

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

**DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE FORMACIÓN POR
ELECTROCOAGULACIÓN**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN PETRÓLEOS**

SALAZAR RODRIGUEZ ALEX DALTON

alex.salazar@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. PABLO BENALCÁZAR. R

pablo.benalcazar@epn.edu.ec

Quito, 2023

DECLARACIÓN

Yo, Alex Dalton Salazar Rodríguez, declaro bajo juramento que el trabajo descrito a continuación es de mi autoría, que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; Tomando en cuenta que he consultado en referencias bibliográficas que se incluyen en la fuente en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de propiedad intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

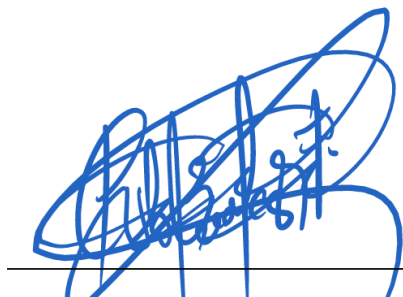


Alex Dalton Salazar Rodríguez

C.I: 1723438212

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Alex Dalton Salazar Rodríguez,
bajo mi supervisión.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Pablo Benalcázar', written over a horizontal line.

Ing. Pablo Benalcázar
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A Dios, por todas las bendiciones recibidas y hacer posible que hace unos años tan solo era un sueño y ahora es una grandiosa realidad.

A mi padre Darwin Salazar y madre Mireya Rodríguez que fueron el pilar en mi vida y en mi formación académica, gracias por el amor y el apoyo incondicional desde el inicio hasta el último día, sus palabras de aliento fueron las fuerzas que nunca me dejaron caer, por jamás soltar mi mano y me dieron la oportunidad de ser la persona que soy ahora.

A mi hermano Mario, porque en ti siempre veía un espejo en el cual debía ser ejemplo para ti.

A mi tía Nancy, por ser el impulso de jamás darme por vencido, por tu constante apoyo y cariño en cada etapa.

A mis abuelitos, por su cariño, sus buenos deseos y la felicidad.

A Madeline, gracias por todo el cariño que me has dado y ser un apoyo incondicional, he aprendido tanto a tu lado que siempre serás mi motivación e inspiración.

Al Ingeniero Pablo Benalcázar, por ser mi director, apoyarme en todo momento desde que inicie en el trabajo de titulación, por sus consejos, amistad y apoyo.

A Michelle que a poco tiempo de conocerte te has convertido en mi mejor amiga que siempre desde el inicio me brindaste tu ayuda, tu guía y palabras de ánimo para continuar mi día a día.

A la ESCUELA POLITECNICA NACIONAL e Ingenieros, por sus conocimientos, enseñanzas y paciencia.

A todos mis compañeros politécnicos, por ser mi segunda familia, apoyo y la gran amistad que formamos, en especial a mis hermanos petroleros.

Alex Salazar

DEDICATORIA

A mis padres Darwin y Mireya, porque sin ellos no pudiera cumplir cada meta que me he propuesto gracias, A mi hermano Mario, por ser el más grande motivo de ser ejemplo para ti,
A mi tía Taty, que siempre fue un ejemplo de constancia y perseverancia en mí.

Alex Salazar

CONTENIDO

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	1
CERTIFICACIÓN.....	3
AGRADECIMIENTO.....	4
DEDICATORIA.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE TABLAS	10
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	11
RESUMEN	12
ABSTRACT	14
INTRODUCCIÓN.....	16
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	1
1.2.1. Objetivo General.....	1
1.2.2. Objetivos específicos.....	1
CAPÍTULO 2	2
MARCO TEÓRICO.....	2
2.1. Electroquímica.....	2
2.2. Electrólisis	2

