTOGRAFÍA 8.MUESTREO PARA EL REACTOR ELECTROQUÍMICO CONTINUO	67
FOTOGRAFÍA 9.ENSAYO EN EL REACTOR ELECTROQUÍMICO CONTINUO	68
FOTOGRAFÍA 10.ENSAYO EN EL REACTOR ELECTROQUÍMICO CONTINUO.....	70
FOTOGRAFÍA 11.COMPROBANDO VALORES DE DQO EN HACH	71
FOTOGRAFÍA 12.COMPROBANDO VALORES DE DQO EN HANNA	72

FOTOGRAFÍA 13. VALORES DE DQO DEL PATRÓN DEL IIIDPROQ	73
FOTOGRAFÍA 14. HALLANDO DQO.....	75
FOTOGRAFÍA 15. RESULTADOS FINALES.....	83
FOTOGRAFÍA 16. ANÁLISIS DE ELEMENTOS LIGEROS Y DE ELEMENTOS LIGEROS DE LA MUESTRA DE ALUMINIO.....	101
FOTOGRAFÍA 17. HALLANDO CAUDALES CON SUS NIVELES	101
FOTOGRAFÍA 18. HALLANDO LA TURBIDEZ DE LA MUESTRA DE AGUA.....	105
FOTOGRAFÍA 19. DIGESTIÓN EN LOS VIALES	106
FOTOGRAFÍA 20. VIALES EN LA GRADILLA METÁLICA.....	107
FOTOGRAFÍA 21. LECTURA DEL BLANCO.....	107

Capítulo I 1. Introducción

1.1. Antecedentes

Las aguas residuales de distintas industrias sin tratar provocan impactos negativos y una de las industrias que genera un alto grado de contaminación, es la textil. Las diferentes etapas de elaboración de un producto textil involucran un sin número de operaciones que generan diversos tipos de contaminantes de estructura variada. Dentro de estos, los colorantes, son los compuestos que más aportan en concentración y en las aguas residuales de estas industrias (Goyes et al., 2013, p.94).

Un problema ambiental lo constituyen los compuestos orgánicos refractarios como los colorantes, que interfieren en los procesos fotosintéticos que realizan los organismos en cuerpos hídricos. Estos contaminantes se encuentran presentes en las aguas residuales de industrias como la textil, papelera, curtiembre, farmacéutica, entre otros, cuyos procesos generan grandes volúmenes de aguas residuales (Bermeo & Tinoco, 2016, p.125).

Álvarez (1994) señala que ``los colorantes, en especial los de origen sintético, presentes en las aguas residuales, son responsables de muchos de los efectos nocivos sobre la flora y la fauna acuática. Los más significativos son la disminución del oxígeno disuelto, la eutrofización, la formación de compuestos recalcitrantes y tóxicos para las células y la obstaculización del paso de la luz a los cuerpos de agua y su deterioro estético'' (Bermeo & Tinoco, 2016, p.126).

Se sabe la problemática en el área de aguas residuales de las industrias textiles que provocan daños en los recursos hídricos, en la fauna y flora presente en ellos, es decir, daña nuestro medio ambiente. Es necesario y obligación de cada uno de nosotros proteger nuestro medio ambiente, ya que es nuestro hogar y si no hacemos algo al respecto, en poco tiempo no tendríamos buenas condiciones para vivir en nuestro planeta. Debemos velar por las

generaciones futuras que son las que verán las consecuencias en caso que no cuidemos nuestro medio ambiente. También se sabe que los métodos electroquímicos están tomando importancia, ya que cada vez se está incursionando más en el área de tratar aguas residuales por este método.

Durante las últimas décadas se han reportado trabajos, donde se ha utilizado la electrocoagulación para remover partículas suspendidas y disueltas de aguas residuales provenientes de la industria: papelera, maderera, alimenticia, textil, minera, entre otras (Sánchez & Flores, 2010).

También debido a que el tratamiento biológico es insuficiente para eliminar el color, se precisa otros tratamientos, como el que se mencionó, es decir, métodos electroquímicos, en los cuales se dieron buenos resultados en la remoción de color y de carga orgánica en la industria textil. El presente trabajo está dirigido a la mitigación de la contaminación provocada por los efluentes provenientes de los procesos en conjunto de la Industria Textil SENATEX.

1.2. Planteamiento del Problema

Existen diversas formas de contaminar el Medio Ambiente, pero una de las que más ha centrado la atención del mundo investigador en los últimos años es el vertido de efluentes líquidos procedentes de actividades urbanas e industriales al medio que los rodea. Esto ha sido así porque el agua es un recurso escaso. Yendo al punto a tratar, que son las aguas, podemos mencionar el grave impacto que reciben estos en cuanto a la contaminación de distintas industrias. Es por ello, que con los conocimientos adquiridos y con las ganas depositadas en el tema a tratar es que quiero aportar con conocimiento, para mostrar una alternativa al vertido de las aguas residuales a nuestro medio ambiente sin previo tratamiento o con un tratamiento poco eficiente en cuanto al nivel de toxicidad para los recursos hídricos, por ello planteo el siguiente proyecto de tratar las aguas residuales de la industria textil, en específico trabajé con las aguas de

SENATEX, para tratarla y reducir la carga orgánica de estas aguas. Ahora bien, en el proceso de la industria textil SENATEX, se requiere bastante uso de agua, los datos técnicos de uso son muy variantes, son de acuerdo a los pedidos que le hagan a la industria, no tiene caudales constantes. Ellos poseen una cámara de acumulación de aguas para el bombeo al tratamiento de aguas residuales, que tiene un volumen de 64 [m³], una vez llena la piscina de acumulación es llevada por medio de una tubería de 212 (m) de longitud y 6 (plg) de diámetro y con un caudal máximo de 22 (m³/h) a la piscina 1 en el área de tratamiento de aguas residuales. La frecuencia de funcionamiento del bombeo de la piscina de acumulación es de mínimo 1 vez al día y como máximo 4 veces al día, no hay un comportamiento constante, esta variará de acuerdo a los pedidos que tenga la industria, también de acuerdo a los pedidos se generará mayor o menor contaminación.

Con el objeto de regular las actividades de las industrias que puedan contaminar el medio hídrico existe la normativa regulada por el RASIM, donde indica que toda industria es responsable de la prevención y control de la contaminación que puedan generar sus descargas. Se promovió la remoción de la carga orgánica de estas aguas, ya que pude observar de distinta información bibliográfica la viabilidad de este método de tratamiento de agua residual, sobre todo en este tipo de industrias. Para cada industria se debe diseñar una planta, especialmente proyectada para el proceso de producción en cuestión. Se planteará una alternativa a dicho problema en este proyecto con un Reactor Electroquímico Continuo, ya que, en la industria textil se vierte agua continuamente y en caso de tener un reactor batch se acumulará el agua residual a tratar, en cambio, en un reactor electroquímico continuo el tratamiento será continuo, es decir, conforme vaya saliendo el agua residual se irá tratando.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Diseñar y construir un reactor electroquímico continuo a nivel laboratorio para realizar el tratamiento por electrocoagulación del efluente procedente de la industria textil y lograr una alta remoción de la carga orgánica (DQO).

1.3.2. Objetivos Específicos

- Analizar y determinar parámetros fisicoquímicos: DQO, pH y temperatura.
- Realizar pruebas preliminares del método de electrocoagulación en un reactor electroquímico batch, para establecer valores óptimos iniciales de los parámetros para el diseño del reactor electroquímico continuo para tratar el efluente de la industria textil beneficiada.
- Dimensionamiento y construcción de un reactor electroquímico continuo experimental a nivel laboratorio.
- Optimizar resultados de las pruebas preliminares para la verificación de una alta remoción de carga orgánica (DQO).
- Evaluar los costos de este tratamiento.

1.4. Justificación

1.4.1. Técnica

Por referencias bibliográficas de proyectos y artículos elaborados por estudiantes y profesionales de distintas universidades y de la Facultad de Ingeniería (UMSA) en la elaboración de tratamiento de aguas residuales de distintos tipos de aguas por métodos electroquímicos, se demuestra la eficacia del método electroquímico pero en otro tipo de efluentes y con reactores batch mayormente, se realizará este tipo de tratamiento a efluentes de la

industria textil, por métodos electroquímicos por electrocoagulación continua , de esta manera, se tendrá resultados actualizados de la contaminación que representa así como la capacidad, eficiencia del método en este tipo de efluente y la viabilidad de un reactor electroquímico continuo.

1.4.2. Económica

En gran parte de los tratamientos convencionales para su puesta en práctica se requiere de medios importantes de equipos y reactivos, que generan el incremento de su costo de producción y a la contaminación del medio ambiente. Pero en este proyecto no será necesario añadir reactivos al agua residual, por lo que se demostrará que el proyecto es rentable contando con una evaluación económica del costo de operación del tratamiento a nivel laboratorio, aparte de que será amigable con el medio ambiente, este estudio beneficiará a las industrias textiles ya que se considerará una base útil para llevar a cabo el proyecto a mayor escala y así las industrias podrán tener una opción más para sus tratamiento de sus aguas residuales.

1.4.3. Social

Tenemos en nuestro país el RASIM, en la Ley 1333 de Medio Ambiente, tiene como objetivo regular las actividades de las industrias que puedan contaminar nuestro medio hídrico, estas normas se muestran débiles al momento de articularse, pues no se cuenta con el personal capacitado ni con la instrumentación necesaria que pueda controlar la calidad de las descargas de efluentes. Aparte, la problemática causada actualmente en nuestro planeta por el agua se está agravando por la contaminación que muchas industrias generan en el medio hídrico, es por ello que muchas investigaciones se encaminan por el estudio del tratamiento de aguas residuales, en algunos casos están limitados por bajos rangos de concentración y tener altos costos de producción, por bibliografía se conoce que el método de electroquímico es eficiente y rentable,

se deben ejecutar este tipo de proyectos, de manera que se reduzca la contaminación (tratamiento previo al verter las aguas residuales al medio hídrico) y el consumo excesivo de agua del sector industrial mediante la reutilización de este recurso.

1.4.4. Ambiental

Tenemos diversas Industrias Textiles en nuestro país, por lo cual tenemos una gran generación de aguas residuales, no solo de esta industria, de las cuales muchas veces se descargan al medio hídrico sin previo tratamiento, la cual es altamente dañina para los recursos hídricos, es por ello que el método electroquímico entra en juego en este cometido, el cual puede ser tratado de una forma amigable con el medio ambiente, sin uso de reactivos perjudiciales para el medio ambiente, la cual evita la adición de agentes coagulantes. Se demostrará la disminución de contaminación que genera el efluente y una posible reutilización del agua con una considerable remoción de contenido de carga orgánica del efluente.

Capítulo II 2. Marco Teórico

2.1. Industria Textil

La industria textil internacional se caracteriza por ser una de las actividades que tiene altos consumos de: agua, energía y reactivos químicos (Sánchez et al., 2018). A continuación, datos importantes que resaltar de esta industria:

- Se consumen 54 millones de toneladas de fibras naturales/Año, un millón de toneladas de colorantes y siete millones de químicos para procesamiento textil/Año (Sánchez et al., 2018).
- El algodón es la fibra que más consume agua en su proceso de tintura: 30 - 150 L/kg de material textil (Castells, 2012).
- Un par de jeans necesita un mínimo de 42 litros de agua para ser teñidos, lavados y acabados. Una vez en casa, usamos todavía más agua, cuidándolos; usando, 21 litros cada vez que los lavamos (Villegas y Gonzales, 2013).
- Por cada kilo de producto acabado (prenda) se emite 3,6 kg de CO₂ equivalente (Salas y Condorhuaman, 2014).

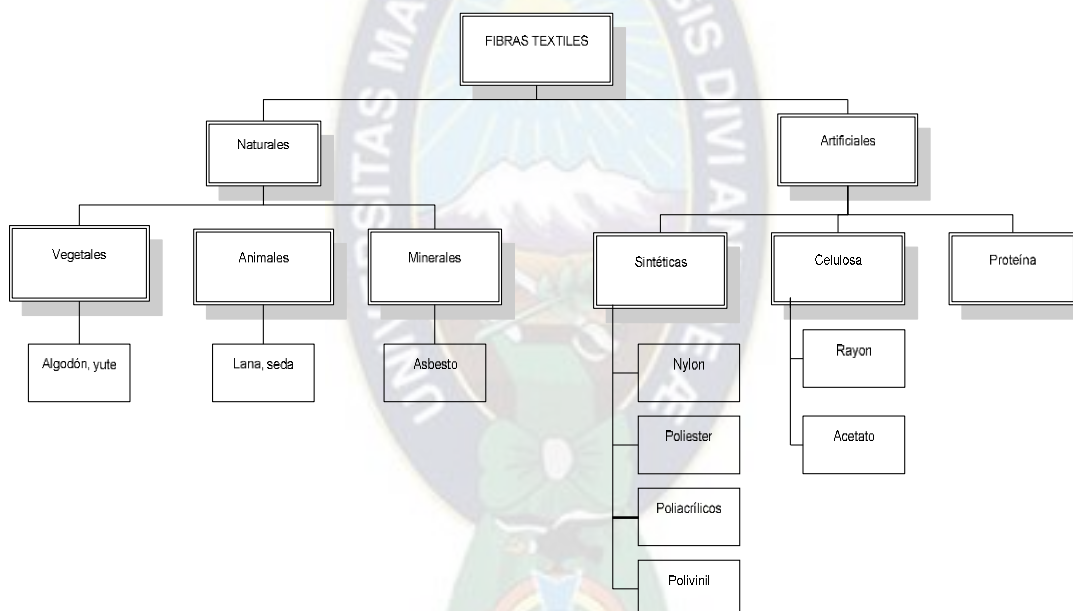
La industria textil convierte las fibras naturales o artificiales en hilos aprovechables y de fácil manipulación. Además, ha originado un conjunto de nuevas industrias auxiliares que han diversificado las industrias químicas de suministro de productos químicos y materias colorantes. Con el fin de alcanzar niveles más altos de eficiencia, competitividad, rentabilidad, reducir los riesgos para el ser humano y el medio ambiente se implementa tecnología innovadora para controlar procesos de producción y tratar los efluentes contaminados de este sector productivo (Polanco & Valeriano, 2013, p.20).

2.1.1. Fibras Textiles

En el ámbito de la industria textil, se denomina fibra textil al conjunto de filamentos o hebras susceptibles de ser usados para formar hilos (y de estos los tejidos), bien sea mediante hilado, o mediante otros procesos físicos o químicos. Así, la fibra es la estructura básica de los materiales textiles. Tradicionalmente se han clasificado en: artificiales, sintéticas y origen animal (Cuásquer, 2015, p.5).

Figura 1.

Clasificación de Fibras Textiles



Fuente: Gómez Polanco & Martínez Valeriano, 2013, p.21.

2.1.1.1. Fibras Naturales. CEPIS (2005) señala que ``las fibras naturales que se utilizan en la industria textil son: algodón, yute y seda. La utilización de algodón ha sido más intensiva debido a que contiene menos impurezas que la lana`` (Gómez Polanco & Martínez Valeriano, 2013, p.21).

2.1.2. Colorantes

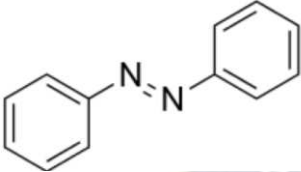
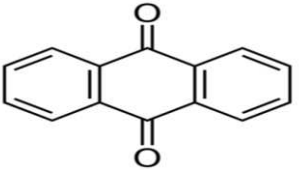
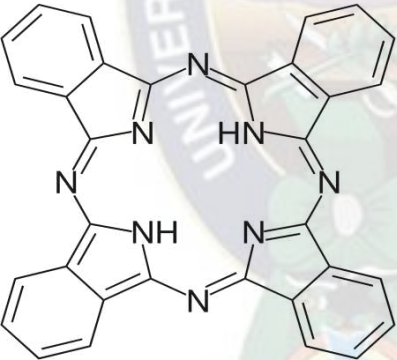
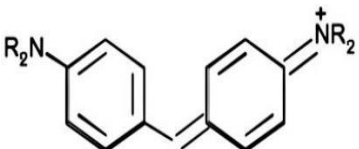
Los colorantes son solubles en agua y son definidos como compuestos capaces de impartir color a una fibra, sin ser afectados por factores como la luz, temperatura y jabón (R. Garzón, 2009).

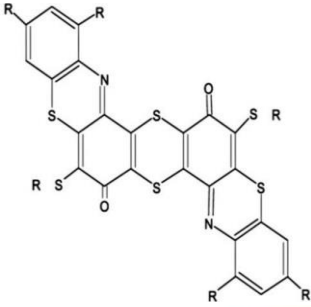
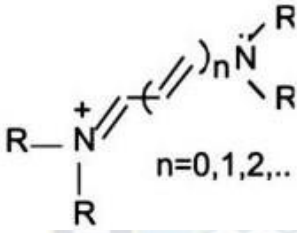
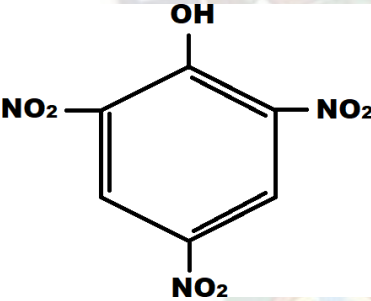
Natasi et al (2010) señala que ``los colorantes son sustancias orgánicas fluorescentes o de color intenso que imparten color a una sustancia incolora o bien a un sustrato por medio de una adsorción selectiva de luz dentro de las longitudes de onda de 400nm-700nm del espectro electromagnético. El compuesto está constituido por tres grupos funcionales, el cromóforo, que es el grupo responsable de la adsorción de la luz, dándole la propiedad de color al compuesto; los auxocromos, que le dan afinidad por la fibra e intensifican el color y por último el solubilizador, que le da afinidad a solventes diversos y está dado por la presencia de iones como $-\text{SO}_3\text{Na}^+$, $-\text{NH}_3\text{Cl}^-$, $-\text{SO}_2\text{NH}_2^+$, $-\text{ONa}^+$ `` (Pérez Cuásquer, 2015, p.5).

2.1.2.1. Clasificación de Colorantes. M. Soto (2013) señala que ``como ya se mencionó anteriormente, actualmente existe una gran cantidad de colorantes comerciales disponibles en el mercado global. Al ser una gran variedad de colorantes, los podemos clasificar por estructura química y también por el método de aplicación al que están sujetos en la industria`` (Zaruma Arias et al, 2018, p.39).

2.1.2.1.1. Clasificación Química. C. López (2007) señala que ``este tipo de clasificación se puede observar con mayor detalle en la siguiente tabla, en donde se agrupan a los colorantes de mayor a menor importancia de uso en la industria textil, así como su grupo cromóforo`` (Zaruma Arias et al, 2018, p.40).

Tabla 1.*Clasificación de Colorantes por Estructura Química*

Familia	Grupo Cromóforo	Descripción
Azoicos		Este grupo de colorantes es el más importante dentro de la industria textil con una elaboración aproximada del 70% de los colorantes orgánicos del mercado
Antraquinonas		Son quinonas tricíclicas derivadas del antraceno que a menudo contienen uno o más grupos hidroxilo
Ftalocianina		Éstos colorantes están formados por la unión de cuatro grupos isoindol (dos anillos fusionados, uno bencénico y el otro; una piridina) mediante cuatro átomos de nitrógeno, dando lugar a un anillo de 16 átomos: ocho de nitrógeno y ocho de carbono, alternados con dobles enlaces conjugados.
Ion arilcarbonio		Su estructura química está conformada por un átomo carbonilo unido a dos o tres anillos aromáticos.

Familia	Grupo Cromóforo	Descripción
Sulfuro		<p>Grupo de colorantes totalmente insolubles en agua, pero solubilizable por reducción.</p> <p>Proporciona una gama de colores bajos y apagados.</p>
Polimetino		<p>Se clasifican en tintes neutros, catiónicos y aniónicos. En los extremos de su cadena poseen un grupo donador y un sustractor de densidad electrónica.</p>
Nitro		<p>Son un grupo de colorantes incoloros cuando se encuentran aislados. Su absorción se encuentra muy cerca del campo visible por combinación de grupos auxocromos débiles, adquiriendo una tonalidad amarillenta.</p>

Fuente: Zaruma Arias et al, 2018, p.40.

Los colorantes que son más comúnmente utilizados en la industria textil son los de la familia azo o colorantes azoicos, donde estos destacan por estar compuestos con un doble enlace de moléculas de nitrógeno. Estos compuestos, al igual que la gran mayoría de los colorantes sintéticos, son poco biodegradables, pero se han encontrado diversas condiciones para que puedan ser completamente degradados. Se ha demostrado que algunos de estos compuestos son cancerígenos y mutagénicos (Zaruma Arias et al, 2018, p.41).

2.1.2.1.2. Según su Método de Aplicación. En la industria textil existen diversos tipos de fibras (lana, algodón, nylon, poliéster, etc.) a las cuales aplican diferentes métodos de teñido por su capacidad y grado de fijación de los colorantes (Zaruma Arias et al, 2018, p.41). En la tabla 2 veremos la clasificación de colorantes por método de aplicación:

Tabla 2.

Clasificación de Colorantes por Método de Aplicación

TIPO	FIBRAS	MÉTODO DE APLICACIÓN	GRUPOS CROMÓFOROS
Ácidos	Nylon, lana, seda, papel, tintas y piel	Normalmente para baños de tinte neutros a ácidos	Azo, antraquinona, trifenilmetano, nitro y Nitroso
Básicos	Papel, poliacrilonitrilos, nylon, poliéster y seda	Para baños de tintura básicos	Azo, trimetilmetano, antraquinona
Directos	Algodón, rayón, piel y nylon	Inmersión de la fibra en un baño con un electrolito. Forma enlaces de hidrógeno.	Azo
Dispersos	Poliéster, poliamida, acetato, acrílico y plásticos	En forma de presión coloidal con altas temperaturas y presión. Unión del colorante por interacciones dipolares	Azo, antraquinona y Nitro
Mordaz	Lana, piel y algodón	Aplicado en conjunto con sales de Cr	Azo y antraquinona

TIPO	FIBRAS	MÉTODO DE APLICACIÓN	GRUPOS CROMÓFOROS
Reactivos	Algodón, lana, seda y nylon	Los grupos reactivos del colorante reaccionan con los grupos funcionales de la fibra para enlazarse covalentemente bajo la influencia de la temperatura y el Ph	Azo y antraquinona
Al azufre	Algodón y rayón		Estructuras indeterminadas
A la tina	Algodón, rayón y lana	Reducción con hidrosulfito de sodio, después de la impregnación se oxida	Antraquinona e índigos

Fuente: Castillo Cervantes, 2015.

En la empresa en la cual se realiza el proyecto de grado se tiene el colorante reactivo que se caracterizan por formar una unión éter con la fibra, lo que garantiza una mayor duración del color en el tejido (Pérez Cuásquer, 2015, p.6).

Ghaly et al (2014) ``al incrementar el empleo de los colorantes, incrementa la demanda de agua, ya que el proceso de fijación de los colorantes en las telas se da en medio acuoso. Aproximadamente se requieren de 200 L de agua para producir 1 kg de producto textil'' (Zaruma Arias et al, 2018, p.42).

En la siguiente tabla se muestra la clasificación de colorantes por método de aplicación:

Tabla 3.*Clasificación de Colorantes por Método de Aplicación*

Método de aplicación	Tipo de Fibra	Grado de Fijación (%)	Descarga en efluentes (%)
Ácido	Poliamida	85-95	5-15
Básico	Acrílico	95-100	0-5
Directo	Celulosa	70-95	5-30
Disperso	Poliéster	90-100	0-10
Reactivo	Celulosa	50-90	10-50
Sulfuro	Celulosa	60-90	10-40
Tina	Celulosa	80-95	5-20

Fuente: A. López, 2015.