2.2.1.	Celda electrolítica.....	3
2.3.	Celdas electroquímicas	3
2.3.1.	Celdas galvánicas	4
2.4.	Tratamiento Electroquímico	4
2.4.1.	Características	5
2.4.2.	Económica	5
2.4.3.	Seguridad	5
2.4.4.	Versatilidad	5
2.4.5.	Selectividad	6
2.4.6.	Compatibilidad ambiental.....	6
2.5.	Electrocoagulación	6
2.5.1.	Proceso de electrocoagulación	7
2.6.	Factores que afectan la electrocoagulación.....	10
2.6.1.	pH.....	11
2.6.2.	Electrodo.....	11
2.6.3.	Tiempo	11
2.6.4.	Variable eléctrica	11
2.6.5.	Espaciamiento entre electrodos en la electrocoagulación	12
2.6.6.	Arreglo de electrodos.....	12
2.7.	Ventajas	14
2.8.	Desventajas	14
2.9.	Leyes de Faraday	14
2.9.1.	Primera ley de Faraday	15
2.9.2.	Segunda ley de Faraday	16

2.10.	Corriente alterna	17
2.11.	Corriente continua.....	17
2.12.	Diodo rectificador	18
2.13.	Potencial Zeta.....	19
2.13.1.	Modelo de la doble capa	19
2.14.	Coloides.....	21
CAPÍTULO 3		21
DESARROLLO DEL TEMA		21
3.1.	Materiales y métodos	22
3.2.	Análisis físico-químico de las aguas tratadas.....	27
3.2.1.	pH.....	27
3.2.2.	Dureza total.....	27
3.2.3.	Hierro total.....	28
3.2.4.	Conductividad	28
3.2.5.	Cloruros.....	28
3.2.6.	Sólidos suspendidos totales	29
3.2.7.	DQO.....	29
CAPÍTULO 4		30
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		30
4.1.	Análisis de costos	40
4.2.	Discusión de resultados	44
CAPÍTULO 5		46

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	46
5.1. CONCLUSIONES	46
5.2. RECOMENDACIONES.....	47
BIBLIOGRAFÍA.....	49
ANEXOS.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Cuba electrolítica donde se produce la electrólisis.....</i>	3
<i>Figura 2. Celda galvánica.....</i>	4
<i>Figura 3. Proceso de electrocoagulación.....</i>	10
<i>Figura 4. Diferentes modos de conexión de electrodos.....</i>	13
<i>Figura 5. Primera ley de Faraday</i>	15
<i>Figura 6. Segunda ley de Faraday.....</i>	16
<i>Figura 7. Corriente alterna</i>	17
<i>Figura 8. Corriente continua.....</i>	18
<i>Figura 9. Diodo rectificador</i>	18
<i>Figura 10. Potencial Z.....</i>	19
<i>Figura 11. Capas de un coloide.....</i>	20
<i>Figura 12. Distribución del tamaño de las partículas en el agua.....</i>	21
<i>Figura 13. Equipos utilizados en el proceso de electrocoagulación.....</i>	24
<i>Figura 14. Prueba de electrocoagulación.....</i>	25

Figura 15. Electrodo de hierro.....	26
Figura 16. Electrodo de aluminio.	27
Figura 18. Variación del pH con ánodo de aluminio.	31
Figura 19. Variación de la conductividad con ánodo de hierro.	32
Figura 20. Variación de la conductividad con ánodo de aluminio.....	33
Figura 21. Variación del contenido de hierro total con ánodo de hierro.....	34
Figura 22. Variación del contenido de hierro total con ánodo de aluminio.	34
Figura 23. Porcentaje de remoción del DQO con ánodo de hierro.	35
Figura 24. Porcentaje de remoción del DQO con ánodo de aluminio.	36
Figura 25. Dureza total ánodo de hierro.	37
Figura 26. Dureza total ánodo de aluminio.....	37
Figura 27. Contenido de cloruros ánodo de hierro	38
Figura 28. Contenido de cloruros ánodo de aluminio.....	39
Figura 29. Sólidos suspendidos totales ánodo de hierro.....	40
Figura 30. Sólidos suspendidos totales ánodo de aluminio	40
Figura 31. Costos operacionales con material de aluminio	43
Figura 32. Costos operacionales con material de hierro.....	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ensayos realizados	22
Tabla 2. Dimensiones electrodo de hierro	25

Tabla 3. Dimensiones electrodo de aluminio.....	26
Tabla 4. Costo de materiales	41
Tabla 5. Costos de equipos maniobrados.....	41

ÍNDICE DE ECUACIONES

CAPÍTULO 2

Ecuación ánodo de hierro:	8
Formación hidróxido férrico:.....	8
Reacción en cátodo de aluminio:.....	8
Ecuación ánodo de hierro:	8
Formación hidróxido ferroso:	9
Reacción en cátodo de aluminio:.....	9
Reacción ánodo de aluminio	9
Formación de hidróxido de aluminio:.....	9
Reacción en cátodo de hierro:	9
Ecuación de la primera Ley de Faraday:	15
Ecuación Segunda Ley de Faraday:	16
Ecuación consumo energético:	41
Ecuación consumo de energía del electrodo:	42
Ecuación desgaste del electrodo:.....	42
Ecuación costos de operación:.....	43

RESUMEN

El trabajo tuvo como objetivo entender el proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales en específico para agua de formación del campo petrolero de Lago Agrio Norte mediante la electroquímica, que es un método sencillo y económico.

Se trabajó con un equipo de prueba adaptado en base a la información de bibliográfica previamente revisada y analizada con el ingenio del profesor tutor. El equipo constituye una celda electrolítica con capacidad de doce litros, electrodos de hierro y aluminio, lagartos de conexión, variador de voltaje y agua residual. Que, de acoplar cada uno de los componentes de la celda como tal, se procedió a realizar la parte experimental alternando el ánodo de sacrificio para observar el resultado que se obtendría en cada situación.

Dentro de la fase experimental se tiene dos variables importantes que ayudan a entender el proceso electroquímico, y que son variación de tiempo y variación de voltaje; ya que con estos se puede determinar un tiempo y un voltaje en el que el resultado será fácilmente comparado con el resto de los ensayos. El desarrollo de la propuesta de este trabajo implicó la construcción de un sistema de pruebas de electrocoagulación y su posterior ajuste a un proceso continuo de tratamiento. El proceso experimental permitió el empleo de varios tipos de electrodos tomando en cuenta las distintas distancias entre ellos variando el flujo de la densidad de corriente.

El sistema en general requirió una etapa de tratamiento y acondicionamiento previo del agua a tratar, seguido del proceso de electrocoagulación, sedimentación, separación de los flóculos generados y la consecuente generación de la línea de flujo hacia una etapa de almacenamiento del agua tratada.

Además, pruebas para determinar la calidad del agua tratada ya que se espera esta pueda ser utilizada en procesos de reinyección en pozos que lo necesiten. Las pruebas realizadas fueron DQO, hierro total, sólidos totales, pH, conductividad, dureza total y cloruros, las cuales permitirán entender de mejor manera el resultado obtenido con dicho tratamiento de electrocoagulación.

Palabras clave: electrocoagulación, electroquímica, electrodo de hierro, electrodo de aluminio.

ABSTRACT

The objective of the work was to understand the electrocoagulation process for the treatment of wastewater, specifically for formation water from the Lago Agrio Norte oil field through electrochemistry, which is a simple and economical method.

We worked with an adapted test team based on previously reviewed and analyzed bibliographic information with the ingenuity of the tutor teacher. The equipment constitutes an electrolytic cell with a capacity of twelve liters, iron and aluminum electrodes, connection lizards, voltage variator and residual water. That, by coupling each of the cell components as such, the experimental part was carried out, alternating the sacrificial anode to observe the result that would be obtained in each situation.

Within the experimental phase there are two important variables that help to understand the electrochemical process, and that are time variation and voltage variation; since with these you can determine a time and a voltage in which the result will be easily compared with the rest of the tests. The development of the proposal for this work involved the construction of an electrocoagulation test system and its subsequent adjustment to a continuous treatment process. The experimental process allowed the use of several types of electrodes taking into account the different distances between them, varying the flow of current density.

The system in general required a stage of treatment and prior conditioning of the water to be treated, followed by the process of electrocoagulation, sedimentation, separation of the flocs generated and the consequent generation of the flow line towards a storage stage of the treated water.