2.1.3. Procesos Textiles

2.1.3.1. Preparación de la Fibra. Los procesos para preparación de la fibra varían de acuerdo al tipo de fibra que se desea utilizar (Gómez Polanco & Martínez Valeriano, 2013, p.22).

2.1.3.1.1. Fibra Natural. Los procesos a los que se someten las fibras naturales principalmente el algodón y la lana son: apertura/mezcla, cardado, peinado, calandrado (estirado) y empabilado. (Gómez Polanco & Martínez Valeriano, 2013, p.22).

Apertura/Mezcla: El algodón llega a la industria textil en paquetes compactos denominados balas. La fibra es clasificada y sometida a un proceso de limpieza para retirar partículas de tierra y otros. Este proceso se realiza en máquinas abridoras (openers o pick-up). (Gómez Polanco & Martínez Valeriano, 2013, p.22).

Cardado: Consiste en la transformación de las fibras textiles a mechas. Grumos de fibra procedentes de la apertura y mezcla son llevados por una corriente de aire a la máquina cardadora. La fibra es transportada sobre una banda con agujas y en la parte superior, una serie

de cepillos rotatorios actúan sobre las fibras restregándole y alineándola en una cinta delgada. La cinta de fibra cardada es enviada a través de un cono, formando una cuerda de un sólo cabo denominada mecha (Gómez Polanco & Martínez Valeriano, 2013, p.22).

Peinado: Las mechas obtenidas del cardado son alimentadas a la máquina peinadora, obteniéndose una mecha más homogénea. (Gómez Polanco & Martínez Valeriano, 2013, p.23).

Calandrado (estirado): Varias mechas son combinadas y alimentadas a una serie de rodillos que giran a velocidades diferentes. Mientras pasan las mechas por los rodillos estas son estiradas en un promedio de seis veces su longitud original. Durante este proceso se realizan las combinaciones de fibras para formar por ejemplo las mezclas de poliéster/algodón. (Gómez Polanco & Martínez Valeriano, 2013, p.23).

Empabilado: Las mechas obtenidas del calandrado son sometidas a un proceso de torsión y estirado, originando una hebra con una alta consistencia y resistencia. Las mechas se encarretan en bobinas de plástico o carretes metálicos (Gómez Polanco & Martínez Valeriano, 2013, p.23).

2.1.3.2. Hilatura. En las fibras naturales, la hebra pasa por un conjunto de rodillos que le someten a un proceso de estirado. Luego es recogida en un huso de alta velocidad en el cual viaja un anillo que le imprime torsiones al hilo. Posteriormente el hilo de los husos es rebobinado en conos para su posterior uso (Gómez Polanco & Martínez Valeriano, 2013, p.24).

2.1.3.3. Blanqueo. Los tejidos crudos, especialmente las fibras concentradas, contienen suciedad que no es completamente removida por el proceso de lavado. La mayoría de las empresas que realizan el proceso de blanqueo utilizan el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), que es un importante blanqueador; aunque también utilizan con menor frecuencia hipoclorito de sodio ($NaClO$) o clorito de sodio ($NaClO_2$) (Gómez Polanco & Martínez Valeriano, 2013, p.24). A

continuación, se muestra en la siguiente tabla los procesos más comunes de blanqueo:

Tabla 4.

Procesos más Comunes de Blanqueo

TIPO DE BLANQUEO	DESCRIPCIÓN
Blanqueo de concentración	Se utilizan soluciones diluidas en hipoclorito de sodio y peróxido de hidrógeno, compuestos clorados, agentes de concentración y agentes secuestradores orgánicos e inorgánicos como polifosfatos o ácido etilen-diaminotetra-acético (EDTA).
Blanqueo al lino	Se utilizan soluciones diluidas de ácido clorhídrico, peróxido de hidrógeno y álcalis.
Blanqueo del rayón	Se blanquea de forma similar al primero, pero requiere de tiempos más cortos y menores concentraciones de químicos.
Blanqueo de la seda y lana	Se blanquean utilizando dióxido de azufre y peróxido de hidrógeno. Para estas telas no debe utilizarse compuestos que liberen cloro, ya que causan aspereza y color amarillo en la tela.

Fuente: Adaptado de "Estudio de Optimización de variables de Funcionamiento de un Sistema de Electrocoagulación para tratar Aguas de la Industria Textil", Gómez Polanco & Martínez Valeriano, 2013, pp.24-25.

2.1.3.4. Tejido. Es el género que se obtiene del enlace y cruzamiento de dos series de hilos. La tela es la manera más sencilla de estructurar un tejido, levantando en una pasada los hilos impares y en la siguiente los pares, su módulo estructural se cumple con un mínimo de dos hilos y dos pasadas. El tejido producido no tiene revés (Quinteros Rodríguez, 2017).

2.1.3.5. Tinturado. La tintura es el proceso en el que las fibras absorben colorantes de una solución de colorante. La fibra teñida presenta resistencia a devolver el colorante a la solución. Se debe considerar dos principios fundamentales, que la tintura consiste en una reacción del colorante con la fibra y que es un proceso de efecto durable. (Gómez Polanco & Martínez Valeriano, 2013, p.25).

Dentro del proceso de tinturado se presentan cuatro variables principales:

Tabla 5.*Variables Principales del Proceso de Tinturado*

Variables Principales	Descripción
Sustrato	Es el material que se va a teñir, su presentación puede ser como fibras, cintas de hilandería, hilos, tejidos o incluso prendas.
Insumos	Son los agentes que efectúan el cambio de color (colorantes y blanqueadores ópticos) o ayudan durante el proceso de tintorería a obtener resultados óptimos (productos químicos, productos auxiliares y enzimas).
Maquinaria	Dependiendo del sistema de trabajo, pueden ser por sistema discontinuo o sistema semicontinuo.
Mano de obra	Es el más importante, pues es quien decide a los anteriores, comprende a los niveles operativos, medios y directivos.

Fuente: Adaptado de "Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria Textil Mediante Procesos Electroquímicos", Pérez Cuásquer, 2015, pp. 4-5.

2.1.3.6. Acabado. El acabado comprende todas las operaciones químicas y físicas a las que son sometidos los hilos y los tejidos para mejorar su textura y apariencia. Los tratamientos químicos tienen la función de otorgarle a la tela ciertas propiedades como: resistencia a las arrugas, impermeabilizada, ignífuga y anti- mancha. (Gómez Polanco y Martínez Valeriano, 2015, p.26).

2.2. Tratamientos Convencionales de Aguas Residuales

Son muchas las técnicas de tratamiento con larga tradición y, evidentemente, se ha mejorado mucho en el conocimiento y diseño de las mismas a lo largo de los años, pero no por eso han dejado de ser técnicas imprescindibles a la hora de tratar aguas industriales y no resulta fácil establecer una clasificación universal, una de las formas más utilizadas es en función de los contaminantes presentes en el agua residual, o también en función del fundamento del tratamiento (químico, físico o biológico) (Pérez Cuásquer, 2015, p.8).

2.2.1. Tratamientos Primarios

Entre ellos encontramos los fisicoquímicos como sedimentación, coagulación y la floculación, que son útiles para eliminar sólidos suspendidos, coloides y algunos sólidos inorgánicos disueltos (Pérez Cuásquer, 2015, p.8).

2.2.1.1. Sedimentación. Ramalho (1996) señala que ``la sedimentación se utiliza en los tratamientos de aguas residuales para separar sólidos en suspensión de las mismas. La eliminación de las materias por sedimentación se basa en la diferencia de peso específico entre las partículas sólidas y el líquido donde se encuentran, que acaba en el depósito de las materias en suspensión`` (Pérez Cuásquer, 2015, p.8).

2.2.1.2. Coagulación. Andía (2010) señala que ``la coagulación es el proceso químico por el cual se adiciona una sustancia química (coagulante) al agua con la finalidad de destruir la estabilización de los coloides. La coagulación inicia en el instante en el que se agregan los coagulantes al agua y dura solamente fracciones de segundo, esto se lleva a cabo en una unidad denominada mezcla rápida`` (Pérez Cuásquer, 2015, p.8).

Como coagulantes se utilizan sales metálicas que reaccionan con la alcalinidad del agua, para producir un flóculo de hidróxido del metal, insoluble en agua, que incorpore a las partículas coloidales. Los principales coagulantes que se utilizan son: Policloruro de aluminio, sulfato de aluminio, cloruro férrico, sulfato ferroso, sulfato férrico (Pérez Cuásquer, 2015, p.8).

2.2.1.3. Floculación. Es el fenómeno por el cual las partículas ya desestabilizadas chocan entre ellas para promover el crecimiento del flóculo hasta alcanzar el tamaño y peso necesario para posterior remoción mediante sedimentación. Los flóculos formados por la aglomeración de varios coloides no son lo suficientemente grandes como para sedimentar con la rapidez deseada, para este caso el empleo de un floculante es necesario para unir en forma de red, formando

puentes de una superficie a otra enlazando las partículas individuales en aglomerados (Pérez Cuásquer, 2015, p.9).

2.2.2. Tratamientos Secundarios

Se da para eliminar desechos y sustancias que con la sedimentación no se eliminaron, se pueden expeler las partículas coloidales y similares, puede incluir procesos biológicos y químicos. Este proceso acelera la descomposición de los contaminantes orgánicos. El proceso biológico es el más habitual, facilita que bacterias aerobias digieran la materia orgánica que llevan las aguas. Este proceso se suele hacer llevando el efluente que sale del tratamiento primario a tanques en los que se mezcla con agua cargada de lodos activos (microorganismos) (Pérez Cuásquer, 2015, p.10).

En el libro Purificación de aguas, tratamientos y remoción de aguas residuales (1976) señala que ``estos tanques tienen sistemas de burbujeo o agitación que garantizan condiciones aerobias para el crecimiento de los microorganismos. Posteriormente se conduce este líquido a tanques cilíndricos, con sección en forma de tronco de cono, en los que se realiza la decantación de los lodos. Separados los lodos, el agua que sale contiene muchas menos impurezas. Una parte de estos lodos son devueltos al tanque para que así haya una mayor oxidación de la materia orgánica'' (Pérez Cuásquer, 2015, p.10).

2.2.3. Tratamientos Terciarios

Estos procesos son muy específicos y eliminan, en muchos casos, la totalidad de compuestos químicos residuales que no alcanzan a ser eliminados por procesos primarios o secundarios, los procesos terciarios más comunes son: ósmosis inversa, electrodiálisis, adsorción, remoción por espuma, extracción por solvente, intercambio iónico, nitrificación–desnitrificación y ultrafiltración (Pérez Cuásquer, 2015, p.91).

2.2.4. Procesos Avanzados de Oxidación

Los procedimientos avanzados de oxidación (Advanced oxidation processes = AOP) se definen como “aquellos procesos de oxidación que implican la generación de radicales hidroxilos en cantidad suficiente para interactuar con los compuestos orgánicos del medio”. Se trata de una familia de métodos que utilizan la elevada capacidad oxidante de los radicales HO* y que se diferencian entre sí en la forma en la que los generan. Los más comunes utilizan combinaciones entre ozono (O₃), peróxido de hidrógeno (H₂O₂), radiación ultravioleta y fotocatalisis. La siguiente tabla especifica los procesos de oxidación avanzada más utilizados a nivel de tratamiento de aguas residuales (Pérez Cuásquer, 2015, p.11).

Tabla 6.

Procesos Avanzados de Oxidación

Proceso	División	Subdivisión
Homogéneo	Sin aporte externo de energía	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ozonización en medio alcalino (O₃/OH*) ▪ Ozonización con peróxido de hidrógeno (O₃/H₂O₂) y (O₃/H₂O₂ /OH*) ▪ Peróxido de hidrógeno y catalizador (H₂O₂ /Fe²⁺).
	Con aporte externo de energía	<p>Energía procedente de radiación ultravioleta (UV).</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ozonización y radiación ultravioleta (O₃/UV) ▪ Peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta (H₂O₂/UV) ▪ Ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta (O₃/H₂O₂ /UV) ▪ Foto- fenton (Fe²⁺ /H₂O₂ /UV).

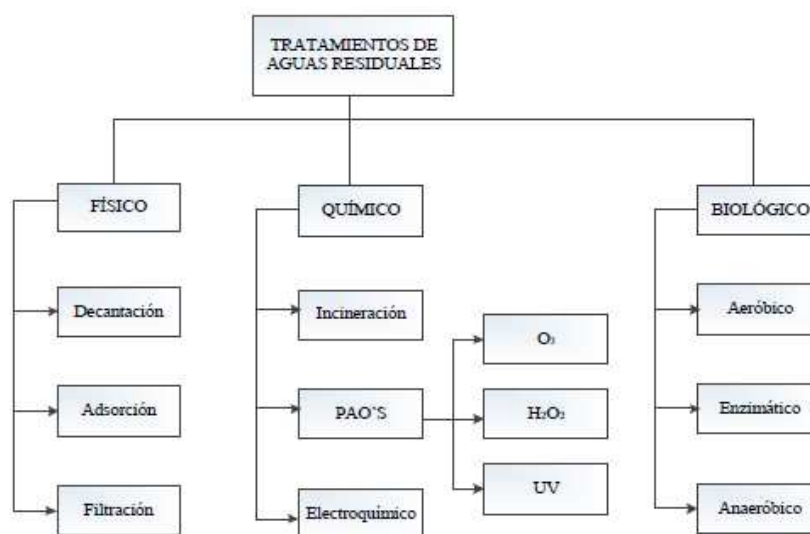
Proceso	División	Subdivisión
Homogéneo	Con aporte externo de energía	Energía procedente de ultrasonido (US) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ozonización y ultrasonidos (O_3)/US) ▪ Peróxido de hidrógeno y ultrasonidos (H_2O_2/US)
		Electroquímica <ul style="list-style-type: none"> ▪ Oxidación electroquímica ▪ Oxidación anódica ▪ Electro-fenton
Heterogéneo		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ozonización catalítica (O_3/Cat.) ▪ Ozonización fotocatalítica (O_3/TiO₂/UV) ▪ Fotocatálisis heterogénea (H_2O_2/TiO₂/UV)

Fuente: Rodríguez, Antonio, et. al. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales, Madrid 2012.

La siguiente figura da a conocer los tipos de tratamientos de efluentes industriales:

Figura 2.

Tipos de Tratamientos de Efluentes Industriales



Fuente: BARCELÓ, Damia, et. al. Aguas Continentales, Gestión de Recursos Hídricos, Tratamiento y Calidad del Agua. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Informes CSIC. Madrid 2008, p. 24.

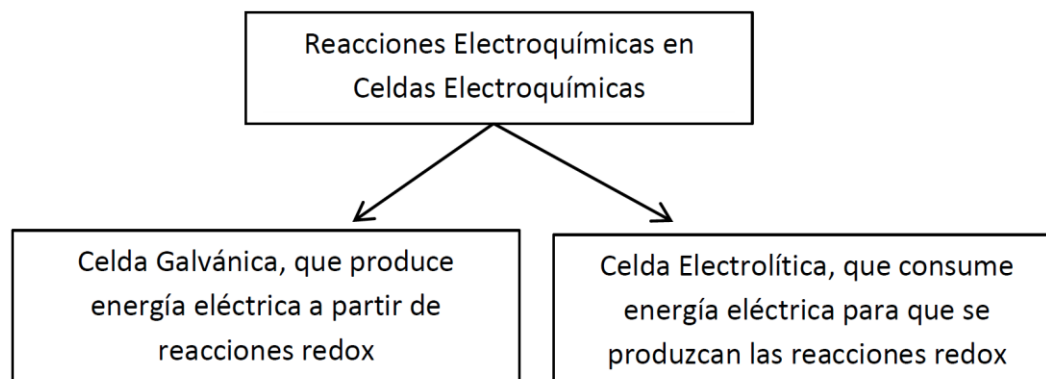
2.3. Electroquímica

La electroquímica es la rama de la química que estudia la transformación entre la energía eléctrica y la energía química. Los procesos electroquímicos son reacciones redox (oxidación-reducción) en donde la energía liberada por una reacción espontánea se convierte en electricidad o la energía eléctrica se aprovecha para inducir una reacción química (Chang, 2002, p.766).

En concordancia con lo mencionado anteriormente, la electroquímica se divide en dos secciones: la primera es la electrólisis, la cual se refiere a las reacciones químicas que se producen por la aplicación externa de un diferencial de potencial de la energía eléctrica, y la segunda, se refiere a aquellas reacciones químicas que generan una corriente eléctrica o diferencia de potencial eléctrico (Casco Sánchez y Jarrín Flores, 2002, p.1).

Figura 3.

Reacciones Electroquímicas



Fuente: Elaboración Propia

Las principales técnicas electroquímicas son la electrodiálisis, la electrocoagulación, la electroflotación y la oxidación directa o indirecta, éstas son usadas en industrias como la metalúrgica, fabricación de pilas, tratamiento de aguas residuales y efluentes gaseosos debido a los bajos costos y las ventajas técnicas que presentan estos métodos (Cuba Tello, 2020, p.25).

2.3.1. Reacciones Electroquímicas

Harley y Masterton (1997) señala que ``las reacciones electroquímicas son las de reducción-oxidación, conocidas como redox, las cuales se basan en transferencia de electrones entre un conjunto de especies químicas, en las cuales se presentará una especie oxidante y una reductora, que a su vez alcanzaran una forma reducida y una forma oxidada respectivamente. Según lo anterior para que se lleve a cabo este tipo de reacciones debe haber una especie que ceda sus electrones y otra que los acepte. El reductor es la especie química que tiende a ceder electrones de su estructura química al medio, quedando con carga mayor a la que tenía, mientras, el oxidante es la especie que tiende a captar esos electrones, quedando con carga menor`` (Gilpavas, 2008,p.4). Harley y Masterton (1997) señala que ``cuando la especie reductora cede sus electrones se convierte en una especie oxidada mientras la que capta los electrones se convierte en una especie reducida. La mayoría de los compuestos inorgánicos cuando se disuelven en agua o en otros líquidos se ionizan, es decir, sus moléculas son dissociadas en componentes cargados positiva y negativamente, lo cual tiene la propiedad de conducir una corriente eléctrica. Si en una solución de un electrolito o un compuesto ionizable, se instalan un par de electrodos y una fuente de corriente directa se conecta entre ellos, los iones positivos se mueven hacia el electrodo negativo y los iones negativos hacia los positivos (oxidarse o reducirse) y se transforman en moléculas o átomos neutros. Por lo tanto, en las reacciones electroquímicas se da básicamente, un intercambio entre los electrones de los electrodos y los iones o moléculas de la solución, mediante la aplicación de una diferencia de potencial, que genera una corriente donde los electrones fluyen desde el punto más negativo hasta el más positivo. Este tipo de reacciones se clasifican según el lugar donde ocurran, ya sea en el seno de

la solución, que son las llamadas homogéneas o en la superficie del electrodo, llamadas heterogéneas'' (Gilpavas, 2008, p.4).

Harley y Masterton (1997) señala que ``para que las reacciones electroquímicas se lleven a cabo inevitablemente ocurrirá la polarización de los electrodos, la cual es definida como la desviación del potencial aplicado respecto al potencial de equilibrio por el paso de corriente. Este cambio de potencial es conocido como sobre potencial, el cual puede ser controlado aumentando la conductividad de la solución, el área efectiva de los electrodos o la distancia entre ellos. Los dos procesos más importantes que rigen el comportamiento de este tipo de reacciones son '' (Gilpavas, 2008, p.5):

- Transporte de masa: es el movimiento de masa desde la solución a la superficie del electrodo, debido a diferencias en el potencial eléctrico (migración), químico (difusión) y por el movimiento global del líquido (Gilpavas, 2008, p.5).
- Transferencia de electrones: existe una contribución de cada densidad de corriente parcial (anódica y catódica) a la densidad de corriente total, esta corriente de intercambio junto al sobre potencial afecta la velocidad de la reacción, pues a mayor corriente circulando mayor será la velocidad de reacción (Gilpavas, 2008, p.5).

2.3.2. Electrocoagulación

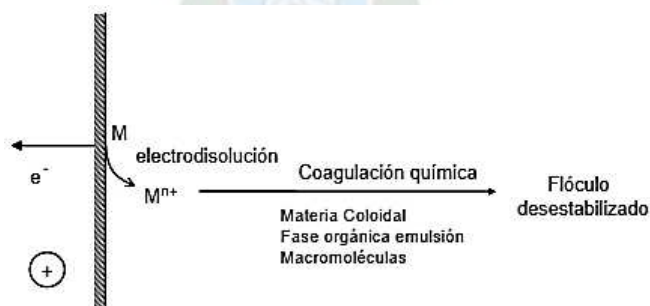
Se puede definir a la electrocoagulación (o coagulación asistida electroquímicamente) como un proceso electroquímico en el que, a partir de compuestos procedentes de la disolución de un ánodo, se agrupa la materia coloidal existente en un agua residual (o se rompe una emulsión), posibilitando su separación del agua mediante técnicas convencionales de separación sólido-líquido (decantación, flotación). Normalmente, el material anódico empleado consiste en

planchas de aluminio o de hierro. Al aplicar una diferencia de potencial a la celda, se consigue la generación de iones en disolución. Como consecuencia, y al igual que en procesos convencionales de coagulación, se obtienen: hidróxidos insolubles sobre los que quedan retenidos los contaminantes y/o hidroxocomplejos catiónicos o aniónicos, que desestabilizan las fuerzas de repulsión electrostáticas existentes en la materia coloidal, bien por neutralización de cargas o bien por formación de enlaces intraparticular (Navarro, 2008, p.25).

Un reactor electroquímico para llevar a cabo un proceso de electrocoagulación, se compone básicamente de un depósito, en el que se sumergen los dos electrodos, y de una fuente de alimentación a la que se conectan los electrodos. Al establecerse una diferencia de potencial entre los electrodos de la celda, comienzan los procesos de reducción en el cátodo, y los de oxidación en el ánodo (generándose el ion Al^{3+} si el ánodo es de aluminio, o el Fe^{3+} si el ánodo es de hierro. Estos iones de aluminio o hierro se hidratan rápidamente. A continuación, ocurre una serie de etapas interrelacionadas en las que se forman hidróxidos insolubles del metal, sobre los que quedan retenidos los contaminantes, como hidroxocomplejos cargados, positiva o negativamente, que permiten la coagulación por neutralización de cargas (Navarro, 2008, p.25).

Figura 4.

Electrodisolución de un Metal en un Proceso de Electrocoagulación

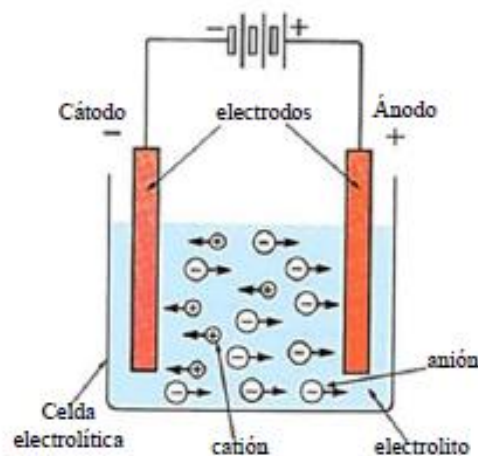


Fuente: Navarro, 2008, p.26.