In addition, tests to determine the quality of the treated water, since it is expected that it can be used in reinjection processes in wells that need it. The tests carried out were COD, total iron, total solids, pH, conductivity, total hardness and chlorides, which will allow a better understanding of the result obtained with said electrocoagulation treatment.

Keywords: electrocoagulation, electrochemistry, iron electrode, aluminum electrode.

INTRODUCCIÓN

La extracción del petróleo está asociada a problemas ambientales y manejo de residuos líquidos y sólidos. Entre los residuos líquidos están las aguas de formación, que deben ser tratadas para reinyección y recuperación secundaria, solucionando un problema de carácter ambiental el manejo de las aguas de formación con una carga de salinidad y de trazas metalizas indeseables para la salud humana.

A medida que los campos envejecen, su corte agua de formación se incrementa, siendo imperativo el manejo de procesos que minimicen los costos de tratamiento. Por lo tanto se evaluó el diseño de una planta de tratamiento del agua de formación por el método electroquímico, ya que “el agua residual industrial es difícil de tratar por la gran variedad en composición y la difícil degradación de algunos contaminantes presentes” (García-Segura, S. ,Eiband, MMSG, de Melo, JV y Martínez-Huitle, 2017)

La Industria Petrolera busca la reutilización del agua de formación proveniente de un yacimiento petrolero para maximizar sus ganancias y reducir sus costos de operación buscando nuevas tecnologías que ayuden a cumplir este propósito a corto, mediano y largo plazo, siempre considerando el adecuado manejo ambiental de cada proyecto para no afectar a la salud de quienes participan de esta industria.

El corte de agua del petróleo producido en el país marca una tendencia incremental, por lo que se convierte en un problema logístico, de facilidades de superficie y de gasto energético para el tratamiento, transporte e inyección del agua de formación.

Los actuales sistemas de tratamiento del agua de formación conllevan un costo operativo, hacia cuyo objetivo se enfocó en esta investigación; introduce una tecnología alternativa al empleo

de químicos para el tratamiento de las aguas de formación. Se trata de un proceso electroquímico.

La electrocoagulación se fundamenta en las leyes de Faraday y en la ley de Ohm sobre descomposición de los electrodos por acción de la corriente continua; las que pueden dosificarse en forma continua a una celda electrolítica, en la que existen los electrodos denominados ánodo y cátodo.

El proyecto está encaminado al diseño y dimensionamiento de una planta de tratamiento del agua de formación, en la que es posible eliminar parte de los minerales provenientes del reservorio mediante electricidad. Los materiales empleados reemplazan varios químicos utilizados en el tratamiento convencional; lo cual puede beneficiar económicamente a las empresas operadoras en el país.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La propuesta del trabajo nace de una pregunta de investigación y permite definir el tema del Trabajo de Titulación, así como establecer los objetivos de la investigación.

1.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿La utilización de la electroquímica en aguas de formación reduce los sólidos coloidales presentes en el agua proveniente de los campos petroleros?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

- Analizar el diseño de un tratamiento que permita la reinyección de las aguas de formación más importantes del proceso.

1.2.2. Objetivos específicos

- Comprobar el funcionamiento del electro-floculador por medio de aguas de formación provenientes de campos petroleros.
- Evaluar el proceso de flujo, tratamiento, sedimentación y almacenamiento de agua de formación tratada por electrocoagulación.
- Analizar el costo / beneficio del uso de ese método de tratamiento de aguas para la inyección de las mismas.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

1.3. Electroquímica

La electroquímica es el estudio de las reacciones químicas que dan origen a la producción de una corriente eléctrica; es decir, que estas se producen por el paso de una corriente eléctrica (Streber, 1983). Estas reacciones oxidación/reducción se dan en la superficie de un conductor de electrones y un conductor iónico, donde se efectúa la transferencia de electrones entre el electrodo y el electrolito (Yaguana & Almeida, 2015).