Además de la generación de coagulantes, en la celda electroquímica ocurren otros procesos con una gran importancia en el proceso de coagulación. Así, en las proximidades del ánodo, la generación de oxígeno por oxidación del agua da lugar a la formación de iones H^+ , que dada su carga son atraídos hacia el cátodo. En el cátodo, la reducción del agua para formar hidrógeno da lugar a la formación de iones hidroxilo (OH^-) que, al contrario que los anteriores, son atraídos hacia el ánodo (Navarro, 2008, p.26). Los iones que proveen los electrodos desencadenan un proceso de eliminación de los contaminantes que se puede dar por dos vías: la primera, por reacción química y precipitación; y la segunda, por el proceso físico de agregación de coloides, que dependiendo de su densidad pueden flotar o precipitar (Cazco Sánchez y Jarrín Flores, 2010, p.26).

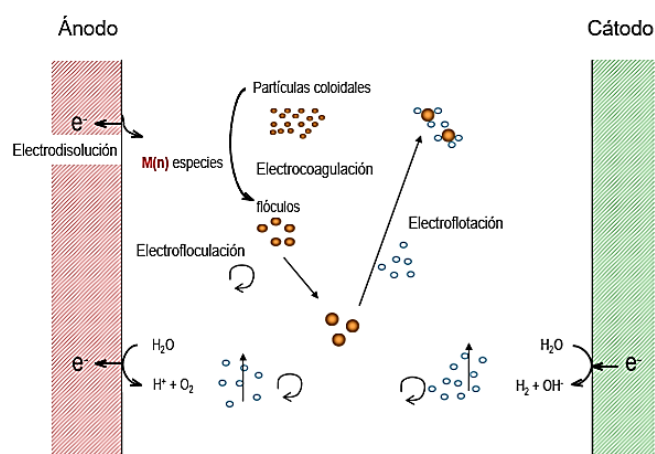
Figura 5.

Celda Electrolítica



Fuente: Pérez Cuásquer, 2015, p. 15

Asimismo, como se mencionaba, los gases generados en los electrodos pueden adherirse a la superficie de los flocúlos disminuyendo la densidad del conjunto, y posibilitando su separación por flotación. A este proceso se le conoce como electro flotación. La electroflotación, es un proceso secundario en cualquier proceso de electrocoagulación (Navarro, 2008, p.27).

Figura 6.*Procesos Involucrados en un Reactor de Electrocoagulación*

Fuente: Navarro, 2008, p.28

En resumen, el proceso de electrocoagulación se lleva a cabo tres etapas:

- Inicialmente se forma el coagulante por oxidación electroquímica del metal del ánodo (Navarro, 2008, p.27).
- Se desestabilizan los contaminantes y las emulsiones (Navarro, 2008, p.27).
- Finalmente, se producen flóculos por agrupación de partículas del contaminante o adsorción en el flóculo de compuestos químicos presentes en la solución (Navarro, 2008, p.27).

2.3.2.1. Componentes. El sistema de electrocoagulación está compuesto por celdas de electrocoagulación (reactor), las que a su vez están conformadas por:

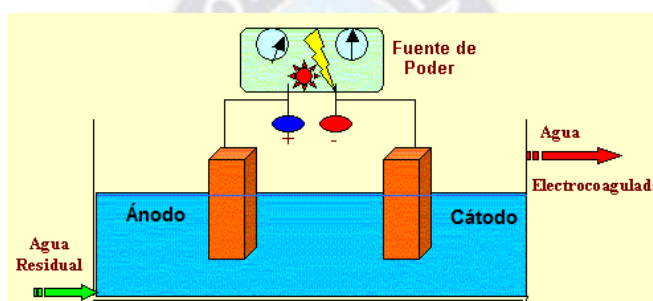
- Electrodo Atacable o Soluble (cátodo y ánodo) (Cazco Sánchez y Jarrín Flores, 2010, p.29).
- Dieléctrico o disolución electrolítica (Agua Residual). La celda puede ser tipo batch o continuo (Cazco Sánchez y Jarrín Flores, 2010, p.29).

- Fuente de Poder de corriente continua que es rectificador capaz de transformar la corriente alterna en continua, con controles de voltaje [V] y amperaje [A] regulables (Cazco Sánchez y Jarrín Flores, 2010, p.29).

Un diagrama del sistema de electrocoagulación se presenta en la siguiente figura:

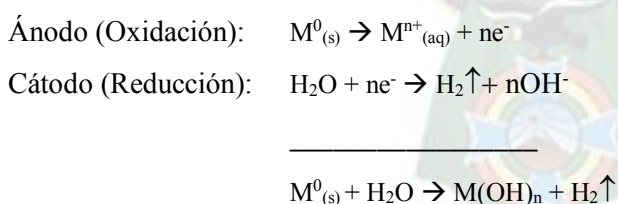
Figura 7.

Diagrama del Sistema de Electrocoagulación



Fuente: Chávez A., 2009.

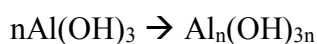
2.3.2.2. Reacciones en la Electrocoagulación. Todo el proceso que ocurre al interior de la celda electrolítica se presenta en forma general, a través de las siguientes reacciones de oxidación-reducción no espontáneas (Cazco Sánchez y Jarrín Flores, 2010, p.30):



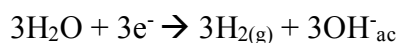
Siendo M^0 el metal o electrodo metálico. Los electrodos más utilizados en el proceso de electrocoagulación por su eficiencia y disponibilidad son las láminas de hierro y aluminio.

Cuando el ánodo de sacrificio son las láminas de aluminio (Al), las reacciones redox no espontáneas son (Cazco Sánchez y Jarrín Flores, 2010, p.31):

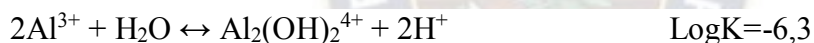
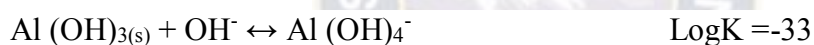
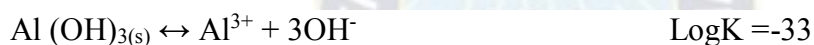
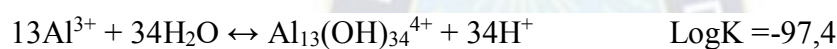
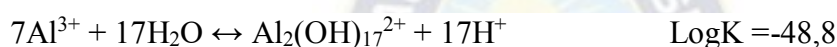
En el ánodo:



En el cátodo:



Los complejos y productos de hidrólisis de los iones aluminio durante el proceso de coagulación son los siguientes:



Los iones Al^{3+} en combinación con los OH^- reaccionan para formar algunas especies monoméricas como $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}_2(\text{OH})_2^+$, y otras poliméricas, tales como $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$, $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ 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 (Cazco Sanchez y Jarrin Flores, 2010, p.33).

2.3.2.3. Factores que Influyen en la Electrocoagulación.

2.3.2.3.1. Distancia entre los Electroodos. La remoción de los contaminantes es mayor, a distancias cortas de separación entre electrodos. (Cazco Sanchez y Jarrin Flores, 2010, p.33). Es decir, a menor distancia entre electrodos mayor será la remoción de contaminantes, pero se vio en distintos estudios, lo siguiente:

En el proyecto de Gómez Polanco y Martínez Valeriano (2013), se utiliza 0,5 cm para obtener buenos resultados con ánodos y cátodos de aluminio (en dicho proyecto es el ensayo 2). En dicho proyecto se tratan de igual forma aguas residuales de la industria textil por métodos electroquímicos. En otro proyecto de M.Sc. Edison Gilpavas (2008), utiliza 0,5 cm para obtener buenos resultados con electrodos de aluminio (Al-Al). En dicho proyecto se trató aguas residuales del proceso de curtición de curtiembres. En muchos más proyectos sobre tratamientos de aguas residuales se observó que se usan un distanciamiento menor a 1,5 cm y mayores a 0,5 cm. Pero se observó mejores resultados con separación de 0,5 cm.

2.3.2.4.2. Densidad de Corriente. Chen (2004) señala que ``la densidad de corriente o la carga eléctrica aplicada es uno de los parámetros que determina la cantidad de metal (Mn^{+}) que se libera en el sistema: altas densidades de corriente permiten unidades de electrocoagulación más pequeñas. Sin embargo, cuando se emplean densidades de corriente demasiado elevadas, aumenta el empleo de energía eléctrica para la reacción paralela de generación de hidrógeno y también la potencia disipada en forma de calor por efecto Joule`` (Gómez Polanco y Martínez Valeriano, 2013, p.15).

El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones Al^{3+} o Fe^{2+} liberados de los respectivos electrodos (Arango Ruiz, 2005, p.49).

2.3.2.4.3. Influencia del pH. El pH del agua o agua residual en la electrocoagulación son reflejados por la eficiencia de la corriente, así como la solubilidad de los hidróxidos del metal. Cuando hay iones cloruro presentes, la liberación de cloro también es afectado. En general se encuentra que la eficacia de corriente usando electrodos de aluminio son más altas en cualquier medio ácido o alcalino que en un medio neutro. El consumo de energía es, sin embargo, más alto para un pH neutro debido a la variación de la conductividad. Cuando la conductividad es alta, el efecto del pH no es significativo. El pH del efluente después del tratamiento de la electrocoagulación aumentará para efluentes alcalinos. El aumento de pH a condiciones ácidas es atribuido a la evolución del hidrógeno en los cátodos (Conde García, 2012, p.17).

2.3.2.4.4. Conductividad y Concentración. Cuando la conductividad del agua a tratar no es elevada, es frecuente la adición de un electrolito para aumentar su valor. Una de las sales más empleadas para este fin es el cloruro de sodio, ya que se ha determinado que los iones cloruro pueden contrarrestar los efectos negativos de aniones como el HCO_3^- y el SO_4^{2-} . La existencia de iones bicarbonato y sulfato en el agua a tratar puede conducir a la precipitación de iones Ca^{2+} y Mg^{2+} , y a la formación de una capa aislante en la superficie de los electrodos, que podría ocasionar un aumento en el potencial de la celda (Conde García, 2012, p.18). Cuando la concentración de contaminante es mayor, es decir, por ejemplo, el agua residual tiene alto DQO, el rendimiento de la electrocoagulación no es tan bueno como en valores bajos de DQO, donde el rendimiento es mejor, que con un DQO mayor. Sin embargo, ya haya un valor alto o bajo de DQO se logra una buena remoción de DQO.

2.3.2.4.5. Voltaje. González (2014) señala que ``el voltaje es directamente proporcional al costo energético y puede variar por factores como la conductividad de la solución, la distancia entre los electrodos, el material y la geometría de los mismos'' (Compara Calle, 2020, p.14).

2.3.2.4.6. Temperatura. Restrepo et al (2006) señala que ``si bien la electrocoagulación ha estado por más de 100 años, el efecto de la temperatura en esta tecnología no ha sido muy investigado. Pero se ha encontrado que la eficiencia de la corriente se incrementa inicialmente hasta llegar a 60 °C, punto donde se hace máxima para luego decrecer. El incremento de la eficiencia con la temperatura esta atribuida al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio en la superficie del electrodo`` (Quispe Quispe, 2015, p.26).

2.3.2.4.7. Tipo de Electrodo y Arreglo. Kabdash et al (2012) señala que ``en la mayoría de los estudios reportados en la literatura científica, el aluminio (Al), fierro (Fe), acero dulce y electrodos de acero inoxidable se han utilizado como materiales para los electrodos. La eficiencia de los electrodos depende de su potencial estándar de reducción. En términos económicos y disponibilidad, las láminas de aluminio y hierro son las más empleadas`` (Quispe Quispe, 2015, p.27).

Mollah et al (2004) señala que ``además según estudios realizados se observó que la electrocoagulación fue superior con electrodos de aluminio en comparación con electrodos de acero. Esto fue atribuido a la formación in situ de complejos dispersados de hidróxido de aluminio por la hidrólisis del ión aluminato, lo que no ocurre al emplear electrodos de acero. El arreglo monopolar de los electrodos con celdas en serie es eléctricamente similar a una celda con varios electrodos interconectados. En el arreglo de una celda en serie, se requiere una diferencia de potencial más alta para una corriente dada al flujo porque las celdas están conectadas en serie tienen resistencia más alta. En este arreglo la misma corriente atraviesa todos los electrodos. Por otra parte, en un arreglo paralelo la corriente eléctrica se divide entre todos los electrodos en lo referente a la resistencia de las celdas individuales. Algunos autores han utilizado los electrodos bipolares con celdas conectadas en paralelo, donde los electrodos de sacrificio se colocaron entre

dos electrodos paralelos sin ninguna conexión eléctrica. Solamente los dos electrodos monopolares están conectados con la fuente de energía eléctrica, sin interconexiones entre los electrodos de sacrificio'' (Quispe Quispe, 2015, p.28). La siguiente tabla muestra la disposición que pueden tener los electrodos en una celda de electrocoagulación.

Tabla 7.

Características de los Circuitos en Serie y en Paralelo

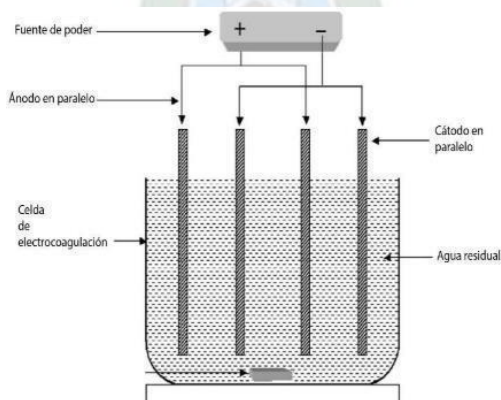
	Serie	Paralelo
Resistencia	Aumenta al incorporar un receptor eléctrico	Disminuye al incorporar un receptor eléctrico
Caída de tensión	Cada receptor tiene la suya, que aumenta con su resistencia. La suma de todas las caídas es igual a la tensión de la celda	Es la misma para cada uno de los receptores e igual a la de la fuente
Intensidad	Es la misma en todos los receptores e igual a la general en el circuito. Cuantos más receptores menor será la corriente que circule	Cada receptor es atravesado por una corriente independiente, menor cuanto mayor resistencia. La intensidad total es la suma de las intensidades individuales. Será, pues, mayor cuanto más receptores se tengan en el circuito

Fuente: Pérez Cuásquer, 2015, p.25.

Se puede observar también en la siguiente figura, la conexión monopolar en paralelo:

Figura 8.

Conexión Monopolar en Paralelo



Fuente: Manchego Doncel y Zabala Gutiérrez, 2019, p.33.

2.4. Características que Afectan un Proceso Electroquímico

2.4.1. Corrosión

La corrosión depende de las impurezas en un metal o aleación, estas pueden conducir a la precipitación de fases inter metálicas que poseen diferentes potenciales de oxidación que la matriz del metal. Así se crean regiones anódicas o catódicas muy pequeñas. Con metales más puros se obtiene una resistencia más alta a la corrosión. Sin embargo, la mayor parte de metales y aleaciones empleadas en Ingeniería contienen un cierto nivel de elementos como impurezas, ya que cuesta demasiado eliminarlos (Rosado, 2019, p.2). Así, la corrosión de los metales es el resultado de reacciones de transferencia de carga en la interfase entre un metal y el ambiente electrolítico que lo rodea. La condición necesaria para que ocurra la corrosión es que la reacción de disolución del metal y alguna reacción de electronización se desarrollen simultáneamente en la interfase metal-ambiente (Treviño Suarez del Real, 2009, p.51).

2.4.2. Pasivación

Desde el punto de vista termodinámico, la corrosión es un proceso inevitable, así como existen metales que son oxidables como el hierro, hay otros que permanecen inalterables, caso del cobre o el aluminio. La razón radica en la calidad del óxido que forman, estos metales se combinan con el oxígeno sin incremento de volumen, por lo tanto, se recubren de una capa de óxido adherente, que los protege de mayor corrosión (como una piel los aísla del contacto con el oxígeno). Se dice entonces que el metal está pasivado (Rosado, 2019, p.2).

En muchos casos, la formación de esta película pasivante es espontánea cuando el metal entra en contacto con el agente externo, por ejemplo, en las superficies de aluminio, cuando una superficie de este metal entra en contacto con el aire ambiental, la parte más externa del objeto se oxida espontáneamente para formar una capa transparente e impermeable de alúmina Al_2O_3 tipo

cerámica, muy congruente y adherente. Por esta razón, aunque el aluminio es termodinámicamente muy reactivo, la capa pasivante lo protege de manera muy efectiva en contra de la corrosión a condiciones ordinarias. Para lograr la corrosión de este metal se requieren ácidos minerales o un determinado sobrepotencial electroquímico (Pérez Cuásquer, 2015, 31).

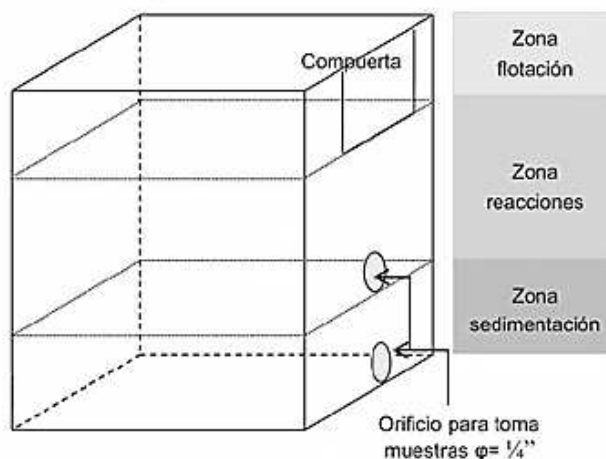
2.4.2.1. Pasividad Electroquímica. Ciertos metales actuando como ánodos se disuelven al aplicarles un potencial ligeramente más positivo que el correspondiente de equilibrio; pero otros metales, especialmente los del grupo del hierro, no comienzan a disolverse al potencial reversible, sino que precisan un exceso de unos 0,3 o 0,4 voltios a la temperatura ordinaria; esta polarización tan pronunciada es debido a que una de las fases del proceso de ionización del metal es entorpecida, por lo que precisa consumirse una energía mayor (Pérez Cuásquer, 2015, p.31).

2.5. Celda de Electrocoagulación

La celda para electrocoagulación cuenta con una distribución volumétrica que contempla tres regiones:

- Zona de flotación: Región superior para el depósito de los lodos de flotación o lodos menos densos y las espumas (Pérez Cuásquer, 2015, p.24).
- Zona de reacción: Región media donde se dan las reacciones electroquímicas, en donde se encuentran los electrodos (Pérez Cuásquer, 2015, p.24).
- Zona de sedimentación: Región inferior, donde se depositan los lodos de precipitación o lodos más densos (Pérez Cuásquer, 2015, p.24).

La siguiente figura muestra las tres zonas en una celda de electrocoagulación rectangular.

Figura 9.**Zonas del Reactor de Electrocoagulación**

Fuente: Pérez Cuásquer, 2015, p.24.

La zona de flotación y la de sedimentación equivalen cada una a $\frac{1}{4}$ del volumen total de la celda y la zona de reacción equivale a $\frac{2}{4}$ partes, aproximadamente. La celda fue provista de una compuerta para evacuar la espuma producida por las burbujas de hidrógeno generado en las reacciones electrolíticas, además de dos llaves para tomar las muestras a ser analizadas, una de esas llaves está ubicada en la zona de reacciones y la otra en la zona de sedimentación (Pérez Cuásquer, 2015, p.24).

2.5.1. Reactor Electroquímico Continuo

Rodríguez, J. (2014) señala que "los reactores de electrocoagulación de flujo continuo, se encuentran clasificados según esta expresada la flotación en el sistema. Esto quiere decir que, una vez ejecutado el proceso de coagulación, el contaminante puede ser separado del medio acuoso bajo dos formas; ya sea por sedimentación o flotación" (Aguilar Mancco y Palomino Cartolin, 2018, p.39). Holt. F. (2005), señala que "un sistema de flujo continuo presenta las siguientes características: el caudal y la concentración es constante, el rendimiento está directamente relacionado con el tiempo de residencia en la celda, la operación se encuentra en

estado estacionario'' (Aguilar Mancco y Palomino Cartolin, 2018, p.39). Rodríguez, J. (2014), señala que ``el efecto del flujo influye notablemente sobre el nivel de eficiencia para la remoción de contaminantes, dado que un incremento del caudal evidenciaría un descenso de los porcentajes de remoción del contaminante. Así mismo la densidad de corriente se ve afectada'' (Aguilar Mancco y Palomino Cartolin, 2018, p.39).

Si nos referimos a la dirección de flujo en el reactor, pueden estar clasificados en unidades de flujo horizontal y vertical. Asimismo, si hablamos de modo de circulación se pueden hallar celdas de canales múltiples o monocanales. Con respecto al tipo de conexión eléctrica, estos son clasificados como monopolares y bipolares (Aguilar Mancco y Palomino Cartolin, 2018, p.38).

2.6. Ventajas y Desventajas de la Electrocoagulación

Tabla 8.

Ventajas y Desventajas de la Electrocoagulación

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Los costos de operación son menores comparativamente con los de procesos convencionales. • Requiere de equipos simples y de fácil operación. • Elimina uso de productos químicos. • Genera lodos más compactos y en menor cantidad, lo que involucra menor problemática de disposición de estos lodos. • Produce flóculos más grandes que aquellos formados en la coagulación química y contienen menos agua ligada. • Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes. • Purifica el agua y permite su reciclaje. • Puede generar aguas incoloras e inodoras. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es necesario reponer los electrodos de sacrificio. • Puede ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de la energía eléctrica sea alto. • El óxido formado en el ánodo puede, en muchos casos, formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas, incrementando la coagulación. • Reduce la contaminación en los cuerpos de agua. 	

Fuente: Rojas Forero & Tierradentro Polania, 2018.

2.7. Cinética Química

La cinética química es la rama de la química que trata de las velocidades y los mecanismos de reacción y se interesa en los factores que afectan dicha velocidad, entre los que se tienen: concentración de los reactivos, temperatura, presión y presencia de catalizadores, entre otros. También se interesa en lo que ocurre a nivel molecular durante la reacción en términos de la estructura y dinámica de las especies involucradas (como el rompimiento y formación de enlaces). En una reacción química es el equilibrio de ésta el que indica hasta dónde ocurre; por ejemplo, que la reacción $A \rightarrow B$ tenga una conversión del 68%. Por otra parte, la cinética indica que tan rápido ocurre, es decir para la misma reacción $A \rightarrow B$, si tomaría un segundo o un año en llegar a ese 68% (Treviño Suarez del Real, 2009, p.17).

De esta manera la cinética proporciona el primer paso en el procedimiento de diseño de reactores: la expresión para la velocidad de la reacción química, para lo cual se requieren datos experimentales. Estos datos suelen ser obtenidos a partir de un reactor de laboratorio a pequeña escala en el cual se pueden controlar fácilmente la temperatura y presión, como en el caso de un reactor por lotes o batch (Treviño Suarez del Real, 2009, p.17).

La velocidad de desaparición de un reactivo tiene intrínsecamente signo negativo; por consiguiente, se le multiplica por menos uno para hacerlo por convención positivo, y la de formación tiene signo positivo por definición (Treviño Suarez del Real, 2009, p.18).

La velocidad de reacción puede expresarse en forma de una ecuación matemática conocida como ecuación cinética de la velocidad de reacción, la cual puede expresarse como sigue (Treviño Suarez del Real, 2009, p.18):

$$r = k [A]^x [B]^y [C]^z \quad (1)$$

Donde A, B y C son las sustancias de cuyas concentraciones depende la velocidad de reacción. Los corchetes [] significan “concentración de moles de reactivo por litro de mezcla de reacción”, k es la constante específica de la velocidad de reacción y depende de la naturaleza de los reactivos y de la temperatura a la cual se lleva a cabo la reacción. Los exponentes “x”, “y” y “z” son los órdenes de reacción con respecto a A, B y C respectivamente, y tienen que ser determinados experimentalmente. Es común que sean números enteros positivos pequeños, pero puede ocurrir que sean fraccionarios y/o negativos. Estos exponentes describen el orden de reacción, siendo el orden total de la reacción la suma de los exponentes (Treviño Suarez del Real, 2009, p.18).

2.7.1. Método Integral

En este método se selecciona una forma de ecuación cinética, se integra y se comparan los datos calculados de [C] contra tiempo con los datos experimentales. Si el ajuste no es satisfactorio se ensaya otra ecuación. El procedimiento en general es el siguiente (Treviño Suarez del Real, 2009, p.20):

1.-Se parte de un modelo propuesto, para la desaparición del reactivo:

$$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A^x \quad (2)$$

2.- Se separan variables y se integra:

$$\int_{C_{Ao}}^{C_A} \frac{dC_A}{C_A^x} = \int_0^t (-k) dt \quad (3)$$

Si $x=1$:

$$\ln \frac{C_A}{C_{Ao}} = -kt \quad (4)$$

Si $x \neq 1$:

$$\frac{C_A^{1-x} - C_{Ao}^{1-x}}{1-x} = kt \quad (5)$$

3.- Estas ecuaciones se pueden linealizar, por lo que su representación dará una recta.

$$\ln C_A = \ln C_{Ao} - kt \quad (6)$$

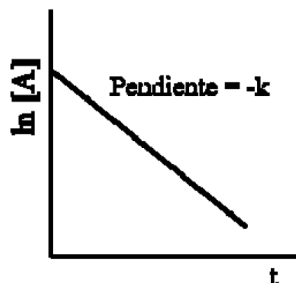
o

$$C_A^{1-x} = C_{Ao}^{1-x} + (x-1)kt \quad (7)$$

Para su resolución gráfica se asume un valor de n . Si el valor supuesto de n es correcto la pendiente que resulta de graficar $\ln C_A$ o C_A^{1-x} contra t sería $-k$ o $(x-1)k$, respectivamente y la ordenada al origen será $\ln C_{Ao}$ o C_{Ao}^{1-x} según el caso (Treviño Suarez del Real, 2009, p.21).

Figura 10.

Método Integral para una Reacción de Orden 1



Fuente: Treviño Suarez del Real, 2009, p.21.

4.- A partir de los datos experimentales se calcula el valor de la integral y se grafican con los correspondientes tiempos (Treviño Suarez del Real, 2009, p.21).

5.- Se observa si los datos se distribuyen sobre una recta que pasa por el origen y, si es así, la ecuación ensayada es correcta; de no ser así, se debe ensayar otra forma de ecuación cinética. Esta correlación se puede verificar por el método de mínimos cuadrados, recordando que se busca el mejor ajuste y no un ajuste perfecto (Treviño Suarez del Real, 2009, p.22).

6.- Si se despeja la k de la ecuación propuesta para valores diferentes de uno por un método iterativo se podría lograr la obtención del valor de k , y la consiguiente verificación de la ecuación cinética, siguiendo una metodología similar (es decir asumiendo un valor de x), si para diferentes valores de CA y t , nos da un valor de k constante es el valor adecuado, si no se corrige con cada iteración (Treviño Suarez del Real, 2009, p.22).

2.8. Leyes de Faraday

El fenómeno de la electrólisis fue descubierto en 1820 por el físico y químico inglés Michael Faraday, quien realizó estudios cuantitativos referentes a la cantidad de electricidad que pasa por una solución. El resultado de sus investigaciones los enunció en las leyes que llevan su nombre. La electrólisis consiste en la descomposición producida por medio de la corriente eléctrica dando como productos sustancias ionizadas denominadas electrolitos. Para que tenga lugar la electrólisis de un compuesto es preciso que éste sea un ácido, una base o una sal disociable en iones, y que se halle en estado líquido o en disolución (Gómez Polanco y Martínez Valeriano, 2013, p.8).

2.8.1. Primera Ley de Faraday

La ley de Faraday establece que la masa de metal depositado es proporcional a la cantidad de corriente que circula a través de la celda y al tiempo de operación de la electrólisis'' (Cáceres Arenas, 2007).

Se expresa así:

$$mF = \frac{M \cdot I \cdot t}{n \cdot F} \quad (8)$$

Dónde:

mF: masa depositada (g)

M: Peso molecular del metal depositado

n: Valencia del ion metálico en la solución

F: Constante de Faraday (96487 Coulomb/equivalente) (1 coulomb = 1 A x 1 s)

I: Corriente que circula (A)

t: Tiempo de operación de la electrólisis (s)

2.9. Diagrama de Pourbaix

2.9.1. Diagramas Eh – pH

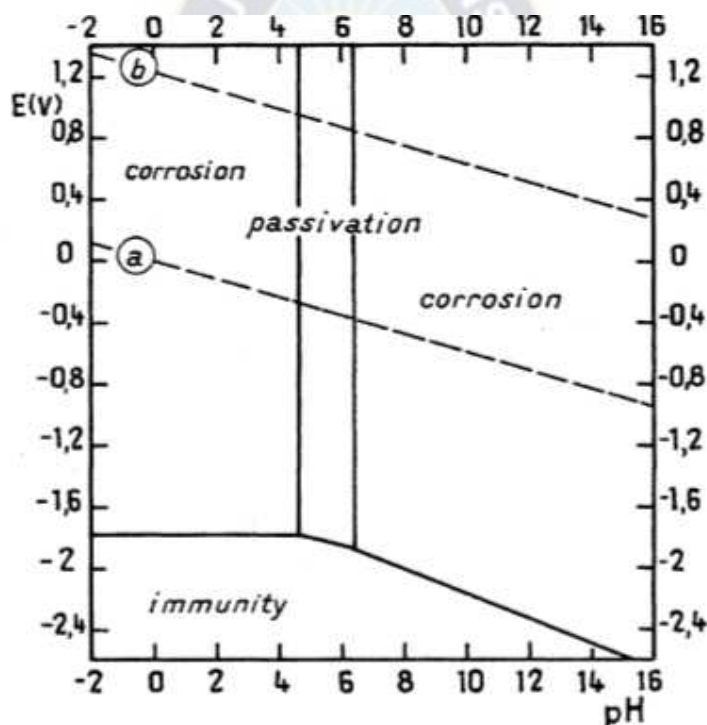
La forma más conveniente de representar la termodinámica de sistemas acuosos es en forma gráfica en los diagramas de Pourbaix o diagramas potencial - pH. Estos diagramas son ampliamente utilizados por cuanto permiten visualizar posibilidades de reacciones sin tener que recurrir al cálculo termodinámico para los fenómenos que ocurren en medio acuoso (Cáceres Arenas, 2007). Una importante restricción en la aplicación práctica de los diagramas termodinámicos, es que predicen tendencias a que ocurran fenómenos, pero no la velocidad con que estos puedan ocurrir. La cinética extremadamente lenta en algunas reacciones conduce a que algunas fases sólidas existan en condiciones fuera de su rango de estabilidad termodinámica o

que fases sólidas no se formen en condiciones termodinámicas favorables y lo hagan otras en su lugar (fases metaestables) (ejemplo: precipitación de hidróxido de hierro). En este caso, es a veces útil utilizar diagramas Eh - pH modificados que consideren las fases metaestables (Cáceres Arenas, 2007).

2.9.1.1. Sistema Al-H₂O. La gráfica de Pourbaix ya elaborada a 25°C, encontrada en bibliografía se muestra a continuación:

Figura 11.

Condiciones Teóricas de Corrosión, Pasivación e Inmunidad de Aluminio a 25 [°C]



Fuente: Franklin, 1974.

Las Figura 11, representa las condiciones teóricas de corrosión, inmunidad y pasivación del aluminio a 25 [°C], en ausencia de sustancias con las que el aluminio forme complejos solubles o sales insolubles, la figura se refiere a la pasivación por la formación de una capa de bohemita $Al_2O_3 \cdot H_2O$, que suele ser el caso práctico, especialmente cuando el metal se cubre con una capa de óxido anódico (Franklin, 1974). En la práctica, el comportamiento a la corrosión

del aluminio está determinado esencialmente por el comportamiento de la película de óxido con la que casi siempre se cubre hacia los medios corrosivos a considerar. Los casos de mala resistencia a la corrosión a menudo están relacionados con un cambio en esta película de óxido, especialmente en su grado de hidratación y porosidad (Franklin, 1974).

2.10. Antecedentes en Proyectos de Tratamientos de Aguas Residuales por Métodos

Electroquímicos

Tabla 9.

Antecedentes de Proyectos sobre Tratamiento de Aguas Residuales por Métodos Electroquímicos

AUTORES	TIPO DE AGUA RESIDUAL	CONTAMINANTES	RESULTADOS
Ana Janeth Casco Sánchez & Santiago Alberto Jarrín Flores, Facultad de ingeniería, Escuela Politécnica Nacional (2010) Ecuador	Agua residual de la industria textil ``Durango tex-Quito``	DQO, color real, dureza, aceites y grasas	-Celda de electrocoagulación de tipo flujo pistón, 16 ánodos y 16 cátodos -Fe-Fe, permitió una remoción de DQO, color real, aceites y grasas, Ca ²⁺ y Mg ²⁺ , llegando a valores del 90% aproximadamente -Tiempo de residencia 100 [min], 2,38 [V], 18 [A], distancia entre electrodos 5 mm
M.Sc. Edison Gilpavas, Universidad EAFIT, Colombia, 2008	Agua residual provenientes del proceso de teñido en un floricultivo	Cr ³⁺ , DQO, COT y DBO	-Celda de electrocoagulación batch (V=150 ml) 1 ánodo y 1 cátodo -Al-Al permitió una remoción de Cr ³⁺ del 99,76 %, DQO del 60 %, de TOC del 51,23% y un aumento de la biodegradabilidad del 77,22 %. -Tiempo de residencia de 60 [min], voltaje 13 [V], distancia entre electrodos 5 [mm].

AUTORES	TIPO DE AGUA RESIDUAL	CONTAMINANTES	RESULTADOS
Estefanía Patricia Gómez Polanco y Víctor Hugo Martínez Valeriano, Escuela Politécnica (2013), Quito Ecuador	Agua residual de la industria textil PROLAT EX S.A.	DQO, color y detergentes	<ul style="list-style-type: none"> -Celda de electrocoagulación continuo, 20 ánodos y 20 cátodos. -Fe-Al permitió una remoción del 95 % de DQO y valores superiores al 70% de color y detergentes. -Tiempo de residencia 60 [min], intensidad 8 A, voltaje 3.8 [V], caudal 216 [L/h], distancia entre electrodos 0,5 [cm]
Marco Mike Choque Huisa, facultad de ingeniería, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2019, Perú-Arequipa	Industria textil "Textil Arequipa"	DQO	<ul style="list-style-type: none"> -Celda de electrocoagulación continuo, 15 electrodos, 8 ánodos y 7 cátodos -Fe-Fe permitió una remoción de DQO del 54,1 %, -Tiempo de residencia 50 [min], distancia entre electrodos 2 [cm], densidad de corriente 57,2 A/m², intensidad 17,3 A, voltaje 10,4 [V]
Franklin Rómulo Aguilar Mancco & Allison Palomino Cartolin, Facultad de Ingeniería, Universidad César Vallejos, 2018, Lima Perú	Aguas residuales de Curtiembre - Huachipa	Cromo (VI) Y DQO	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de electrocoagulación de flujo continuo. -Al-Fe permitió una remoción del 84.96% para Cromo (VI) y 80.53% para DQO. -Tiempo de residencia 20 [min], distancia entre electrodos 10[mm], intensidad 9[A].

Fuente: Elaboración Propia

Capítulo III 3. Metodología

3.1. Equipos, Materiales y Reactivos

3.1.1. Equipos

En la siguiente tabla se indican los equipos utilizados en el proyecto de grado.

Tabla 10.

Equipos Utilizados

ITEM	MARCA
Reactor electroquímico batch	SM
Reactor electroquímico continuo	SM
Fuente de alimentación (30[V] y 3[A])	Lodestar PS-303TD
Estufa de laboratorio	Memmert SNB-400
Balanza digital	Scout-Pro SP2001
Balanza analítica	Mettler Toledo AB204S
Reactor/calentador	HANNA HI-839800-02
Espectrofotómetro iris	HANNA HI-801
Multímetro	WAVETEK 28XT
pH-metro	HANNA HI-991300
Termocupla (tipo K)	Digi-Sense 91100-00
Medidor pH/Conductividad	Oakton PC-700
Colorímetro	HACH DR/890
Bomba peristáltica (0,03 HP,)	Master Flex L/S 7554-85

Fuente: Elaboración Propia

3.1.2. Materiales

Los materiales de laboratorio que se usaron en el estudio, se presentan a continuación:

Tabla 11.*Materiales de Laboratorio*

MATERIAL	DETALLE	MARCA
Vidrio reloj	Mediano	Sin marca
Espátula	Metálica	Sin marca
Pipetas	2 ml, 5 ml, 10 ml y 20 ml	Pyrex
Matraz aforado	5 ml, 25 ml y 100 ml	LMS NS12/21
Tubos de ensayo		HACH, HANNA
Vaso de precipitado	50 ml, 100 ml, 250 ml, 500 ml y 1000 ml	BOECO, POBEL y MAGOQUIMLAB
Electrodos de aluminio	Chapa aluminio	Aluminios de Bolivia
Kitasato	500 ml y 250 ml	Pyrex No 5340
Cables cocodrilo-banana		Sin marca
Gradilla	Plástica	Sin marca
Gradilla	Metálica	HANNA
Tubos falcon	50 ml	Alpha
Piseta	500 ml	Sin marca

Fuente: Elaboración Propia

3.1.3. Reactivos

Los principales reactivos que se usan en el estudio, se muestran a continuación:

Tabla 12.*Reactivos*

Nombre de los reactivos
Agua destilada
Agua ultrapura
Sulfato de plata
Ácido sulfúrico
Sulfato de mercurio
Dicromato de potasio
Ftalato de hidrógeno de potasio

Fuente: Elaboración propia

3.2. Preparación de las Soluciones Para Análisis de DQ

Se prepara las soluciones para análisis de DQO, por método colorimétrico. Estas soluciones que se prepararon, se obtuvieron antes de obtener la muestra de agua para hallar el DQO, de la muestra de agua. Se prepararon las soluciones en el IIDEPROQ, ya que se contaban con todos los reactivos y equipos para la preparación de estas soluciones. Las soluciones que se prepararon se hicieron con base en el libro ``Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales``.

3.2.1. Solución Digestora

Se añade a unos 50 ml de agua destilada, 1,0216 g de $K_2Cr_2O_7$, de calidad para reactivos estándar primaria, previamente secado a $103\text{ }^{\circ}C$ durante 2 horas, 16,7 ml de H_2SO_4 concentrado y 3,33 g de $HgSO_4$. Se disuelve y enfría a temperatura ambiente y diluí hasta 100 ml.

3.2.2. Solución de Ácido Sulfúrico

Se añade Ag_2SO_4 , de calidad para reactivos o técnica, en cristales o en polvo, a H_2SO_4 concentrado en la proporción de 5,5 g de Ag_2SO_4 /kg de H_2SO_4 . Y dejar reposar de 1 a 2 días para disolver Ag_2SO_4 .

En ese entendido ($\rho=1,84 \text{ kg/l}$ del de H_2SO_4) se usó 100 ml de H_2SO_4 (0,184 kg H_2SO_4) con 1,012 gr de Ag_2SO_4 .

3.2.3. Solución Ftalato

Se tritura ligeramente y luego se seca el ftalato de hidrógeno de potasio ($\text{HOOC}_6\text{H}_4\text{COOK}$) a peso constante a 120°C . Se disolvió 42,5 mg en agua destilada y se diluyó hasta 100 ml.

El FHP tiene un ROQ1 teórico de 1,176 mg O_2 /mg y esta solución tiene un ROQ teórico de $500 \mu\text{g O}_2/\text{ml}$. Es estable hasta 3 meses cuando se congela en ausencia de crecimiento biológico visible.

Se muestra lo anterior en la siguiente fotografía:

Fotografía 1.

Soluciones para DQO



Fuente: Elaboración Propia

3.3. Toma de Muestra en el Reactor Batch

El procedimiento de muestreo de las aguas de la industria textil se realizó con base en la Norma Boliviana NB 64002 (muestreo de efluentes industriales), para el almacenamiento y transporte de la muestra NTC-ISO 5667/3 (Calidad del agua Muestreo), con una previa programación de horarios y días de visita, horarios y días que se coordinó con los encargados.

Se toma la muestra del punto final de las descargas de aguas residuales de origen industrial, se emplea un recipiente de boca ancha de plástico, de capacidad 2 litros y un palo de 1,4 metros, en el que la jarra estaba acoplada, se realizó esto para poder alcanzar todos los puntos de muestreo.

Se toma de puntos distintos del punto final de las descargas de aguas residuales con el recipiente de plástico de 2 litros que estaba sujeto a un palo de madera de 1,4 metros (se tomó 1 litro por cada toma) y se pone en 6 recipientes de plástico de capacidad de 5 litros, es decir, cada uno de los 6 puntos de toma tenía su recipiente plástico de 5 litros, los cuales se iban llenando de un litro en un litro. Como se puede entender, se tomó 5 veces de cada punto.

Luego se procede a sacar 1 litro de cada recipiente de 5 litros, con previo agitado, para ir llenando el recipiente plástico de 15 litros.

Una vez se obtiene la muestra compuesta se etiqueta poniendo la siguiente información: nombre de la empresa, ubicación, fecha y hora de recolección, tipo de muestra y especificar ensayo a realizar (físicoquímico, microbiológico, etc).

Fotografía 2.

Proceso de Muestreo para el Reactor Batch



Fuente: Elaboración Propia

Y luego se procede a transportar la muestra al lugar de trabajo, en mi caso el IIDEPROQ, donde se refrigera inmediatamente.

3.4. Validación de las Soluciones Preparadas para DQO

Se procede a validar las soluciones de digestión, de ácido sulfúrico y la de ftalato, es decir, se verifica que los valores de DQO, que dieron las soluciones preparadas por mi persona estén dentro del rango adecuado. Esta validación se realiza tomando como base la preparación de los viales con las soluciones como se ve en la tabla 42, en el Anexo A, pero se redujo las cantidades ya que se observó que los tubos HACH y HANNA con solución preparada, tenían menos volumen, también al reducir el volumen de soluciones preparadas, se redujo el costo la caracterización del agua residual, en la siguiente tabla se muestra los volúmenes usados que se muestra la procedencia de estos en el Anexo A.

Cada una de las soluciones se preparó con base en el libro Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, cabe mencionar que se realizó por el método colorimétrico.

Tabla 13.*Cantidades de Muestra y Reactivos Usados*

Vaso de digestión Tubos de cultivo:	Muestra (ml)	Solución de digestión (ml)	Reactivo de ácido sulfúrico (ml)	Volumen total final (ml)
16 x 100 mm	2	1,2	2,8	6

Fuente: Elaboración Propia

Toda esta validación de mis soluciones se realizó con el encargado del análisis de aguas, del IIDEPROQ y con la presencia de mi tutor.

3.4.1. Validación de las Soluciones en HACH

Se realiza la validación de mi solución con los viales de HACH comprados, en el equipo de HACH.

3.4.2. Validación de las Soluciones en Hanna

También se realiza con otra muestra de agua residual de la industria textil, con la que se trabajará, esta muestra se la validó comparando con los viales de HANNA comprados, en el equipo de HANNA.

3.4.3. Validación de las Soluciones con Solución Patrón del IIDEPROQ

Se analiza una muestra patrón del IIDEPROQ, que tiene 300 mg/l de DQO, se comparó los valores de DQO en los viales preparados por mí, en los equipos de HANNA y HACH.

3.5. Caracterización de la Muestra de Agua

Se procede a caracterizar el agua, los parámetros a determinar serán DQO, pH y temperatura. Una vez ya caracterizado, se pudieron realizar los ensayos, para ver la eficacia de estos.

3.6. Parámetros a Tratar con el Reactor Electroquímico

Son los siguientes:

- DQO
- pH
- Temperatura

Nos **concentramos en el DQO**, para **evaluar la eficiencia del proceso electroquímico**.

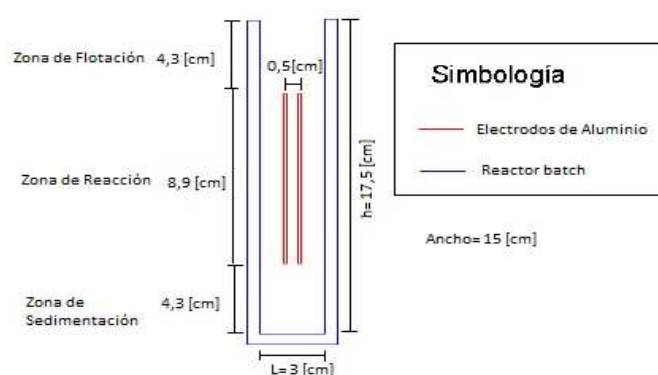
3.7. Determinación de Parámetros Previos en el Reactor Batch

Se halla algunos parámetros, previo a pasar al diseño del reactor electroquímico continuo, para tener una base, para un mejor diseño del reactor, los parámetros fueron:

- Voltaje
- Tiempo de residencia

3.7.1. Armado del Reactor Electroquímico Batch

Se arma un reactor electroquímico batch previo a pasar al diseño del reactor electroquímico continuo. Se armó una celda del reactor electroquímico continuo, es decir, el reactor electroquímico continuo tiene varias celdas.

Figura 12.**Características del Reactor Batch**

Fuente: Elaboración Propia

Se construye el sistema mostrado. Se tenían pequeños separadores para la parte inferior interna del reactor batch. Y en la parte superior de igual forma unos separadores, que tenían una distancia de 0,5 [cm]. El material que se usó es acrílico transparente de 3 mm de espesor. Se procedió a armar el reactor electroquímico batch, las perforaciones para separar los electrodos 0,5 [cm], se realizaron en un taller que contaban con equipos para realizar esos cortes de espesor menor a 1 [mm].

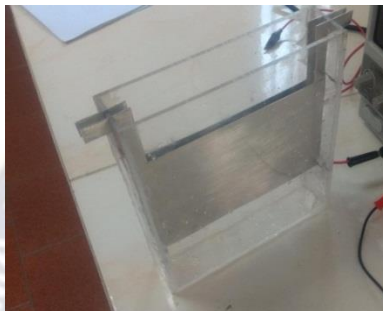
Fotografía 3.**Piezas del Reactor Electroquímico Batch y Cortes en el Reactor Electroquímico Batch**

Fuente: Elaboración Propia

Con base en lo anterior y tomando en cuenta la altura de la zona de reacción, el electrodo tiene una $h= 8,9$ [cm], un ancho de $14,8$ [cm] y $0,5$ [mm] de espesor, que son las dimensiones para que estén en contacto con el agua residual.

Fotografía 4.

Reactor Batch Armado



Fuente: Elaboración Propia

El aluminio, para los electrodos se los consiguió de ``Aluminios de Bolivia'', en el proyecto de grado de Clara Jhakelyn Compara Calle, Facultad de ingeniería, UMSA (2020), La Paz-Bolivia, que se analizó que la pureza de dicho electrodo es del 99%. Esta parte se especifica en el Anexo B.

Se termina de armar una vez ya se tienen las piezas con la separación de $0,5$ [cm] para los electrodos, respetando las zonas de sedimentación, de reacción y de flotación

Cabe recordar que el reactor electroquímico batch tiene separadores tanto en la parte superior como en la inferior, con el propósito de respetar estrictamente la distancia de $0,5$ [cm], como se mencionaba. Se usa dicho diseño de celda, ya que se la toma como una celda del reactor electroquímico continuo.