Durante la reacción un átomo o ion cede un electrón o átomo que da paso a la oxidación, y quien recibe el electrón con carga negativa pasa a disminuir su estado de oxidación. Ambos procesos de oxidación y reducción siempre ocurren de una manera tal que una especie se oxida y la otra se reduce.

Dentro de la electroquímica se tienen dos divisiones: electrolisis (celdas electrolíticas) y celdas electroquímicas (celdas galvánicas) (Yaguana & Almeida, 2015).

1.4. Electrólisis

En la electrólisis suceden una serie de procesos físicos y químicos que descomponen las sustancias presentes en las aguas residuales dentro de la celda electrolítica. Estos procesos se pueden describir de la siguiente manera:

Dentro de la celda electrolítica se dispone de un ánodo y cátodo donde se produce iones negativos que se dirigen al ánodo e iones positivos que se dirigen hacia el cátodo. El ánodo provee iones metálicos. Este electrodo es conocido como electrodo de sacrificio, donde la placa metálica que lo conforma se disuelve (Yaguana & Almeida, 2015).

Los iones que se producen cumplen con la función de desestabilizar las cargas que poseen las partículas contaminantes presentes en el agua residual; al momento que estas cargas han sido

neutralizadas, el sistema que mantiene las partículas en suspensión desaparece, lo que permite la formación de agregados de los contaminantes iniciando así el proceso de coagulación.

Durante la electrocoagulación los electrodos proveen de iones que, desencadenan los iones que proveen los electrodos los cuales provocan una cadena de eliminación de contaminantes que se da por dos vías (Yaguana & Almeida, 2015):

2.1.1. Celda electrolítica

Procesos físicos de agregación de coloides que en base a su densidad pueden flotar o precipitarse (Yaguana & Almeida, 2015). En la figura 1 se muestra el proceso de la celda electrolítica donde se observa que ambos electrodos están conectados mediante lagartos de conexión a una fuente de corriente directa.

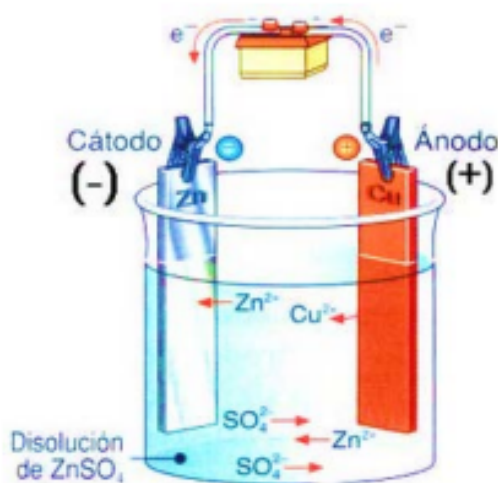


Figura 1. Celda electrolítica donde se produce la electrólisis.
Fuente: (Educa Madrid, 2022)

1.5. Celdas electroquímicas

Dispositivo capaz de obtener energía eléctrica para producir cambios químicos, es decir, la electroquímica estudia la conversión entre la energía eléctrica y la energía química.

2.1.2. Celdas galvánicas

La celda galvánica, voltaica o simplemente pila, se genera corriente eléctrica teniendo como fuente una reacción química.

El funcionamiento se desarrolla en dos recipientes que contiene cada uno un electrolito, conectados a través de un puente salino en el cual contiene un electrodo. Un electrodo desprenderá sus átomos al estar en contacto con el electrolito, y los electrones fluirán de un lado para el otro por medio de un conductor (Yaguana & Almeida, 2015). En la figura 2 se encuentra el proceso de la celda galvánica.