3.7.2. Ensayo en el Reactor Electroquímico Batch

Se observa en anteriores trabajos que los voltajes varían desde $2,38$ [V] hasta 15 [V], variando el tiempo de residencia desde 20 [min], hasta 100 [min], estos datos sólo son algunos de

los muchos proyectos que coinciden con estos valores de voltaje y tiempo de residencia en esos rangos, se observa que para distintas de la industria textil varían los valores de voltaje y tiempo de residencia, pero están dentro de estos rangos de tiempo de residencia y voltaje, es por ello que se decidió tomar en este proyecto valores de 4 [V], 9 [V] y 14 [V] con tiempos de residencia de 30 [min], 60 [min] y 90 [min], que están dentro de estos rangos.

Respecto a la distancia entre electrodos se observa que en todos los proyectos se da mayor remoción del DQO a la distancia de 0,5 [cm], ya que, la remoción de los contaminantes es mayor, a distancias cortas de separación entre electrodos. Entonces:

Se realiza la conexión de los electrodos, comprobando que la fuente de alimentación nos dé el voltaje que indica con el multímetro y lijando previamente los electrodos y cabezas de los cables.

Se arma el reactor batch, se llena el reactor batch del agua a tratar y se procede a conectar la fuente de alimentación con los electrodos

Se utiliza separación de electrodos de 0,5 [cm], con ambos electrodos de aluminio, como se mencionó. Entonces se fue variando los voltajes (4 [V], 9 [V] y 14 [V]), conjuntamente con el tiempo de residencia (30 [min], 60 [min] y 90 [min]).

Para cada par de estos datos se registra la remoción de DQO, pH y Temperatura, se registra los valores iniciales y finales de los parámetros mencionados.

Se guarda una muestra de cada ensayo en tubos falcon de 50 ml y se etiqueta, los cuales se deben mantener refrigerados.

Fotografía 5.

Ensayo en Reactor Electroquímico Batch



Fuente: Elaboración Propia

Una vez se obtiene el voltaje y tiempo de residencia con mejores resultados, se pasa al siguiente punto, que fue diseñar el reactor electroquímico continuo.

3.8. Reactor Electroquímico Continuo

Se diseñó el reactor electroquímico continuo sobre la base del mejor resultado inicial observado, a todos los fenómenos observados en los distintos ensayos, dimensiones que posee la empresa para el tratamiento de aguas residuales y el caudal máximo que tiene la industria de la cual se trató sus aguas residuales. Primeramente, se realizó un análisis de distintas partes del reactor con base en lo mencionado.

3.8.1 Electrodos

Se analizó los electrodos con base en los puntos mencionados:

- Se pudo observar en los ensayos que, al tener el diseño inicial con dos orejas, dificultaba remover las espumas, ya que cada oreja iba sujeta a la pared del reactor, quitando la posibilidad de abrir una parte del reactor para retirar espumas, si bien se podía retirar, esta acción se dificultaba. Con lo mencionado el nuevo diseño de los electrodos posee sólo una oreja del electrodo.

- Se observa en la sujeción del electrodo que tiene una oreja menos, pero se añade un punto de sujeción en la parte superior donde se suprime una oreja del electrodo y los otros dos puntos de sujeción inferiores se aumentaron en el ancho para que tenga mejor agarre, ya que, en los ensayos se tuvo el desprendimiento de uno de los puntos de sujeción, entonces para asegurarnos que no haya dicho problema se aumentará el área que se pegará con el reactor para tener un punto de sujeción más fijo.
- Todo lo demás respecto al electrodo se mantiene, ya que no se observa ningún inconveniente más.

3.8.2. Diseño del Reactor

Se toma las medidas anteriores sobre la base de las condiciones en la empresa, se realizó a escala 17 veces más pequeña (escala 1:17), el cual se vio óptimo inicialmente.

Con base en los datos de la empresa, principalmente el caudal, se diseñan las medidas, caudal y escala. También se tienen medidas que son iguales en el reactor batch y continuo:

Tabla 14.

Medidas Constantes para Reactor Electroquímico Continuo

Medidas	Unidad	Valor
Ancho	[cm]	15
Alto	[cm]	17,5
Zona de sedimentación	[cm]	4,3
Zona de reacción	[cm]	8,9
Zona de flotación	[cm]	4,3
Largo de cada celda	[cm]	3

Fuente: Elaboración Propia

Se toma estos datos constantes para poder obtener resultados más parecidos a los que se obtuvo en el reactor batch, también se tiene un tiempo de residencia de 90 [min], que se usa inicialmente para el diseño, pero que no se mantuvo constante.

$$Q = 22 \text{ m}^3/\text{h} = 366,6667 \text{ l/min}$$

Hallamos el volumen con el tiempo de residencia y caudal:

$$V = Q \cdot Tr = 366,6667 \text{ [l/min]} \cdot 90 \text{ [min]} = 33000 \text{ [l]} = 33 \text{ m}^3$$

Se necesita tratar 33000 litros de agua por cada 90 minutos inicialmente. Para hallar la medida con cada escala se debe multiplicar la medida por la escala, para el número de celdas se halló con base en el volumen, ancho y alto.

$$\text{Ancho} = 0,15[\text{m}] \cdot e \quad ; \quad \text{Alto} = 0,175[\text{m}] \cdot e \quad ; \quad V = \text{Ancho} \cdot \text{Alto} \cdot \text{Largo} \quad ; \quad \text{Largo} = 0,03[\text{m}] \cdot N \cdot e$$

Dónde:

N = Número de celdas

e = escala

Tabla 15.

Medidas según la Escala

Medidas	Escala 1:16	Escala 1:17	Escala 1:18	Escala 1:19	Escala 1:20
Ancho	2,4 [m]	2,55 [m]	2,7 [m]	2,85 [m]	3 [m]
Alto	2,8 [m]	2,975 [m]	3,15 [m]	3,325 [m]	3,5 [m]
N	11	9	8	7	6
Largo	5,28 [m]	4,59 [m]	4,32 [m]	3,99 [m]	3,6 [m]

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que, según lo mencionado, las características vistas en la industria para el tratamiento de aguas residuales, todas se acomodan por las dimensiones. Pero analizando distintos puntos:

- Si tenemos más de 10 celdas se tendrá un largo excesivo para manejar a nivel laboratorio, lo cual podría conllevar a posibles fisuras en el reactor al momento de la manipulación, podría causar inconvenientes a lo largo del proceso y recordemos que este sistema debe ser lo más preciso posible para que dé valores verídicos.
- Por otro lado, si el reactor es demasiado pequeño, no podremos ver todos los fenómenos que van desarrollándose a lo largo del proceso. Por ejemplo, de forma visual, se podría visualizar con más celdas, mayores tonalidades de colores, cada vez más transparente, pero debido a lo mencionado no conviene un reactor largo para manipular en laboratorio, tampoco uno menos largo, ya que no se podrá observar las distintas tonalidades de colores y evolución del proceso en cuanto a los lodos.
- También tomando en cuenta que, a mayor número de celdas, el agua tratada saldrá con menos lodos, ya que, a medida que el agua residual va avanzando, dejará atrás mayor cantidad de sedimentos y espumas.
- Si se tiene mayor número de celdas se podrá tomar muestra de más celdas, para ver el comportamiento del reactor continuo.

Para esta escala inicial se realizó un análisis más profundo:

Con la escala 1:17, para obtener las medidas finales del reactor se obtendrán de más cálculos. En el reactor se tiene distintas piezas de acrílico que ocupa un volumen, la cual, no se debe en tomar como parte del volumen requerido.

$$V_{\text{r}} = \frac{33000000 \text{ ml}}{17^3} = 6716,874 \text{ ml}$$

Se halla el volumen que se debe tratar en el reactor continuo escala laboratorio, pero es el volumen de agua, no incluye a las piezas acrílicas y electrodos dentro del reactor, con ese entendido, se realiza los cálculos para el diseño final del reactor electroquímico continuo.

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{r}} = V_{\text{c}} - V_{\text{e}} + V_{\text{es}} + V_{\text{des}} - V_{\text{ps}}$$

Dónde:

V_{c} : Volumen de las 9 celdas

V_{e} : Volumen de los electrodos

V_{es} : Volumen de los espacios entre los divisores de las celdas

V_{des} : Volumen que no ocupan los divisores superiores

V_{ps} : Volumen de los puntos de sujeción

x : espacio entre celdas, para paso de agua

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 13,2 * 15 * 3 * 9 - 8,9 * 14,8 * 0,05 * 2 * 9 + x * 13,2 * 15 * 9 + 0,3 * 4,1 * 15 * 9 - 2 * 2,6 * 0,5 * 27 = 6716,874 \text{ ml}$$

$$x = 0,8 \text{ [cm]}$$

Como se puede observar se halló para la escala 1:17 el espacio por el que debe pasar el agua residual, se realiza una tabla mostrando este espacio para las demás escalas:

Tabla 16.*Espacio para Paso de Agua según Número de Celda*

Escala	Número de celdas	V _{H2O} [ml]	x [cm]
1:16	11	8056,6406	0,7
1:17	9	6716,8740	0,8
1:18	8	5658,4362	0,6
1:19	7	4811,1970	0,5
1:20	6	4125	0,5

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que con 9 celdas se tiene un espaciado para el paso del agua, que se considera mejor, ya que los demás son demasiados bajos.

Hallamos las dimensiones del reactor electroquímico continuo, con base en lo anterior, continuando con un número de celdas de 9. Con los siguientes datos para la longitud:

N: Número de celda (9 celdas)

x: Espaciado entre celdas, para paso de agua (0,8 [cm])

e: espesor de los separadores (0,3 [cm])

l: Largo de cada celda (3 [cm])

n: Número de espaciadores (16)

m: Número de espacios entre celdas (8)

Ex: Espacio extra donde se irá acumulando agua, antes de que salga del reactor

$$L = l * N + e * n + x * m + Ex$$

$$Ex = x + 2 * e + l \text{ [cm]}$$

$$L = l * N + e * n + x * m + x + 2 * e + l \text{ [cm]}$$

$$L= 40,6 \text{ [cm]}$$

Se añadió ``Ex'' con la intención de que, en esta última parte de acumulación de agua tratada, quede con menor cantidad de cualquier sólido y/o espuma, ya que, conforme se va pasando de celda en celda, se ve la reducción de espuma y sólidos.

3.8.3. Celda Electroquímica

Se analizará la celda con base en los puntos mencionados y vistos:

- Como se menciona la celda del reactor batch, era una celda del reactor continuo, en ese entendido el ancho, la altura y las zonas de sedimentación, de reacción y de flotación se mantuvieron.
- Se observa durante los ensayos, la acumulación de espuma y retirar la misma era incómodo y dificultoso por la forma del reactor, por ello se procedió a realizar una abertura en el lado en el que se quitó una oreja, en la zona de flotación, sólo que se dejó 0,5[cm], por seguridad de rebalse.
- Se añade al lateral con abertura, un contenedor inclinado para espumas, para que la espuma que sale por la abertura sea recogida por este contenedor inclinado, se diseñó para que cubra la zona lateral con abertura y así la espuma no caiga el medio externo, entonces debería tener una altura constante, para ello se observó que se forma un triángulo-rectángulo para cubrir el paso de la espuma al medio externo. Se quería que el largo horizontal del contenedor inclinado sea de 41,6 [cm], ya que el largo del reactor es 40,6[cm], es decir, sobresaldrá 1 [cm], para que la espuma caiga en un contenedor fijo. Las demás medidas se las halló aplicando el Teorema de Pitágoras y a esto se le sumo una altura para alcanzar la

altura del reactor, de esta forma me aseguré que la espuma no pueda escapar al medio externo.

- Se conecta en la parte inferior de la entrada de agua residual una manguera de 4 mm de diámetro para conectar con la bomba peristáltica, se observó mediante pruebas realizadas que, al conectar con este tubo, los valores de caudal, eran los que se necesitaban.
- Se conecta en la parte superior de la salida de agua residual una manguera de 8 mm de espesor, 1,5 [cm], por debajo del nivel de aguas de las demás celdas, para que el nivel del agua en la última celda de despacho de agua tratada, este 1,5 [cm] por debajo de la última celda electroquímica y la espuma no pase a la celda de despacho de agua tratada, ya que, había un separador entre celdas de igual forma entre celdas, de esta forma sólo paso el agua tratada y no la espuma.
- Se pone paredes de acrílicos para separar cada celda, entre cada celda se pusieron dos paredes una superior y otra inferior, para que el agua residual siga una trayectoria completa.
- Se agrega un techo al reactor para que las condiciones externas no afecten al reactor y en el techo se tenía orificios de 4 [mm] de espesor y poner un tubo de ese diámetro para sacar muestra de agua de la celda que se desee a través de los tubos, esto para no tener que meter ningún material para sacar muestra de agua, ya que, ese procedimiento podría mezclar los depósitos en la zona de floculación, zona de sedimentación con la zona de reacción y tener valores de DQO no muy precisos.

- Se mantiene 2 electrodos de aluminio por celda, ya que, los ensayos realizados se realizaron de esa forma y para pasar a un reactor electroquímico continuo, debe tener como base, los datos del reactor batch, en sus condiciones, para mejores resultados.
- Como nos basamos en los resultados del reactor electroquímico batch, tomamos muchas medidas similares o iguales a este, para el reactor continuo.

Fotografía 6.

Piezas del Reactor Electroquímico Continuo y Electroodos



Fuente: Elaboración Propia

3.8.4. Construcción del Reactor Electroquímico Continuo

Se procede a construir el reactor continuo, con mucha precisión, para que los puntos que se tomaron en cuenta para este funcionen. Se inicia pegando los puntos de sujeción inferiores de tal forma que estén alineados con los puntos de sujeciones superiores y que estén a una altura adecuada para que el electrodo se encuentre justo en la zona de reacción. Se observa que se realizaron líneas, para poder obtener mayor precisión al pegar las piezas, dichas líneas se realizaron, midiendo de tal forma que el electrodo se encuentre justo en la zona de reacción. Luego se procede a realizar de la misma forma la otra pared, también cuidando que el electrodo se encuentre en la zona de reacción, esta pared es más baja, ya que, por acá caerá la espuma.

Se procede a pegar minuciosamente cada pieza, de tal forma quede como se diseñó.

Fotografía 7.

Armado del Reactor Electroquímico Continuo



Fuente:Elaboración Propia

Se observa que el reactor, está sujeto a modificaciones de caudal, por ello la escala también se puede modificar, el reactor se diseñó de tal forma que, al variar el caudal, variará la escala también como se muestra en el ANEXO I.

3.8.5. Muestreo de Agua Residual para el Reactor Electroquímico Continuo

El procedimiento de muestreo de las aguas de la industria textil se realizó con base en la Norma Boliviana NB 64002 (muestreo de efluentes industriales), para el almacenamiento y transporte de la muestra NTC-ISO 5667/3 (Calidad del agua Muestreo), con una previa programación de horarios y días de visita, horarios y días que se coordinó con los encargados.

Se tomó la muestra del punto final de las descargas de aguas residuales de origen industrial, se empleó un recipiente de boca ancha de plástico, de capacidad 2 litros y un palo de 1,4 metros, en el que la jarra estaba acoplada, se realizó esto para poder alcanzar distintos puntos de muestreo.

Se toma de puntos distintos del punto final de las descargas de aguas residuales con el recipiente de plástico de 2 litros que estaba sujeto a un palo de madera de 1,4 metros (se tomaba 1 litro por cada toma) y se pone en 6 recipientes de plástico de capacidad de 5 litros, es decir, cada uno de los 6 puntos de toma tiene su recipiente plástico de 5 litros, los cuales se van llenando de un litro en un litro. Como se puede entender, se toma 5 veces de cada punto. Luego se procede a sacar 1 litro de cada recipiente de 5 litros, con previo agitado, para ir llenando los recipientes plásticos

de 25 litros y 30 litros. Una vez se obtiene la muestra compuesta se etiqueta poniendo la siguiente información: nombre de la empresa, ubicación, fecha y hora de recolección, tipo de muestra y especificar ensayo a realizar (físicoquímico, microbiológico, etc).

Fotografía 8.

Muestreo para el Reactor Electroquímico Continuo



Fuente: Elaboración propia

Y luego se procede a transportar la muestra al lugar de trabajo, en mi caso el IIDEPROQ, donde se refrigera inmediatamente.

3.8.6. Parámetros a Revisar

- Tiempo de residencia
- Voltaje
- Caudal de alimentación

3.8.7. Ensayos en el Reactor Electroquímico Continuo

Los ensayos se realizan con el agua residual de la industria textil con una decantación y filtración previa. Luego:

Con el reactor electroquímico continuo, se procede a hacer las conexiones de los electrodos con la fuente de alimentación. Se realiza una conexión monopolar en paralelo.

Se halla el caudal inicial en la bomba peristáltica de la forma hallada en el ANEXO C.

Se alimenta al reactor con el caudal inicial determinado en el ANEXO D y se procede a alimentar al reactor con el voltaje hallado en el reactor batch.

Se arranca el reactor electroquímico continuo. Una vez terminado el ensayo con los parámetros hallados. La muestra a la salida se guarda en un tubo falcon de 50 ml.

Se caracteriza el agua tratada y el agua que entra al reactor electroquímico continuo, para ver si obtuvimos una buena remoción de DQO.

Fotografía 9.

Ensayo en el Reactor Electroquímico Continuo



Fuente: Elaboración Propia

3.9. Nuevos Ensayo en el Reactor Batch

Se realiza nuevos ensayos en el reactor batch, ya que, no se obtuvo una remoción de DQO por debajo del límite permisible, ya que, si hacíamos en el reactor continuo los ensayos, posiblemente nos quedaríamos sin muestra de agua residual, con pocos ensayos. Con base en los mejores resultados en estos ensayos, se realizaron dos ensayos en el reactor continuo

Se realiza la conexión de los electrodos, comprobando que la fuente de alimentación nos dé el voltaje que indica con el multítester y lijando previamente los electrodos y cabezas de los cables.

Se llena el reactor batch del agua a tratar y se procede a conectar la fuente de alimentación con los electrodos.

Se utiliza separación de electrodos de 0,5 [cm], con ambos electrodos de aluminio, como se mencionó.

Se procede a variar los tiempos de residencia con el mismo voltaje, se hizo con 90 [min], 105 [min], 120 [min], 135 [min] y 150 [min].

Se guarda una muestra de cada ensayo en tubos falcon de 50 ml y se etiqueta, los cuales se mantenían refrigerados.

Se proceda a determinar el DQO, para ver en cuál se tuvo un valor de DQO, por debajo del límite permisible.

3.10. Ensayos para una Mayor Remoción de DQO en el Reactor Electroquímico Continuo

Los ensayos se realizan con el agua residual de la industria textil con una decantación y filtración previa. Con el reactor electroquímico continuo, se procede a hacer las conexiones de los electrodos con la fuente de alimentación. Se realiza una conexión monopolar en paralelo. Se halla el caudal para los tiempos de residencia (135 [min] y 150 [min]) en la bomba peristáltica de la forma hallada en el ANEXO C. Se alimenta al reactor con los caudales determinados en el ANEXO C y se procede a alimentar al reactor con 14 [V]. Se arranca el reactor electroquímico continuo. Las muestras a la salida se guardaron en un tubo falcon de 50 ml. Se caracteriza el agua tratada y el agua que entró al reactor electroquímico continuo, para ver si obtiene una buena remoción de DQO.

3.11. Ensayo Final en el Reactor Electroquímico Continuo

Con el reactor electroquímico continuo, se procede a hacer las conexiones de los electrodos con la fuente de alimentación. Se realiza una conexión monopolar en paralelo. Se procede a alimentar al reactor con 14 [V] y un caudal de 0,045 (l/min). Se arranca el reactor

electroquímico continuo, se saca una muestra de agua residual de cada celda, una vez alcanzado en el estado estacionario.

Fotografía 10.

Ensayo en el Reactor Electroquímico Continuo



Fuente: Elaboración Propia

Se filtra las muestras obtenidas del reactor electroquímico continuo. Se procede a caracterizar la muestra de agua tratada y reflejar los valores obtenidos en los resultados finales. Con los resultados finales del DQO, se halla el orden de la cinética del reactor electroquímico continuo.

Capítulo IV 4. Resultados

4.1. Resultados de la Validación de las Soluciones Preparadas para DQO

4.1.1. Validación de las Soluciones en HACH

Se observó los siguientes resultados al validar mi solución con los viales de HACH comprados, en el equipo de HACH como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 17.

Resultados Comparando los Viales Preparados de HACH con mis Viales para una Muestra de Agua

Método	DQO (mgO₂/l)
Blanco HACH	0
Blanco (preparado)	0
HACH muestra agua (residual)	348
Muestra 1 de agua residual (preparado)	298
Muestra 2 de agua residual (preparado)	328

Fuente: Elaboración Propia

Se observó que la variación de HACH con mis resultados varía muy levemente.

Fotografía 11.

Comprobando Valores de DQO en HACH



Fuente: Elaboración Propia

4.1.2. Validación de las Soluciones en HANNA

También se realizó con otra muestra de agua residual de la industria textil, con la que se trabajará, esta muestra se la validó comparando con los viales de HANNA ya preparados, en el equipo de HANNA, se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 18.

Resultados Comparando los Viales Preparados de HANNA con mis Viales para una Muestra de Agua

Método	DQO (mgO ₂ /l)
Blanco HANNA	0
Blanco (preparado)	0
HANNA muestra de agua residual	511
Muestra 1 de agua residual (preparado)	515
Muestra 2 de agua residual (preparado)	487

Fuente: Elaboración Propia

Se observó nuevamente que, con HANNA, también tiene una variación leve, que nos da un valor aceptable.

Fotografía 12.

Comprobando Valores de DQO en HANNA



Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Validación de las Soluciones con Solución Patrón DEL IIDEPROQ

Se analizó una muestra patrón del IIDEPROQ, que tiene 300 mg/l de DQO, se comparó los valores de DQO en los viales preparados por mí, en los equipos de HANNA y HACH, se refleja los resultados en la siguiente tabla:

Tabla 19.

Comparación de Valores de DQO, para una Misma Muestra

EQUIPO DE:	DQO (mg/l)
HACH	240
HANNA	348

Fuente: Elaboración Propia

Fotografía 13.

Valores de DQO del Patrón del IIDEPROQ



Fuente: Elaboración propia

Se observó valores distintos en ambos equipos respecto al valor de 300 de DQO, esto se debe a que el patrón podría haber sufrido variación, ya que, este tiene muchos años de uso.

4.1.4. Resultados de las Validaciones para Elección de Equipo

Se observó que, tanto en HACH, como en HANNA, se obtuvo buenos resultados, sin embargo, en HANNA se observó mayor precisión en los resultados para DQO.

Se observó, que cuando se analizó la comparación con el patrón, que salió en ambos casos valores cercanos a 300, el cual se da mayor credibilidad a HANNA, ya que, dio un valor más cercano al patrón que en HACH, también, la muestra patrón de 300 mg/l de DQO está en su recipiente muchos años y debido a la toma de muestra y a la manipulación de este podría haber subido el DQO y en la empresa del cual se toma la muestra para el tratamiento del agua residual, manejan el equipo HANNA y sus reactivos. También porque el equipo HANNA es nuevo, por estas razones se trabajará con valores de HANNA y se observa que tiene un comportamiento controlable para hallar el DQO de forma correcta, dándonos valores muy aceptables de DQO.

4.2. Caracterización de la Muestra de Agua

Se procedió a caracterizar el agua, los parámetros que se determinó fueron DQO, pH y temperatura. Dicha caracterización la realizó mi persona, en este entendido se tiene los siguientes valores:

Tabla 20.

Parámetros Fisicoquímicos del Agua Previo al Tratamiento

PARÁMETROS	VALOR (ANTES DEL TRATAMIENTO)	LÍMITE PERMISIBLE
DQO	501	250
pH	7,05	6 a 9
Temperatura [°C]	19,3	± 5°C del cuerpo receptor

Fuente: Elaboración Propia

Una vez ya caracterizado, se podrán realizar los ensayos, para ver la eficacia.

4.3. Resultados de los Ensayos en el Reactor Electroquímico Batch

Se realizó los 9 ensayos, con el procedimiento mencionado en 3.7.2 y se obtuvieron los siguientes resultados de remoción de DQO:

Tabla 21.*Resultados de Remoción de DQO de los Ensayos Preliminares*

N° de tratamiento	Voltaje (voltios)	Tiempo (minutos)	DQO mg/l (inicial)	DQO mg/l (Replica 1)	DQO mg/l (Replica 2)
1	4	30	501	141	161
2	9	30	501	76	113
3	14	30	501	78	46
4	4	60	501	67	102
5	9	60	501	96	63
6	14	60	501	65	52
7	4	90	501	200	226
8	9	90	501	146	104
9	14	90	501	20	41

Fuente: Elaboración Propia

Se halló el DQO, con los equipos de HANNA y con viales preparados previamente, se preparaban los reactivos en los viales y se añadía la muestra de agua, luego estos se tapaban bien y se agitaban, posterior a esto se procedía a poner en el digestor de HANNA, que debía estar a 150°C durante 2 horas, luego se sacaban los viales y se dejaban enfriar a temperatura ambiente. En el espectrofotómetro se configuraba para hallar DQO, y se procedía a poner los viales, primero se leía el blanco y luego los demás viales.

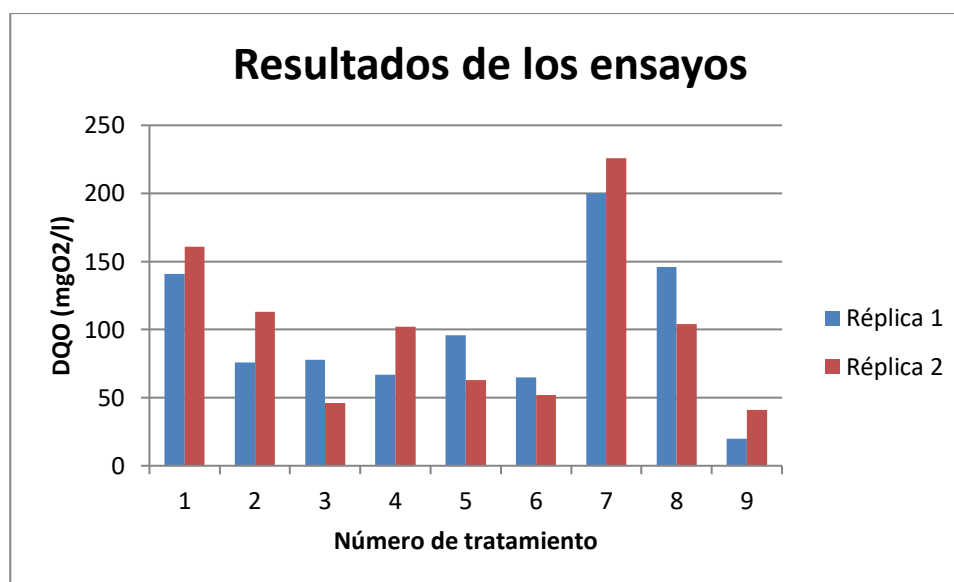
Fotografía 14.*Hallando DQO*

Fuente:Elaboración Propia

Se observa en el siguiente gráfico los resultados de los ensayos iniciales en el reactor batch:

Gráfico 1.

Resultados de Ensayos en el Reactor Batch



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 22.

Nuevas Réplicas de los Mejores Resultados de Remoción de DQO de los Ensayos Preliminares

N° de tratamiento	Voltaje (voltios)	Tiempo (minutos)	DQO mg/l (inicial)	DQO mg/l (resultado)	DQO mg/l (% de remoción)
3	14	30	501	74	84,8
4	4	60	501	85	82,5
5	9	60	501	83	83,0
6	14	60	501	67	86,2
9	14	90	501	48	90,1

Fuente: Elaboración Propia

También se realizó el seguimiento de pH y temperatura, los cuales se observan en las siguientes dos tablas:

Tabla 23.

Variación de Temperatura y pH de Ensayos Preliminares

Nº de tratamiento	Voltaje (voltios)	Tiempo (min)	T inicial (°C)	T final (°C)	ΔT (°C)	pH inicial	pH final	ΔpH
1	4	30	18	19,0	1	7,08	9,21	2,16
2	9	30	19,6	22,1	2,5	7,08	10,13	3,08
3	14	30	17,2	23,8	6,6	7,08	9,23	2,18
4	4	60	18,1	18,7	0,6	7,08	9,29	2,24
5	9	60	17,3	23,4	6,1	7,08	8,18	1,13
6	14	60	16,7	26,8	10,1	7,08	8,26	1,21
7	4	90	18,1	20,9	2,8	7,08	10,39	3,34
8	9	90	18,1	24,1	6	7,08	9,53	2,48
9	14	90	17,5	29,7	12,2	7,08	9,95	2,9

Fuente: Elaboración Propia

Los mejores resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 24.

Mejor Resultado de los Ensayos

PARÁMETROS	ANTES DEL TRATAMIENTO	DESPUES DEL TRATAMIENTO	LÍMITE PERMISIBLE
DQO	501	36	250
pH	7,08	9,95	6 a 9
Temperatura [°C]	17,5	29,7	± 5°C del cuerpo receptor

Fuente: Elaboración Propia

Se observó en el mejor de los resultados de remoción de DQO, el consumo del aluminio que cumplió con la ley de Faraday, se observa en la siguiente tabla el consumo de aluminio en el ánodo de forma práctica, comparando con el consumo que se halló con la fórmula de la ley de Faraday:

Tabla 25.

Comparación del Consumo de Aluminio en el Ánodo Práctico y Teórico

Consumo de aluminio según:	Peso del ánodo inicial (gramos)	Peso del ánodo final (gramos)	Peso consumido (gramos)
En la Práctica	18,3987	17,9345	0,4642
Ley de Faraday	18,3987	17,9256	0,4731
	Diferencia de pesos (gramos)		0,0089

Fuente: Elaboración Propia

Se observó que la diferencia entre ambos pesos hallados de forma práctica y teórica varían muy insignificadamente, por lo que se ve que con este ensayo a las condiciones dadas (14 voltios y 90 minutos), se respeta la Ley de Faraday.

4.4. Ensayos en el Reactor Electroquímico Continuo

Se realizó una decantación y filtración de la muestra previa a tratar el DQO, de esta forma se obtuvo:

Tabla 26.

Resultado de la Decantación y Filtración Previa

Procedimiento	DQO (mgO₂/l)
Agua Residual	1278
Agua Residual decantada y filtrada	1000

Fuente: Elaboración Propia

Se realizó el ensayo con los parámetros óptimos hallados en el reactor electroquímico, con el caudal con base en el volumen del reactor y tiempo de residencia mostrado en Anexo D.:

Tabla 27.

Resultado con los Parámetros Óptimos Hallados

Caudal (L/min)	Voltaje (voltios)	Tiempo de residencia (minutos)	DQO mg/l (inicial)	DQO mg/l (Tr=90 minutos)	DQO mg/l (Tr=105 minutos)	DQO mg/l (Tr=115 minutos)
0,075	14	90	1278	455	425	420

Fuente: Elaboración Propia

Se observó que, con este tiempo de residencia, no se obtuvo un DQO, por debajo del límite permisible, por ello se realizó más ensayos, en el reactor batch, para con esta agua residual más contaminada, hallar un DQO por debajo del límite permisible.

Tabla 28.

Resultado de pH y Temperatura

	Temperatura (°C)	pH
Inicial	18,1	8,55
Final	19,0	10,11

Fuente: Elaboración Propia

4.5. Resultados de Nuevos Ensayos en el Reactor Electroquímico Batch

Se observó que los mejores resultados fueron con 14 [V] y 90 [min], pero no fueron suficientes, con el límite crítico en contaminación de la empresa, por ello se aumentó el tiempo de residencia, se realizó los siguientes ensayos:

Tabla 29.*Resultados para Optimizar Resultados*

N° de tratamiento	Voltaje (voltios)	Tiempo de residencia (minutos)	DQO mg/l (inicial)	DQO mg/l (Replica 1)	DQO mg/l (Replica 2)
1	14	90	1278	405	399
2	14	105	1278	388	394
3	14	120	1278	364	370
4	14	135	1278	346	348
5	14	150	1278	333	329

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 30.*Resultados de pH y Temperatura para Optimizar Resultados*

Tiempo (min)	T inicial (°C)	T final (°C)	ΔT (°C)	pH inicial	pH final	ΔpH
90	18,5	23,1	4,6	8,61	10,16	1,55
105	18,5	24,7	6,2	8,61	10,36	1,75
120	18,5	25,1	6,6	8,61	10,54	1,93
135	18,5	27,3	8,8	8,61	10,48	1,87
150	18,5	27,5	8,4	8,61	10,46	1,85

Fuente: Elaboración Propia

4.6. Resultados de Ensayos para una Mayor Remoción de DQO en el Reactor

Electroquímico Continuo

Se realizó dos ensayos en el reactor electroquímico continuo.

Tabla 31.*Resultados con los Parámetros Optimizados*

N° de tratamiento	Voltaje (voltios)	Tiempo de residencia a (minutos)	DQO mg/l (inicial)	DQO mg/l (Replica 1)	Límite Permissible (mg/l)
1	14	135	1230	268	250
2	14	150	1230	223	250

Fuente: Elaboración Propia

Se observó que con 150 [min] a 14 [V], se tiene el DQO, por debajo del límite permisible.

4.7. Resultados del Ensayo Final del Reactor Electroquímico Continuo

Se procedió a realizar con los parámetros optimizados, el ensayo para hallar nuevamente el DQO, a la salida del reactor electroquímico continuo y también se halló el DQO, en cada celda, se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 32.*Resultados del DQO en Cada Celda y a la Salida del Reactor*

N° de Celda	DQO (mgO ₂ /l) inicial	DQO (mgO ₂ /l) final
1	1250	868
2	1250	745
3	1250	717
4	1250	558
5	1250	493

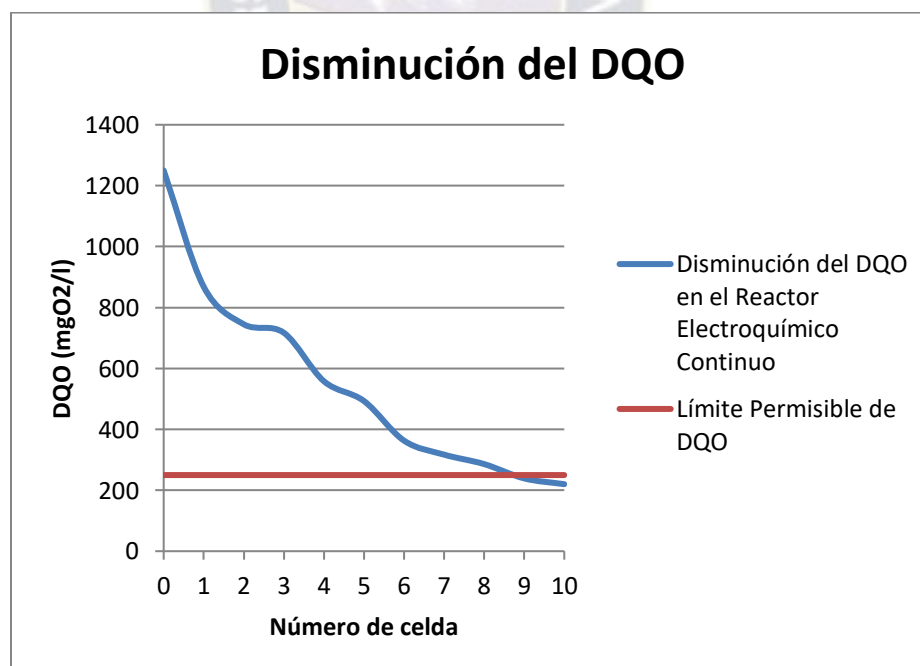
N° de Celda	DQO (mgO ₂ /l) inicial	DQO (mgO ₂ /l) final
6	1250	363
7	1250	317
8	1250	286
9	1250	239
Salida del reactor	1250	220

Fuente: Elaboración Propia

Se observa los siguientes resultados en la siguiente gráfica:

Gráfico 2.

Disminución del DQO en el Reactor Electroquímico Continuo



Fuente: Elaboración Propia

Donde se observa la disminución del DQO en las celdas, hasta que se observa que está por debajo del límite permisible, donde la celda número 10 representa la salida del reactor

electroquímico continuo. Se tiene en la siguiente tabla el resumen de la entrada y salida del reactor electroquímico continuo.

Tabla 33.

Resultado del Reactor Electroquímico Continuo

PARÁMETROS	ANTES DEL TRATAMIENTO	DESPUES DEL TRATAMIENTO
DQO	1250	220
pH	8,55	10,26
Temperatura [°C]	13,5	18,4
DBO	597	217
Turbidez [NTU]	253	2
Conductividad [mS]	3,13	2,51

Fuente: Elaboración Propia

Fotografía 15.

Resultados Finales



Fuente:Elaboración propia

4.7.1. Cinética del Reactor Electroquímico Continuo

Se halló la cinética del reactor electroquímico continuo, a partir de esos datos se determinará la cinética de la reacción empleando el método integral, seguidamente se hallará el orden de la reacción, mediante las siguientes ecuaciones:

Para una reacción de orden cero:

$$C_{A0} - C_A = kt$$

Para una reacción de orden 1:

$$-\ln\left(\frac{C_t}{C_o}\right) = kt$$

Para una reacción de orden 2:

$$\frac{1}{C_t} - \frac{1}{C_o} = kt$$

Tabla 34.

Datos para Hallar Cinética del Reactor Electroquímico Continuo

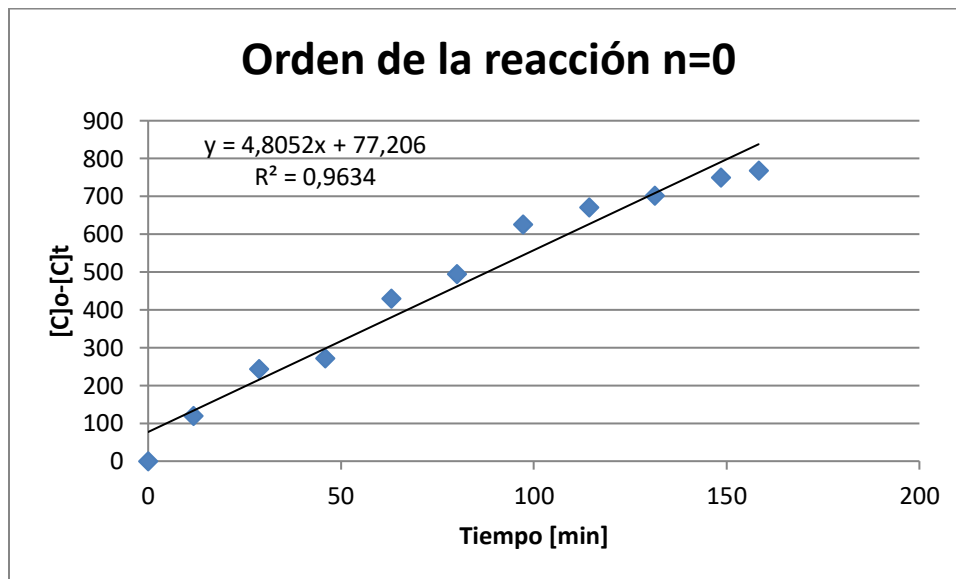
Nº de Celda	Tiempo [min]	DQO [mgO2/l]	n=0 Co-Ct	n=1 -ln(Ct/Co)	n=2 1/Ct - 1/Co
Antes de entrar al reactor	0	988	0	0	0
1	11,7	868	115	0,124148	0,000134
2	28,8	745	217	0,248852	0,000287
3	45,9	717	256	0,300968	0,000357
4	63	558	411	0,540012	0,000727
5	80,1	493	496	0,700279	0,00103
6	97,2	363	628	1,014906	0,001786
7	114,3	317	680	1,17233	0,002263
8	131,4	286	717	1,301655	0,002716
9	148,5	239	746	1,416178	0,003169
Salida del reactor	158,3	220	763	1,489964	0,003489

Fuente: Elaboración Propia

Los gráficos se muestran a continuación:

Gráfico 3.

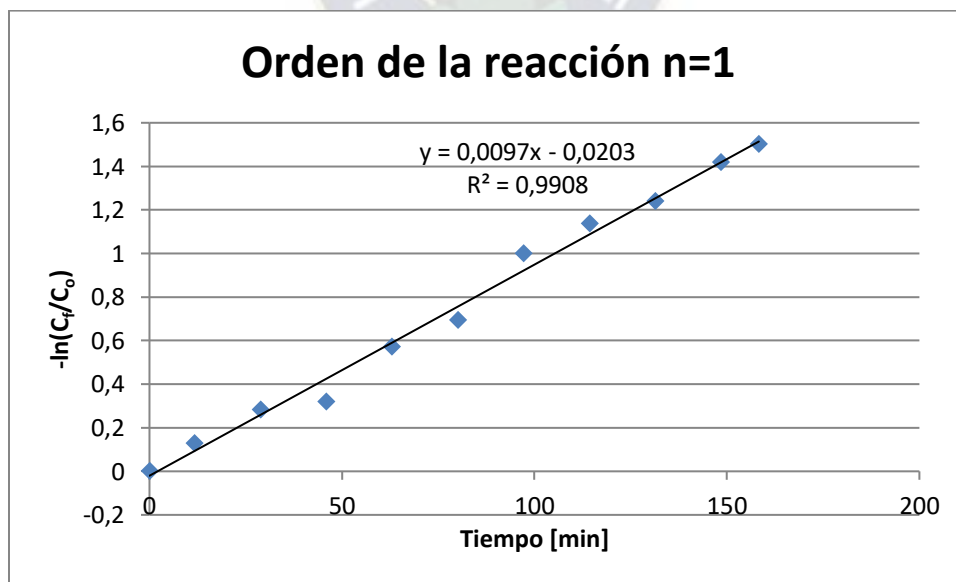
Orden de Reacción ($n=0$)



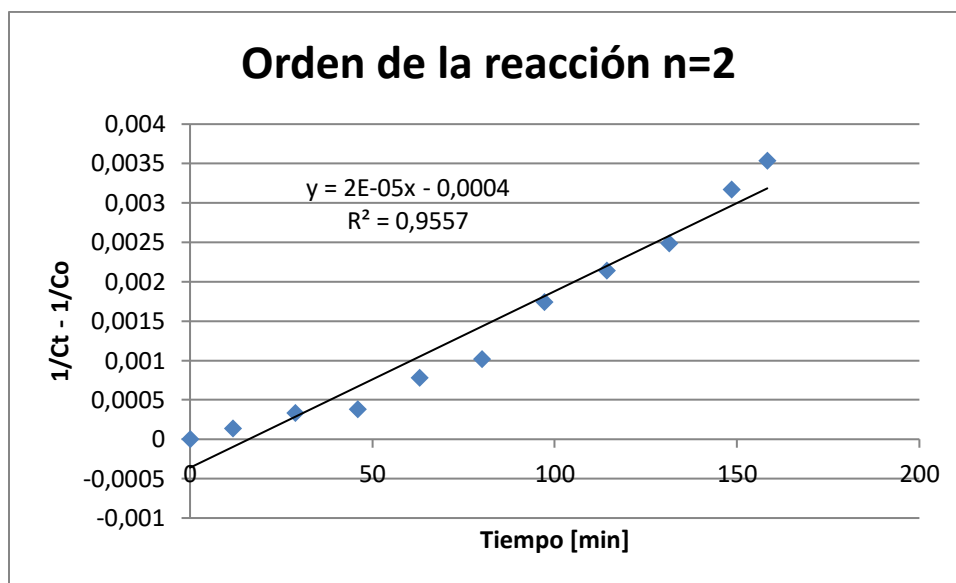
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 4.

Orden de Reacción ($n=1$)



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 5.*Orden de Reacción (n=2)*

Fuente: Elaboración Propia

Observando los gráficos anteriores y considerando el valor más cercano a 1 del R^2 (coeficiente de regresión) se tiene que la reacción es de orden $n= 1$ y con constante de velocidad de reacción, $k= 0,0097 [\text{min}^{-1}]$. El modelo para el reactor electroquímico continuo será:

Celda 1**Balance Global**

$$\dot{F}_{in} = \dot{F}_1 = \dot{F}$$

El flujo volumétrico es constante por lo que el flujo volumétrico de entrada y salida será igual.

Balance Parcial

$$[E] - [S] + [G] - [C] = [A]$$

$$nE - ns - nc = \frac{dn}{dt}$$

$$\dot{F} * C_0 - \dot{F} * C_1 - (-r_1) * V_1 = \frac{dn}{dt}$$

$$\dot{F}*(C_0 - C_1) - k*C_1*V_1 = \frac{dn}{dt}$$

$$n = C*V$$

$$\dot{F}*(C_0 - C_1) - k*C_1 = \frac{d(C_1*V_1)}{dt}$$

$$\dot{F}*(C_0 - C_1) - k*C_1 = V_1 * \frac{d(C_1)}{dt} + C_1 * \frac{d(V_1)}{dt}$$

Dónde:

$$\frac{d(V_1)}{dt} = 0$$

Entonces:

$$\frac{\dot{F}}{V_1}*(C_0 - C_1) - k*C_1 = \frac{d(C_1)}{dt}$$

Para los demás reactores:

$$\frac{\dot{F}}{V_i}*(C_0 - C_i) - k*C_i = \frac{d(C_i)}{dt}$$

Donde i, tiene valores desde 1 hasta 9, por las 9 celdas

Si se integra de la siguiente forma, para la celda 1, hasta 150 [min] en adelante, que es cuándo el reactor ya está lleno y comienza con un comportamiento lineal, debería dar el valor de DQO que se halló en laboratorio en el estado estacionario. Con los datos obtenidos se obtiene la concentración en el equilibrio:

$$\int_0^{150} dt = \int_{988}^{C_1} \frac{1}{\frac{\dot{F}}{V_1}*(C_0 - C_i) - k*C_i} dC_1$$

Nos da $C_1 = 875,86$ [mgO₂/l] y el valor concentración en laboratorio nos dio 868 [mgO₂/l]. Realizando lo mismo con las demás celdas:

Tabla 35.*Comparación de Resultados en Laboratorio y el Modelo*

Nº de Celda	DQO en Laboratorio [mgO₂/l]	DQO con Modelo [mgO₂/l]
1	868	875,86
2	745	754,14
3	717	648,79
4	558	556,50
5	493	473,8
6	363	397,68
7	317	326,36
8	286	259,86
9	239	199,72

Fuente: Elaboración Propia

Capítulo V 5. Análisis Económico y Propuesta

5.1. Costo de Operación del Tratamiento

En esta sección para llevar a cabo el análisis económico del tratamiento realizado, es necesario determinar los costos del mismo a las condiciones de operación que mayor porcentaje de remoción de carga orgánica total presentan, y que para el caso particular de estudio corresponden a el tratamiento con 14 voltios y 150 minutos, con ánodo y cátodo de aluminio, y una distancia entre electrodos de 0,5 cm. La información requerida para calcular los costos operacionales se resume en las tablas 36 y 37, donde se muestra la tarifa de energía eléctrica en La Paz (Categoría: General).

Tabla 36.

Información Para el Cálculo de los Costos Operacionales

Parámetro	Costo (Bs)
d: Electricidad (Bs/KWh)	0,814
f: Electrodo de aluminio (Bs/Kg)	59,03

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 37.