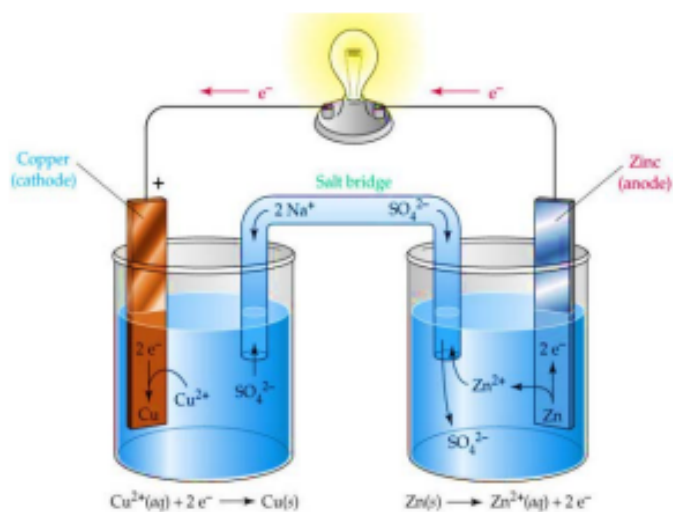


Figura 2. Celda galvánica.
Fuente: (Educa Madrid, 2022)

1.6. Tratamiento Electroquímico

El uso de electricidad para tratar aguas residuales tiene una larga continuidad, siendo utilizada por primera vez en Inglaterra en 1889. Los procesos electrolíticos en la recuperación de metales fueron patentados por Elmore en 1904 y el proceso de electrocoagulación (EC) con aluminio y hierro fue patentado en Estados Unidos en 1909. Este tipo de tratamiento electroquímico no es una nueva tecnología, aunque ha sido poco desarrollada y estudiada, pero en los últimos años se está empleando estos procesos en las diferentes industrias que producen aguas residuales o

aguas contaminadas con metales pesados ya que ayudan a su eliminación, o también en la eliminación de bacterias (Madrid blogs, 2010 & Beltrán, 2015).

1.7. Características

El tratamiento electroquímico presenta características que lo identificamos como un proceso con muchas ventajas:

2.1.3. Económica

El tratamiento se presenta como una tecnología de bajo costo; sin embargo, el emplear un diseño adecuado acorde a las necesidades del proceso productivo puede variar su coste final con variables como, tamaño de la celda electrolítica, consumo energético, electrodos de hierro o aluminio y la distancia entre electrodos (Gil, 2012).

2.1.4. Seguridad

El tratamiento es seguro en su desarrollo ya que en este proceso no es necesario almacenar ni utilizar reactivos químicos (Gil, 2012).

2.1.5. Versatilidad

Con el mismo sistema de tratamiento es posible eliminar diferentes compuestos tóxicos contenidos en las muestras que se disponen, sin tener que realizar mayores cambios en la celda electrolítica o en los electrodos empleados (Gil, 2012).

2.1.6. Selectividad

Es práctico porque existe la posibilidad y la facilidad de poder controlar el potencial eléctrico, hacia el o los electrodos utilizados; es decir, ánodo o cátodo, y poder realizar la reacción electroquímica deseada (Gil, 2012).

2.1.7. Compatibilidad ambiental

Si el proceso electroquímico se diseña de manera adecuada, ya que los compuestos tóxicos pueden ser convertirlos en productos de bajo o nulo impacto hacia el medio ambiente, se la considera una tecnología limpia y ecológica ya que no se utiliza reactivos químicos; es decir, su principal reactivo es el electrón (Gil, 2012).

1.8. Electrocoagulación

De los procesos electrolíticos en la recuperación de metales, patentada por Elmore en 1904, el proceso de electrocoagulación (EC) se empezó a utilizar en Estados Unidos desde el año 1906. Anteriormente en Webstter, Inglaterra, se tiene un registro del primer ensayo realizado con ánodos de hierro soluble, para una de caída potencial de 1.8 vatios entre los electrodos, con una distancia de una pulgada y una corriente anódica de $0.6 A/ft^2$ (Restrepo et al, 2006)

El proceso electroquímico de desestabilización de partículas, que pueden ser emulsionadas, suspendidas o disueltas, es similar a un tratamiento químico típico de coagulación.

Este tratamiento tiene por objetivo la desestabilización de las microgotas de aceite contenidas en el agua, donde se puede diferenciar el modo de adición del reactivo; en coagulación convencional el reactivo se añade como sal; y, en electrocoagulación se genera a partir de un metal de los cuales el aluminio y el hierro son los más utilizados (Cantera, 2013).