Condiciones Durante el Tratamiento Óptimo

Parámetro	Valor durante el tratamiento
Voltaje aplicado (V)	14
Intensidad de corriente (A)	1,47
Potencia eléctrica del rectificador (W)	20,58
Tiempo de tratamiento (h)	2,5
Volumen de agua tratada (L)	6,717

Fuente: Elaboración Propia

Con base en lo anterior, el costo de operación es determinado usando la relación:

$$\text{Costo de operación} = C_o = d * C_{\text{energía}} + f * C_{\text{electrodo}}$$

Donde ``d`` es el costo de energía eléctrica y ``f`` es el costo del electrodo de aluminio al año 2021.

Costo por consumo de energía eléctrica

El consumo de energía eléctrica para este procedimiento fue a causa de la utilización del rectificador eléctrico. Tal consumo se determinó mediante la ecuación:

$$C_{\text{energía}} = \frac{E * I * t_{\text{res}}}{V}$$

Donde $C_{\text{energía}}$ es el consumo de energía, E es el voltaje aplicado al reactor de electrocoagulación, I es la intensidad de corriente, t_{res} es el tiempo de residencia y V es el volumen de agua a tratar.

Costo por consumo de electrodo

Calculó el consumo del electrodo a partir de la siguiente expresión matemática:

$$C_{\text{electrodo}} = \frac{I * t_{\text{res}} * PM_{\text{Al}^{3+}}}{e^- * 96480 * V}$$

Donde $C_{\text{electrodo}}$ es el consumo del electrodo, I es la intensidad de corriente, t_{res} es el tiempo de residencia, $PM_{\text{Al}^{3+}}$ es el peso molecular del aluminio, e^- es el número de electrones transferidos y V es el volumen de agua a tratar. A partir de la información brindada por la tabla 36 y 37, se determinaron los costos por consumo de energía eléctrica y consumo de electrodo.

Tabla 38.

Resultado de Consumo de Energía y Electrodo

Tiempo (min)	Consumo de energía (Kw-h/L)	Consumo del electrodo (kg/L)
150	$7,66 \times 10^{-3}$	$1,84 \times 10^{-4}$

Fuente: Elaboración Propia

El consumo del electrodo se calculó con la anterior ecuación, el cual es un cálculo teórico, pero se observó en la tabla 25, que el valor teórico se cumplía en la práctica, con una diferencia insignificante. Remplazando datos en la ecuación tenemos:

Tabla 39.

Cálculo de Costo de Operación

Tiempo (min)	Costo de operación (Bs/L)	Costo de operación (Bs/m³)
150	0,017	17,10

Fuente: Elaboración Propia

El costo de operación incluye el costo del material (principalmente electrodos), costo utilitario (principalmente energía eléctrica), costo de mantenimiento y otros costos fijos. En este estudio económico, el costo de la energía y el costo del electrodo se consideran los principales, por lo que, el mantenimiento y el costo fijo no son tomados en cuenta, se concluye que el costo de operación es de 17,1 [Bs/m³] de muestra tratada en 150 (min) de tiempo de residencia.

5.2. Propuesta para Implementar el Sistema

Se plantea implementar el reactor electroquímico continuo en la industria de la cual se trató el agua residual, teniendo los datos de dimensión de la piscina donde se podría implementar el reactor electroquímico continuo, que se muestran a continuación:

Tabla 40.

Dimensiones del Espacio Para Implementar el Sistema

	Unidad	Valor
Altura	Metros	6
Ancho	Metros	7,40
Largo	Metros	9,64

Fuente: Elaboración Propia

El reactor electroquímico continuo se observó que se tendrá la escala 1:20, como se observa en el Anexo I. Con base en las dimensiones del reactor electroquímico continuo a nivel laboratorio y la escala 1:20, se tendría las siguientes medidas para comprobar que el reactor electroquímico continuo, tendría la posibilidad de acomodarse en dicho lugar:

Tabla 41.

Dimensiones del Reactor Electroquímico Continuo si Fuera Implementado

	UNIDAD	VALOR
Altura	Metros	3,5
Ancho	Metros	3
Largo	Metros	8,12
Caudal	m ³ /h	22

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que el reactor electroquímico continuo efectivamente podría ser implementado en la empresa en la cual se trató el agua residual, ya que, se acomoda a las dimensiones con las que se dispone.

Capítulo VI 6. Conclusiones Recomendaciones y Bibliografía

6.1. Conclusiones

- Los parámetros fisicoquímicos de la muestra inicial fueron:

Tabla 42 .

Características Fisicoquímicas del Efluente

PARÁMETROS	UNIDAD	ANTES DEL TRATAMIENTO
DQO	(mgO ₂ /l)	1250
pH		8,55
Temperatura	°C	13,5
DBO	(mgO ₂ /l)	597
Turbidez	NTU	253
Conductividad	(mS)	3,13

Fuente: Elaboración Propia

- Para las pruebas preliminares en el reactor electroquímico batch se realizó la variación de los factores: tiempo de residencia y voltaje, se observó que con la variación de estos factores se halló los parámetros óptimos iniciales para el reactor batch.
- El dimensionamiento del reactor electroquímico continuo se realizó con base en los fenómenos vistos en las pruebas preliminares, a los resultados de los ensayos preliminares, dimensiones que posee la empresa para el tratamiento de aguas residuales, el caudal máximo que tiene la empresa de emisión de aguas residuales y viendo a futuro los posibles inconvenientes que tendría cada diseño que se fue analizando, para que el reactor opere óptimamente. Para el caudal se instaló una bomba peristáltica de forma que se pueda obtener el caudal requerido y que se pueda modificar.
- El tratamiento óptimo fue $V=14$ [V] y $Tr=150$ [min], debido a que el primer valor óptimo en el reactor batch, fue con un DQO bajo y daban buenos valores de remoción de DQO, pero cuando se tuvo el valor crítico de la empresa, estos datos tuvieron que

optimizarse, realizando más pruebas, tanto en batch, como con el reactor continuo, con los valores de $V=14$ [V] y $Tr=150$ [min], se obtuvo una buena remoción de DQO en el reactor electroquímico continuo, que estaba por debajo del límite permisible.

- Se observó que el reactor continuo, llega a tener mayor rendimiento para tiempos de residencia mayores, ya que, en el reactor batch, para tiempos de residencia altos, el nivel del agua, muchas veces baja y reduce el área de contacto del electrodo, reduciendo su rendimiento, en cambio, en el reactor electroquímico continuo se obtuvo mayor rendimiento, ya que, el nivel del agua siempre permanece constante, por el caudal.
- Se pudo observar que a medida que iba avanzando el agua a tratar por el reactor electroquímico continuo, el color iba cambiando favorablemente.
- El parámetro DQO de la muestra inicial fue de 1250 [mgO₂/l], si comparamos con resultados obtenido en el proyecto de tratamiento convencional, se observa que se obtuvo mejores resultados con el tratamiento electroquímico.
- Se observó que la cantidad de lodo generado en el tratamiento de electrocoagulación representa aproximadamente el 19% en masa de la muestra tratada.
- Realizada la evaluación económica del tratamiento se observó que el costo de operación es de $17,1$ [Bs/metro cúbico] de muestra tratada en 150 [min] de tiempo de residencia. La tarifa de energía eléctrica en La Paz, utilizada para este cálculo es de $0,814$ [Bs/Kw-h], que está vigente en 2021.

6.2. Recomendaciones

- Realizar estudios para tratamientos previos al ingreso al reactor electroquímico, para que el agua residual pueda ingresar con menor DQO al reactor electroquímico y este pueda dar valores más bajos de DQO.

- Realizar estudios para modificar la conductividad, pH y temperatura, de esta manera observar si estos parámetros, podrían optimizar significativamente, los procesos en los reactores electroquímicos.
- En un reactor electroquímico continuo realizar estudios, para ver la posibilidad de añadir pequeños filtros de celda en celda, de esta forma, al momento de salir del reactor electroquímico continuo, este no necesite de un posible filtrado o necesite un post-tratamiento muy sencillo.
- Acompañar el tratamiento de electrocoagulación con procedimientos de tratamiento secundario diferente al utilizado en este proyecto, para retirar la mayor cantidad de flóculos formados durante el tratamiento, con el fin de verificar si se puede lograr un porcentaje de remoción mayor al obtenido en este proyecto, es decir, realizar un estudio de un tratamiento secundario económico, para obtener una mayor remoción de DQO.
- Realizar estudio a los lodos generados en el proceso de electrocoagulación, para poder ver cómo aprovechar los lodos generados, en muchos casos los lodos son recuperados con ácido sulfúrico, el cual, podría aplicarse para la recuperación de los lodos generados.

6.3. Bibliografía

APHA-AWWA- AWWA CF (1992). Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Díaz de Santos, Madrid.

Arango Ruiz, A. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. LASALLISTA, 49-56.

A. López, (2015). «Estudio del proceso de degradación electroquímica de colorantes tipo ftalocianina en matrices acuosas contaminadas con azul lanasol 8G», Tesis Magistral, Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica.

Aguilar Mancco, F. y Palomino Cartolín, A. (2018). Evaluación de un Sistema de Electrocoagulación de Flujo Continuo para la Remoción de Cromo (VI) y DQO de Curtiembre-Huachipa-2018. Universidad César Vallejo. Lima.

Barceló, Damia, et al. Aguas Continentales, Gestión de Recursos Hídricos, Tratamiento y Calidad del Agua [en línea]. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Informes CSIC, Madrid 2008.

Chang, R. (2002). Química. México, D.F. McGraw-Hill Interamericana.

Palma Goyes, R.E., Macías Uribe, J., González, I., y Torres-Palma, R.A. (abril de 2013). Tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria. Revista Colombiana de Materiales, 93 - 108.

Cáceres Arenas, G. (2007). Hidrometalurgia y Electrometalurgia. Universidad de Atacama, Atacama. Obtenido de <http://www.ivan.cl>

Chávez Alvaro (2009), Una alternativa limpia para el tratamiento de las aguas residuales galvánicas: revisión bibliográfica. Universidad de Medellín.

Cazco Sanchez, A. J., & Jarrin, S. A. (2010). Diseño, construcción y analisis de los parametos de operacion de un sistema de electrocoagulacion. Escuela Politecnica Nacional, Quito.

Castells, X. E. (2012). Tratamiento y valorizacion energética de residuos. Madrid: Díaz de Santos.

Compara Calle, C.J. (2020). Diseño y construcción de un reactor electroquímico a nivel laboratorio para tratamiento de aguas residuales del lavado de quinua por electrocoagulación. Universidad Mayor de San Andres. La Paz.

Cuba Tello, M. (2020). Tratamiento de agua residual procedente de lavadoras por el método de electrocoagulación para la reutilización en riego de vegetales- Ate Vitarte. Universidad Mayor de San Marcos. Lima.

Franklin, J. A. (1974). Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions. Houston, Texas: National Association of Corrosion Engineers.

Gilpavas, E. (2008). Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales. Universidad EAFIT. Medellín.

García, E. C. (2012). Evaluación del proceso de electrocoagulación sobre aguas de lavado con contenido de lactosuero. Universida del Valle. Cali, Valle.

Gómez Polanco, E. P., y Martínez Valeriano, V.H. (2013). Estudio de optimización de variables de funcionamiento de un sistema de electrocoagulación para tratar aguas de la industria textil. Escuela Politecnica Nacional. Quito.

J. N. Castillo Cervantes, (2015). «Remoción de Colorantes Tipo Azo Usando Líquidos Iónicos», Tesis Magistral, Centro de Investigación e Innovación Tecnológica, Instituto Politécnico Nacional.

Martha Bermeo, G. y Óscar Tinoco G.(2016). Remoción de colorantes de efluente sintético de industria. Revista del Instituto de Investigación, 19 (38), 125-128.

Manchego Doncel, I. y Zabala Gutiérrez, G. (2019). Implementación de un electrocoagulador a escala de laboratorio que permita la remoción de arsénico en agua. Universidad Santo Tomas. Villavicencio.

Navarro, F.M. (2008). Tratamiento de Aguas Residuales Industriales Mediante Electrocoagulación y Coagulación Convencional. Facultad de Ciencias Químicas. Ciudad Real: Ediciones de la Universidad Castilla-La Mancha.

Peréz Cuásquer, G. J. (2015). Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria Textil mediante Procesos Electroquímicos. Universidad Central de Ecuador. Quito.

Quispe Quispe, K.K. (2015). Electrocoagulación en la remoción de mercurio de las aguas residuales en el centro poblado La Rinconada – Puno. Universidad Nacional del Altiplano. Perú, Puno.

Quinteros Rodríguez, L.E. (2017). Propuesta de un plan de mantenimiento para el departamento de tejeduría en una empresa textil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

R. Garzón, (2009). «Diferentes clases químicas por hongos y bacterias inmovilizados sobre fibra de agave tequilana webber var» Tesis, Facultad de Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana.

Rodriguez, Antonio, et al. (2012). Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. [en línea]. Madrid. Disponible en: <<http://blogdelagua.com/tematica/depuracion/documento-tratamientos-avanzados-de-aguas-residuales-industriales/>>.

Rojas Forero, D. A., & Tierradentro Polania, E. (2018). Evaluación técnico-financiera del método de electrocoagulación para tratamiento de agua asociada a procesos petroleros.

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA, Bogota.

Rosado, R. (7 de octubre de 2019). Corrosión. Obtenido de google.com:
<https://www.fceia.unr.edu.ar/materialescivil/Publicaciones/C.pdf>

Sala, G. y Condorhuaman, C., (2014). Huella de carbono de la industria textil. Revista Peruana de Química e Ingeniería. Química. Vol 12 (2): 25-28.

Sánchez Brañez, M., Gutiérrez, R., Pérez, R., Uribe, C., y Valle, P. (2018). Contaminación de los ambientes acuáticos generados por la industria textil. Escuela Universitaria de Posgrado UNFV, Lima.

Treviño Suárez del Real, P. (2009). Estudio de la reducción de iones Cr^{6+} por medio de aluminio. Universidad Iberoamericana. México, D.F.

Villegas Marín, C., & González Monroy, B. (2013). Fibras textiles naturales sustentables y nuevos hábitos de consumo. Revista Legado de Arquitectura y Diseño, (13), 31-45.

Zaruma Arias, P. E., Proal Nájera, J.B., Hernández, I.C. y Salas Ayala, H.I. (2018). Los Colorantes Textiles Industriales Y Tratamientos Óptimos De Sus Efluentes De Agua Residual: Una Breve Revisión. Revista de la Facultad de Ciencias Químicas, 38-47.

Capítulo VII 7. Anexos

7.1. Anexo A. Cantidades en Cada Vial para Hallar DQO

Con base en la siguiente tabla:

Tabla 43.

Cantidades de Muestra y Reactivos Para Varios Vasos de Digestión

Vaso de digestión, tubos de cultivo:	Muestra (ml)	Solución de digestión (ml)	Reactivo de ácido sulfúrico (ml)	Volumen total final (ml)
16 x 100 mm	2,5	1,5	3,5	7,5
20 x 150 mm	5	3	7	15
25 x 150 mm	10	6	14	30
Ampollas estándar de 10 ml	2,5	1,5	3,5	7,5

Fuente: Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales,5-18

Se llenó la siguiente tabla:

Tabla 44.

Valores Incógnita Para Añadir 2 ml de Muestra

Vaso de digestión, tubos de cultivo:	Muestra (ml)	Solución de digestión (ml)	Reactivo de ácido sulfúrico (ml)	Volumen total final (ml)
16 x 100 mm	2	X	y	z

Fuente: Elaboración Propia

Para la solución de digestión, se extrapolo de la siguiente manera:

$$\frac{x-1,5}{2-2,5} = \frac{1,5-3}{2,5-5} \quad x = 1,2 \text{ ml}$$

Para el reactivo de ácido sulfúrico, se extrapolo de la siguiente manera:

$$\frac{y - 3,5}{2 - 2,5} = \frac{3,5 - 7}{2,5 - 5}$$

$$y = 2,8 \text{ ml}$$

Para el volumen total final:

$$z=x+y+2=1,2 \text{ ml} + 2,8 \text{ ml} + 2 \text{ ml}$$

$$z=6 \text{ ml}$$

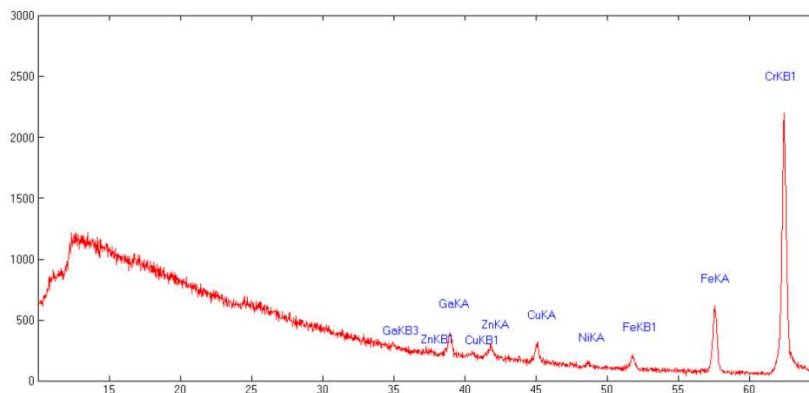
De esta forma se tuvo la tabla 13.

7.2. Anexo B. Referencia para la Pureza del Aluminio

Obtuve el electrodo de aluminio, del mismo lugar de donde los obtuvo la Ingeniera Clara Compara Calle cuándo realizó su proyecto de grado, resultando lo que se indicará, a continuación. El equipo donde se realizó el análisis cualitativo por fluorescencia de rayos X de los electrodos, muestra en las gráficas que se van formando picos, los cuales representan a los elementos presentes en cada muestra, como se puede observar en la siguiente gráfica:

Gráfico 6.

*Espectro de Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos x Para Muestra de Aluminio.
Intensity Count vs Energy Kev*



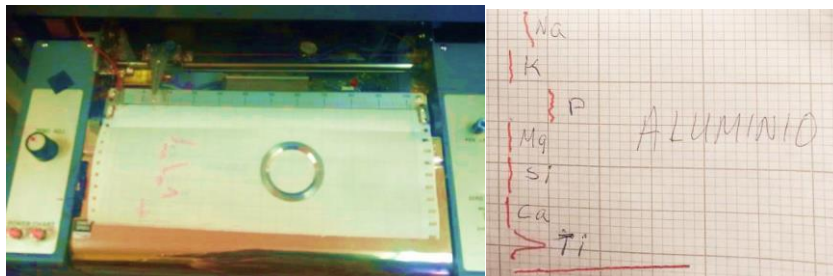
Fuente: Compara Calle, 2020.

Como se puede observar en la gráfica, no se puede apreciar el pico de aluminio debido a que se trata de un elemento ligero, por lo que realizó otro análisis para elementos ligeros, en el cual sí se encuentra el aluminio lógicamente, el cual garantizó un 99% de pureza de la muestra de aluminio y el restante 1% representaría pequeños picos de galio, cobre, zinc, níquel, hierro,

titanio y magnesio, como elementos ligeros presenta titanio, como se puede observar en la siguiente fotografía.

Fotografía 16.

Análisis de Elementos Ligeros y de Elementos Ligeros de la Muestra de Aluminio



Fuente: Compara Calle, 2020.

La conclusión de resultado, que la muestra contiene un 99% de pureza, fue proporcionada, gracias a la alta experiencia del Ingeniero Geólogo Mario Blanco, en la realización del método de espectrometría (fluorescencia de rayos X), quien realizó la obtención de gráficas y análisis de resultados

7.3. Anexo C. Caudales Hallados en la Bomba Peristáltica Del IDEPROQ

Se realizó pruebas en la bomba peristáltica, tiene 10 niveles de velocidad y se buscó tener una referencia de las velocidades, para elegir de forma adecuada el caudal deseado.

Fotografía 17.

Hallando Caudales con sus Niveles



Fuente: Elaboración Propia

Se fue probando distintos niveles, se recolectaba en una probeta de 100 ml, durante un minuto con cada nivel probado y se medía el caudal, de la siguiente manera.

Tabla 45.*Caudales Según el Nivel de Caudal de la Bomba Peristáltica*

Nivel de caudal	Volumen (l)	Tiempo (min)	Caudal (l/min)
3	0,060	1	0,060
3,5	0,079	1	0,079
4	0,086	1	0,086
5	0,100	1	0,100

Fuente: Elaboración Propia

De esta forma se obtuvo referencia, para ir a los valores deseados.

7.4. Anexo D. Caudales para los Ensayos en el Reactor Electroquímico Continuo

Tenemos los siguientes datos para hallar el caudal para los distintos ensayos en el reactor electroquímico continuo.

Tabla 46.*Caudales Para el Reactor Electroquímico Continuo*

Tiempo de residencia(min)	Volumen (l)	Caudal (l/min)
90	6,717	0,075
120	6,717	0,056
150	6,717	0,045

Fuente: Elaboración Propia

7.5. Anexo E. Determinación del Potencial de Hidrógeno

La medida del pH es una de las pruebas más importantes y frecuentes utilizadas en el análisis químico del agua. Prácticamente todas las fases del tratamiento del agua para suministro y residual, como la neutralización ácido-base, suavizado, precipitación, coagulación, desinfección y control de la corrosión, dependen del pH. A una temperatura determinada, la intensidad del carácter ácido o básico de una solución viene dada por la actividad del ion hidrógeno o pH.

Procedimiento

Para la medición de pH se necesita un potenciómetro calibrado, establecer el equilibrio entre electrodos y la muestra agitando ésta para asegurar su homogeneidad; la agitación será suave para reducir al mínimo el arrastre de dióxido de carbono. Para muestras tamponadas o con gran fuerza iónica, acondiciónense los electrodos después de limpiarlos, introduciéndolos en la muestra durante 1 minuto. séquense y sumérjanse en otra porción nueva de la misma muestra, y léase el pH. Con soluciones diluidas, mal tamponadas, equilíbrense los electrodos por inmersión en tres o cuatro porciones sucesivas de la muestra. Tómese una muestra nueva para medir el pH.

Utilizando bien un medidor de pH con buenos electrodos, se puede conseguir una precisión de $\pm 0,02$ unidades de pH y una precisión de $\pm 0,05$ unidades de pH. Sin embargo, en condiciones normales, el límite de precisión es $\pm 0,1$ unidades de pH, especialmente para determinaciones en el agua y soluciones mal tamponadas.

7.6. Anexo F. Determinación de Conductividad

La conductividad es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones y de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura de la medición. Las soluciones de la mayoría de los ácidos, bases y sales presentan coeficientes de conductividad relativamente adecuados. A la inversa, las moléculas de los compuestos orgánicos que no se disocian en soluciones acuosas tienen una conductividad muy escasa o nula.

Procedimiento

La medición de conductividad se realizó con un conductímetro calibrado, el Oakton PC-700 ha sido diseñado para ofrecerle mediciones de pH, conductividad y temperatura, el cual nos da datos de conductividad en unidades de mS.

La muestra a analizar debe vaciarse en un vaso de 250ml o 500 ml, la muestra debe estar homogeneizada para posteriormente sumergir el sensor dentro del vaso y esperar hasta que la lectura del conductímetro se estabilice. Tomar nota de la lectura unas tres veces y sacar un promedio.

7.7. Anexo G. Determinación de Turbidez

La turbidez de un líquido es importante debido a muchas razones, según sea su utilización. La turbidez está causada por solidos suspendidos, incluyendo limo arcilla, algas, microbios, materia orgánica y otras partículas delgadas insolubles en los medios de muestra. Las partículas hacen que la muestra tome un aspecto indefinido o turbio.

Procedimiento

- Para la medición de turbidez se necesita un turbidímetro (colorímetro) calibrado, y seguir los siguientes pasos:
- llenar una celda de muestra limpia con la solución de blanco hasta la marca de 10ml (usualmente agua destilada).
- Llenar la otra celda de muestra limpia con muestra hasta la marca de 10ml.
- Colocar el blanco en el compartimiento de la celda con la marca de diamante hacia el teclado numérico y tapar la celda con el escudo para la luz.

Figura 13.

Procedimiento de Medición de Turbidez



Fuente: Manual de análisis de agua HACH, EEUU, 2000.

Presionar la tecla ZERO. Luego de dos segundos, en la pantalla se leerá: 0.00,

Agitar y colocar la celda de muestra que contiene la muestra en el compartimiento de la celda y tapar con el escudo para la luz. Al tapar la celda de muestra, colocar la superficie curva del escudo para la luz lo más cerca posible del teclado numérico para lograr un buen sellado contra la luz dispersa.

- Presionar la tecla READ. Luego de dos segundos el instrumento mostrara los resultados.

Figura 14.

Procedimiento de Lectura de Turbidez



Fuente: Manual de análisis de agua HACH, EEUU, 2000.

Fotografía 18.

Hallando la Turbidez de la Muestra de Agua



Fuente: Elaboración Propia

7.8. Anexo H. Determinación de Demanda Química de Oxígeno

Representa la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica por medios químicos y convertirla en dióxido de carbono y agua.

Procedimiento

Para el patrón se debe añadir las cantidades de solución de digestión y reactivo de ácido sulfúrico, indicadas en el Anexo A, luego se procede a añadir 2 ml de agua ultrapura o destilada, para obtener el blanco. De esta forma se obtiene el vial con el blanco.

Para el patrón se debe añadir las cantidades de solución de digestión y reactivo de ácido sulfúrico, indicadas en el Anexo A, luego se procederá a añadir 2 ml de la solución patrón. De esta forma tenemos el vial patrón.

Para la muestra se debe añadir las cantidades de solución de digestión y reactivo de ácido sulfúrico, indicadas en el Anexo A, luego se procede a añadir 2 ml de la muestra de agua. De esta forma se obtiene el vial muestra. Posterior a preparar los viales, se debe calentar el Reactor / calentador HI 839800-02 a 150 °C, una vez ya este a esta temperatura se debe programar el Reactor / calentador HI 839800-02 para 2 horas con una temperatura constante de 150 °C. Luego se ingresan los viales y se inicia con las 2 horas.

Fotografía 19.

Digestión en los Viales



Fuente: Elaboración Propia

El Reactor / calentador HI 839800-02, indicará con un ruido que ya se cumplieron las dos horas, en ese momento se deben sacar los viales y agitar, para posteriormente poner los viales en una gradilla metálica para que se enfríen. Se debe programar el Espectrofotómetro Hanna iris HI-801 para la lectura de DQO.

Fotografía 20.

Viales en la Gradilla Metálica



Fuente: Elaboración Propia

Una vez fríos los viales se ingresará en el espectrofotómetro, primeramente, el blanco y se presionará ZERO, una vez leído el blanco presionando ZERO, se procede a leer el patrón, para verificar que se esté leyendo valores de DQO aceptables, luego del patrón se procederá a leer las muestras. Es muy importante previo a realizar las lecturas, limpiar cada vial antes del ingreso al espectrofotómetro.

Fotografía 21.

Lectura del Blanco



Fuente: Elaboración Propia

7.9. Anexo I. Flexibilidad de la Escala del Diseño con el Caudal

Se obtuvo inicialmente con una escala 1:17, pero se disminuyó el caudal por lo que la escala, también se modificará. El caudal final es 0,045 (l/min) y el reactor tiene un volumen de 6,717 l con un tiempo de residencia de 150 (min), con estos datos podremos mover la escala.

Entonces, escalando el volumen que se debe tratar con el caudal máximo, para 150 minutos:

$$V=22 \text{ (m}^3\text{/h)} * 2,5\text{h}=55 \text{ (m}^3\text{)} =55000 \text{ (l)}$$

Por lo que se hallará la nueva escala:

$$e^3 * 6,717 \text{ (l)}=55000 \text{ (l)}$$

$$e=20$$

Se puede observar que la escala con los cambios de caudal realizados, se acomodan a escala 1:20.

7.10. Anexo J. Resultados del Primer Muestreo para el Reactor Batch, de SGLAB

SGLAB S.R.L. INSPECCIONES
Y LABORATORIO DE CALIDAD
AV. DIEGO DE PORTUGAL
ZONA CIUDAD SATELITE
EL ALTO-LAPAZ
TEL. (591-2) 2125918

Pág. 1 de 2
N° REGISTRO FORM PT-008

INFORME DE ENSAYO

ORDEN N° : 0042-21-MAB FECHA EMISIÓN: 2021-02-26

CLIENTE : JAQUELINE PACHECO SOLIZ - RICARDO RUBEN RAMOS

DIRECCION : ZONA SAN PEDRO, CALLE BELZU, # 150

PRODUCTO : AGUA RESIDUAL

NUESTRA REFERENCIA : 01

SU REFERENCIA : AGUA RESIDUAL TEXTIL SENATEX

ENSAYOS SOLICITADOS : *DQO

FECHA DE ENSAYO : 2021-02-18

FECHA RECEPCION LABORATORIO : 2021-02-18

RESULTADOS


ENSAYO	*DQO
UNIDADES	mg/l
AGUA RESIDUAL TEXTIL SENATEX	416
Método Ref:	HACH 8000

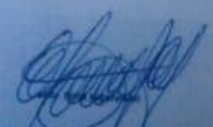
Observaciones:
* Parámetro acreditado
Muestra recepcionada en laboratorio

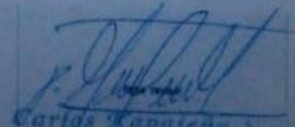
ADVERTENCIA

- Se informa a cualquier persona que tenga en su poder este documento, que el contenido del mismo, refleja los hallazgos de SGLAB solo al momento de su intervención y dentro de los límites de las instrucciones del cliente al haberse alguna. La competencia es únicamente responsable ante su cliente y este documento no sirve a las partes de una transacción de ejercer todos sus derechos y obligaciones en virtud de los documentos de la transacción.
- Cualquier modificación no autorizada, fraude o falsificación del contenido o de la apariencia de este documento es ilegal y los culpables serán procesados con el máximo rigor de la ley.
- Los resultados NO constituyen garantía de la representatividad de la muestra del (o los) bienes y estrictamente están relacionados con la(s) muestra(s). SGLAB NO asume ninguna responsabilidad en relación con el origen o fuente extraída. Los resultados de los ensayos presentados, se refieren exclusivamente a las muestras enviadas/entregadas por el interesado.
- La muestra o muestras se conservaran por un lapso no mayor a 90 días. Las responsabilidades de la SGLAB se limitan únicamente a la ejecución de estos ensayos dentro de normas técnicas adecuadas.
- SGLAB solo reconoce como válidos Informes de Ensayo emitidos en Soporte Físico con el debido sello en tinta y seco del personal autorizado
- Este informe es emitido dentro del alcance de acreditación concedido por la Dirección Técnica de Acreditación del Instituto Boliviano de Metrología en la DTA-CET-085, el cual puede consultarse en la página web http://www.inmetro.dob.bo/web/organismos_acreditados

110




 Edgar Rodríguez Estevez
 COORDINADOR TÉCNICO DE LABORATORIO
 SGLAB


 Carlos Kapajenu
 COORDINADOR DE INSPECCIÓN
 SGLAB

FG-L7 8-02
Versión:03
Fecha de Emisión 2019-07-01

7.11. Anexo K. Resultados Finales del Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO DE PROCESOS QUÍMICOS
IIDEPROQ



N° IIDEPROQ 004-2021

INFORME DE ANÁLISIS

Atención	Univ. Ricardo Ruben Ramos
Responsable de Laboratorio	M.Sc. Lic. Carlos H. Díaz Mercado TÉCNICO EN INVESTIGACIÓN I - IIDEPROQ
Equipo Técnico de Laboratorio	Lic. Isabel Alejo C. AUXILIAR DE INVESTIGACIÓN
Tipo de muestra	Univ. Camila Paucara AUXILIAR DE INVESTIGACIÓN
Responsable del muestreo	2 Muestras de Agua
Fecha de Recepción de muestra	REALIZADO POR EL CLIENTE
Fecha de emisión de informe	22/04/2021
	29/04/2021

RESULTADOS

PARÁMETRO	Unidad	MA-R	MA-T	MÉTODO
DBO5	[mg _{O2} /l]	597	217	NMX-AA-028-SCFI-2001
DQO	[mg/l] _{CO2}	1002	228	HANNA – DQO-MR-EPA - ID #28

NOTACIÓN:

NMX-AA-028-SCFI-2001: Norma Mexicana (Análisis de agua-determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO₅))

OBSERVACIONES:
Ninguna.



Ing. René Alvarez Apaza Ph.D.
DIRECTOR
Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos
IIDEPROQ-UMSA



U.M.S.A. - FACULTAD DE INGENIERÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO DE PROCESOS
QUÍMICOS
IIDEPROQ
La Paz - Bolivia

Calle 30 de Cota Cota
Campus Universitario
Edificio IIDEPROQ

Fono: 2774412
www.iideproq.umsa.bo

Fax: 591-02-774412
Email: iideproq@umsa.bo

7.12. Anexo L. Reglamento Ambiental del Sector Industrial Manufacturero (RASIM)

ARTÍCULO 71°. (Fuentes). - Con el objeto de regular las actividades de las industrias que puedan contaminar el medio hídrico, se consideran de prioritaria atención y control las siguientes fuentes:

- a) Procesos que generen residuos líquidos;
- b) Procesos térmicos que utilicen agua;
- c) Vertido o derrame de líquidos;
- d) Operaciones de limpieza de materias primas, equipos y ambientes.

ARTÍCULO 72°. (Esfuerzos). - La industria es responsable de la prevención y control de la contaminación que puedan generar sus descargas, debiendo realizar esfuerzos en:

- a) La segregación de sus diferentes descargas líquidas en origen, con el objeto de reciclar y reutilizar las mismas;
- b) La optimización de sus operaciones y procesos además del adecuado mantenimiento de sus equipos;
- c) La captura, conducción y tratamiento de derrames;
- d) La recirculación de las sustancias utilizadas hasta su agotamiento;
- e) Uso eficiente del agua en los procesos térmicos;
- f) La incorporación de sistemas correctivos de la contaminación, después de agotarse las medidas de producción más limpia.

Los esfuerzos de la industria deberán reflejarse en los Planes de Manejo Ambiental, Informes Ambientales Anuales, renovación del formulario RAI. Los esfuerzos de la industria se evalúan a través del Sistema de Evaluación y Revelación de Información (SERI).

ARTÍCULO 73°. (Control priorizado). - La industria priorizará en el control de sus descargas, los siguientes parámetros: Potencial de hidrógeno (pH), Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), Demanda química de oxígeno (DQO), Sólidos suspendidos totales (SST), Aceites y Grasas, Metales pesados y Conductividad.

El control de estos parámetros se reflejará en los Planes de Manejo Ambiental, Informes Ambientales Anuales y renovación del formulario RAI.

ARTÍCULO 74°. (Límites permisibles). - La industria debe cumplir con los límites permisibles para descargas en cuerpos de agua a través del parámetro de mezcla establecido en el Anexo K; lo que no implica que deberá auto monitorear todos los parámetros contemplados en este Anexo.

ARTÍCULO 75°. (Automonitoreo). - La industria debe realizar automonitoreo de todos los parámetros que puedan ser generados por sus actividades como descargas. Las industrias contempladas en el Anexo L, deberán realizar en sus descargas, automonitoreo de los parámetros especificados, de acuerdo a métodos estándar disponibles mientras se establezca la Norma Boliviana, debiendo mantener un registro de fuentes y descargas para la inspección de las autoridades. La automonitoreo deberá efectuarse por lo menos una vez al año para cada punto de descarga.

Para la automonitoreo se utilizarán laboratorios acreditados en Bolivia. Mientras éstos no existan a nivel departamental, se utilizarán laboratorios legalmente establecidos.

ARTÍCULO 76°. (Disposición de descargas). - Las industrias tienen las siguientes posibilidades para disponer sus descargas:

a) Conectarse a un sistema de alcantarillado autorizado para descargas industriales, de acuerdo a contrato de descarga entre la industria y la Entidad Prestadora de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario (EPSA);

b) Transportar a una planta de tratamiento o a un punto de descarga de alcantarillado industrial autorizado, de acuerdo a contrato de descarga entre la industria y EPSA;

c) Descargar a un cuerpo de agua superficial en un volumen menor o igual a un quinto (1/5) del caudal promedio del río o arroyo en época de estiaje, cuando se cumple con lo establecido en el Anexo 13-A, previa autorización de la IADP. Si, existieran descargas instantáneas mayores a un quinto (1/5), pero menores a un tercio (1/3) del caudal, la IADP podrá en forma excepcional autorizar las mismas previo estudio justificado.

d) Transferir a terceros cuando se cumplan con los límites permisibles establecidos en el Anexo 13-A. Para fines de reciclaje referirse al Anexo 15;

e) Recargar o inyectar a un acuífero, solamente cuando no exista sistema de alcantarillado o cuerpo de agua superficial, previa autorización excepcional de la IADP, con base en un estudio justificado y cumplimiento de los límites permisibles establecidos para cuerpos receptores de Clase A del Anexo K.

Para optar a las opciones de los incisos c), d) y e), las industrias deberán contar con la caracterización de sus efluentes a través de una automonitoreo y mantener un registro disponible para las inspecciones de la autoridad.

ARTÍCULO 77°. (Prohibiciones). - Se prohíben las siguientes descargas a los sistemas de alcantarillado y cuerpos de agua:

a) Sustancias radiactivas, compuestos órganos halogenados, aceites y lubricantes minerales e hidrocarburos;

b) Sedimentos, lodos, sólidos o semisólidos, provenientes de los procesos de producción, sistemas de tratamiento de aguas residuales o equipos de descontaminación ambiental.

Estas sustancias deberán ser colocadas en recipientes sólidos cerrados y para efectos de su gestión se aplicará lo dispuesto en el Capítulo IV del presente Título.

ARTÍCULO 78°. (Dilución). - Está prohibida la dilución de los efluentes para lograr las concentraciones de los límites permisibles del Anexo K del presente Reglamento.

7.13. Anexo M. Valores Máximos Admisibles de Parámetros en Cuerpos de Agua (Anexo 13-A, RASIM)

Nº	Parámetros	Unidad	Cancerígenos	CLASE A	CLASE B	CLASE C	CLASE D
1	pH		NO	6.0 a 8.5	6.0 a 9.0	6.0 a 9.0	6.0 a 9.0
2	Temperatura	°C		(+/-) 3 °C de c. receptor	(+/-) 3 °C de c. receptor	(+/-) 3 °C de c. receptor	(+/-) 3 °C de c. receptor
3	Sólidos disueltos totales	mg/l		1000	1000	1500	1500
4	Aceites y grasas	mg/l	NO	Ausente	Ausente	0.3	1.00
5	DBO5	mg/l	NO	< 2	< 5	< 20	< 30
6	DQO	mg/l	NO	< 5	< 10	< 40	< 60
7	NMP Colifecales NMP	N/100ml	NO	< 50 y <5 en 80% muestras	< 1000 y <200 en 80% muestras	< 5000 y <1000 en 80% muestras	< 50000 y <5000 en 80% muestras
8	Parásitos	N/l		< 1	< 1	< 1	< 1
9	Color mg Pvl	mg/l	NO	< 10	< 50	< 100	< 200
10	Oxígeno disuelto	mg/l	NO	>80% sat	> 70% sat	> 60 % sat	> 50% sat
11	Turbidez	NTU	NO	< 10	< 50	< 100 <2000***	< 200 – 10,000***
12	Sólidos sedimentables	mg/l-ml/l	NO	< 10 mg/l	30 mg/l – 0.1 ml/l	< 50 mg/l – <1 ml/l	100 mg/l – <1 ml/l
13	Aluminio	mg/l		0.2 c. Al	0.5 c. Al	1.0 c. Al	1.0 c. Al
14	Amoniaco	mg/l	NO	0.05c. NH ₃	1.0 c. NH ₃	2.0 c. NH ₃	4.0 c. NH ₃
15	Antimonio	mg/l	NO	0.01 c. Sb	0.01 c. Sb	0.01 c. Sb	0.01 c. Sb
16	Arsénico total	mg/l	SI	0.05 c. As	0.05 c. As	0.05 c. As	0.1 c. As
17	Benceno	ug/l	SI	2 c. Benceno	6.0 c. Benceno	10.0 c. Benceno	10.0 c. Benceno
18	Bario	mg/l	NO	1 - 0.05 c. Ba	1.0 c. Ba	2.0 c. Ba	5.0 c. Ba
19	Berilio	mg/l	SI	0.001 c. Be	0.001 c. Be	0.001 c. Be	0.001 c. Be
20	Boro	mg/l		1.0 c. B	1.0 c. B	1.0 c. B	1.0 c. B
21	Calcio	mg/l	NO	200	300	300	400
22	Cadmio	mg/l	NO	0.005	0.005	0.005	0.005
23	Cianuros	mg/l	NO	0.02	0.1	0.2	0.2
24	Cloruros	mg/l	NO	250 c. Cl	300 c. Cl	400 c. Cl	500 c. Cl
25	Cobre	mg/l	NO	0.05 c. Cu	1.0 c. Cu	1.0 c. Cu	1.0 c. Cu
26	Cobalto	mg/l		0.1 c. Co	0.2 c. Co	0.2 c. Co	0.2 c. Co
27	Cromo Hexavalente	mg/l	SI	0.05 c. Cr total	0.05 c. Cr +6	0.05 c. Cr +6	0.05 c. Cr +6

N°	Parámetros	Unidad	Cancerígenos	CLASE A	CLASE B	CLASE C	CLASE D
28	Cromo Trivalente	mg/l	NO		0.6 c. Cr+3	0.5 c. Cr+3	1.1 c. Cr+3
29	1,2 Dicloroetano	mg/l	SI	10	10	10	10
30	1,1 Dicloroetano	mg/l	SI	0.3	0.3	0.3	0.3
31	Estaño	mg/l	NO	2.0 c. Sn	2.0 c. Sn	2.0 c. Sn	2.0 c. Sn
32	Fenoles	mg/l	NO	1.0 c. C ₆ H ₅ OH	1.0 c. C ₆ H ₅ OH	5.0 c. C ₆ H ₅ OH	10.0 c. C ₆ H ₅ OH
33	Hierro Soluble	mg/l	NO	0.3 c. Fe	0.3 c. Fe	1.0 c. Fe	1.0 c. Fe
34	Fluoruros	mg/l	NO	0.6–1.7 c. F	0.6–1.7 c. F	0.6–1.7 c. F	0.6–1.7 c. F
35	Fosfato total	mg/l	NO	0.4 c. Ortofosfato	0.5 c. Ortofosfato	1.0 c. Ortofosfato	1.0 c. Ortofosfato
36	Magnesio	mg/l	NO	100 c. Mg	100 c. Mg	150 c. Mg	150 c. Mg
37	Manganeso	mg/l	NO	0.5 c. Mn	1.0 c. Mn	1.0 c. Mn	1.0c. Mn
38	Mercurio	mg/l	NO	0.001 Hg	0.001 Hg	0.001 Hg	0.001 Hg
39	Litio	mg/l		2.5 c. Li	2.5 c. Li	2.5 c. Li	5.0 c. Li
40	Níquel	mg/l	SI	0.05 c. Ni	0.05 c. Ni	0.5 c. Ni	0.5 c. Ni
41	Nitrato	mg/l	NO	20 c. NO ₃	30 c. NO ₃	50 c. NO ₃	50 c. NO ₃
42	Nitrito	mg/l	NO	<1.0 c. N	1.0 c. N	1.0 c. N	1.0 c. N
43	Nitrógeno Total	mg/l	NO	5 c. N	12 c. N	12 c. N	12 c. N
44	Plomo	mg/l	NO	0.05 c. Pb	0.05 c. Pb	0.05 c. Pb	0.1 c. Pb
45	Plata	mg/l	NO	0.05 c. Ag	0.05 c. Ag	0.05 c. Ag	0.05 c. Ag
46	Pentaclorofenol	mg/l	SI	5	10	10	10
47	Selenio	mg/l	NO	0.01 c. Se	0.01 c. Se	0.01 c. Se	0.05 c. Se
48	Sodio	mg/l	NO	200	200	200	200
49	Sólidos Flotantes			Ausentes	Ausentes	Ausente	<Retenido malla 1 mm ²
50	Sulfatos	mg/l	NO	300 c. SO ₄	400 c. SO ₄	400 c. SO ₄	400 c. SO ₄
51	Sulfuros	mg/l	NO	0.1	0.1	0.5	1.0
52	S.A.A.M.(Detergentes)	mg/l		0.5	0.5	0.5	0.5
53	Tetracloroetano	ug/l	NO	10	10	10	10
54	Tricloroetano	ug/l	SI	30	30	30	30
55	Tetracloruro de Carbono	ug/l	SI	3	3	3	3
56	2,4,6 Triclorofenol	ug/l	SI	10	10	10	10
57	Uranio Total	mg/l		0.02 c. U	0.02 c. U	0.02 c. U	0.02 c. U
58	Vanadio	mg/l	NO	0.1 c. V	0.1 c. V	0.1 c. V	0.1 c. V
59	Zinc	mg/l	NO	0.2 c. Zn	0.2 c. Zn	0.2 c. Zn	0.2 c. Zn

La mezcla de agua producto de una descarga y del cuerpo de agua debe regirse por la ecuación:

$$P_{xf} = \frac{P_{xi}Q_i + P_{xc}Q_c}{Q_i + Q_c}$$

Para cualquier parámetro de calidad, el valor total de la mezcla debe ser siempre menor que el establecido para la clase de cuerpo que corresponda.

Dónde: Paf: Parámetro de mezcla; Pxi: Parámetro de la descarga; Pxc: Parámetro del cuerpo de agua en un punto sin impacto; Qi: Caudal de la descarga; Qc: Caudal del cuerpo de agua.

7.14. Anexo N. Límites Permisibles para Descargas Líquidas en mg/l (Anexo 13-C, RASIM)

NORMA - PARÁMETROS	Diaria	Mensual
Cobre	1.0	0.5
Zinc	3.0	1.5
Plomo	0.6	0.3
Cadmio	0.3	0.15
Arsénico	1.0	0.5
Cromo+3	1.0	0.5
Cromo + 6	0.1	0.05
Mercurio	0.002	0.001
Hierro	1.0	0.5
Antimonio	1.0	
Estaño	2.0	1.0
Cianuro Libre	0.2	0.1
pH	6 a 9	6 a 9
Temperatura (*)	+/- 5°C	+/- 5 °C
Compuestos Fenólicos	1.0	0.5
Sólidos disueltos totales		500.0
Sólidos suspendidos totales	60.0	
Colifecales (NMP/100ml)	1000.0	
Aceites y grasas	10.0	
DB05	80.0	
DQ0	250.0	
Amonio como Nitrógeno	4.0	2.0
Sulfuros	2.0	1.0
Nitratos como Nitrógeno		10
Endrin		0.0002
Lindano		0.004
Metoxicloro		0.1
Toxafeno		0.005
Trihalometanos totales		0.1
Plata		0.1
Selenio		0.01

(*) Rango de variabilidad con relación a la temperatura media del cuerpo receptor

Diaria: Hace referencia a la toma de muestra por un periodo de 24 horas en un día para realizar la medición del parámetro en la descarga líquida.

Mensual: Es el promedio mensual para 30 días de la medición diaria.