Desde entonces se le conoce a la electrocoagulación como una tecnología alternativa para el tratamiento de aguas de solución ambiental, por lo cual se ha analizado bajo diferentes

condiciones de operación, sean físicas o químicas, donde se han obtenido buenos resultados (Beltrán, 2015).

2.1.8. Proceso de electrocoagulación

La electrocoagulación se utiliza para la separación de metales, sólidos en suspensión, compuestos orgánicos emulsionados y contaminantes presentes en las aguas residuales. Además, el ablandamiento químico se emplea comúnmente en los sistemas de tratamiento de aguas para eliminar la dureza; el proceso se realiza aplicando una serie de electrodos inmersos en la celda (Beltrán, 2016 & Esmailirad et al, 2014).

El sistema de electrocoagulación está compuesto por una celda electrolítica en donde se lleva a cabo todo el proceso electroquímico, que contiene electrodos divididos en ánodos y cátodos por los que circula corriente eléctrica. El arreglo de los electrodos es de forma monopolar, es decir, con la polaridad intercalada, con una fuente de alimentación de corriente directa que suministra la energía eléctrica necesaria para la electrocoagulación (Piña et al, 2011 & Beltrán 2016).

En la coagulación química el coagulante es adicionado como un agente químico, a diferencia de la electrocoagulación donde el coagulante es formado *in situ* mediante las reacciones producto de la disolución de iones del metal que conforma el ánodo. Esta producción de iones metálicos se da en el ánodo y son los iones que, por oxidación electrolítica, dan origen a la sustancia química que hace las veces de coagulante.

Según (Mohllah et al., 2004), se considera que durante el proceso de la electrocoagulación intervienen tres etapas:

- Se forma el coagulante por oxidación electrolítica del electrodo de sacrificio.
- Desestabilización de los contaminantes y emulsiones.
- Formación de flóculos por agregación de partículas del contaminante o adsorción de estas en el coagulante.

Las reacciones que se dan en la electrocoagulación se deben a los materiales utilizados como electrodos de aluminio y hierro. En el trabajo de titulación se utilizaron estos materiales; a continuación, las reacciones del proceso:

Cuando el electrodo de hierro actúa como ánodo, se proponen dos mecanismos que explican la formación *in situ* de dos posibles coagulantes; que pueden ser hidróxido ferroso $Fe(OH)_2$ o hidróxido férrico $Fe(OH)_3$ (Restrepo et al. 2006).

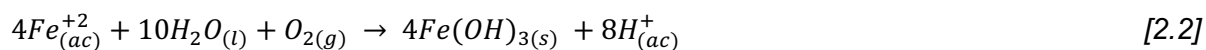
Primer Mecanismo: Formación de hidróxido férrico

En el ánodo ocurren las siguientes reacciones:

Ecuación ánodo de hierro:



Formación hidróxido férrico:



En el cátodo ocurre la reacción:

Reacción en cátodo de aluminio:



Segundo Mecanismo: Formación de hidróxido ferroso

En el ánodo se dan las siguientes reacciones

Ecuación ánodo de hierro:



Formación hidróxido ferroso:



En el cátodo:

Reacción en cátodo de aluminio:



Luego de la formación de los hidróxidos de hierro los coloides se aglomeran, en especial aquellos que disponen de carga negativa, posteriormente a esto otras partículas de contaminantes interactúan con estos aglomerados siendo removidos por formación de complejos o atracciones electrostáticas (Restrepo et al., 2006).

Cuando el aluminio actúa como el ánodo, se tienen las siguientes reacciones:

En el ánodo:

Reacción ánodo de aluminio

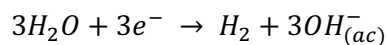


Formación de hidróxido de aluminio:



En el cátodo:

Reacción en cátodo de hierro:



[2.9]

En los procesos de precipitación se forma el $Al(OH)_{3(s)}$ como se muestra en la reacción del ánodo, esta sustancia amorfa de carácter gelatinoso expone una gran área superficial con propiedades absorbentes y que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes (Restrepo et al, 2006). Ver en la figura 3 el proceso de electrocoagulación.

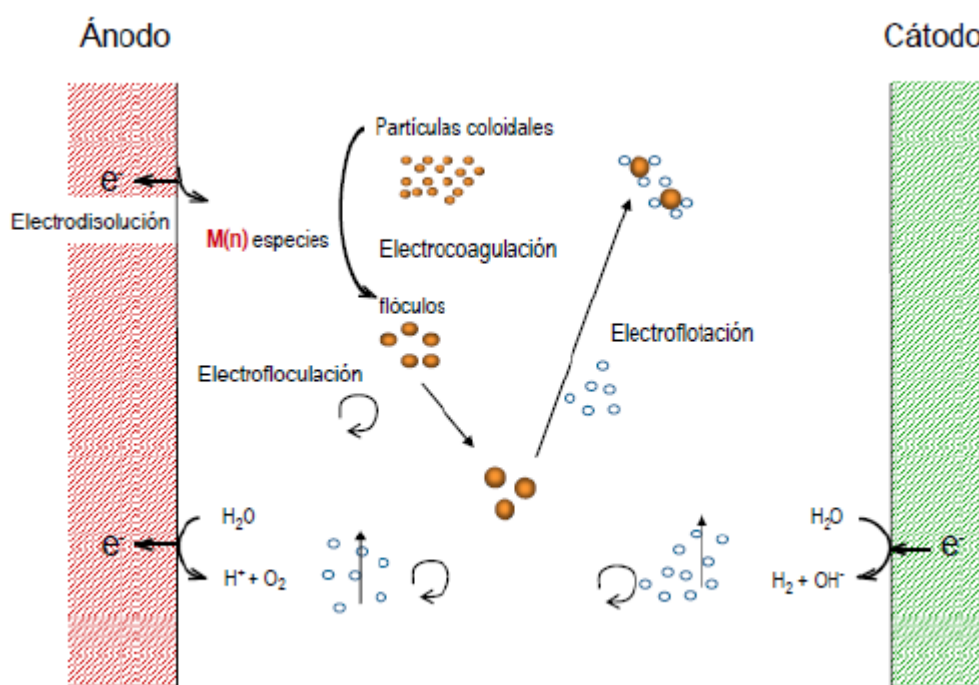


Figura 3. Proceso de electrocoagulación.
 Fuente: (Martínez, 2007)

1.9. Factores que afectan la electrocoagulación

Los factores más influyentes dentro del proceso de electrocoagulación son:

2.1.9. pH

En las investigaciones realizadas en los últimos años se ha observado que el pH durante el proceso de electrocoagulación varía dependiendo del tipo de material de los electrodos y del tipo de agua residual a tratar (Arango, 2012).

El pH, durante el proceso, puede incrementarse para aguas residuales ácidas (Mejía y Osorio, 2003) efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo (Kumar et al. 2004). Mientras tanto, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer en función de la química (naturaleza) del contaminante (Arango, 2012).

2.1.10. Electrodo

Variable enfocada en las características físicas químicas del material utilizado; los más empleados según información de la bibliografía, son de hierro y aluminio, hace referencia al potencial electrostático que desarrolla la interacción entre el tipo de metal de los electrodos en la celda electrolítica (Beltrán, 2015 & Martínez, 2007).

2.1.11. Tiempo

La variable de consideración es el tiempo debido a que la disolución del metal anódico por flujo de corriente viene dada por una correcta selección del mismo para que el tratamiento resulte ser más eficiente (Beltrán, 2015).

2.1.12. Variable eléctrica

Las variables eléctricas a considerar son; la aplicación de voltaje y la corriente eléctrica ya que sirven para determinar el tipo de alimentación y el proceso de electrocoagulación funcione. La eficiencia en la remoción y el consumo de energía se incrementan con el aumento de consumo eléctrico produciendo una pérdida por la transformación de energía eléctrica en calórica aumentando la temperatura en el proceso de electrocoagulación (Beltrán, 2015).

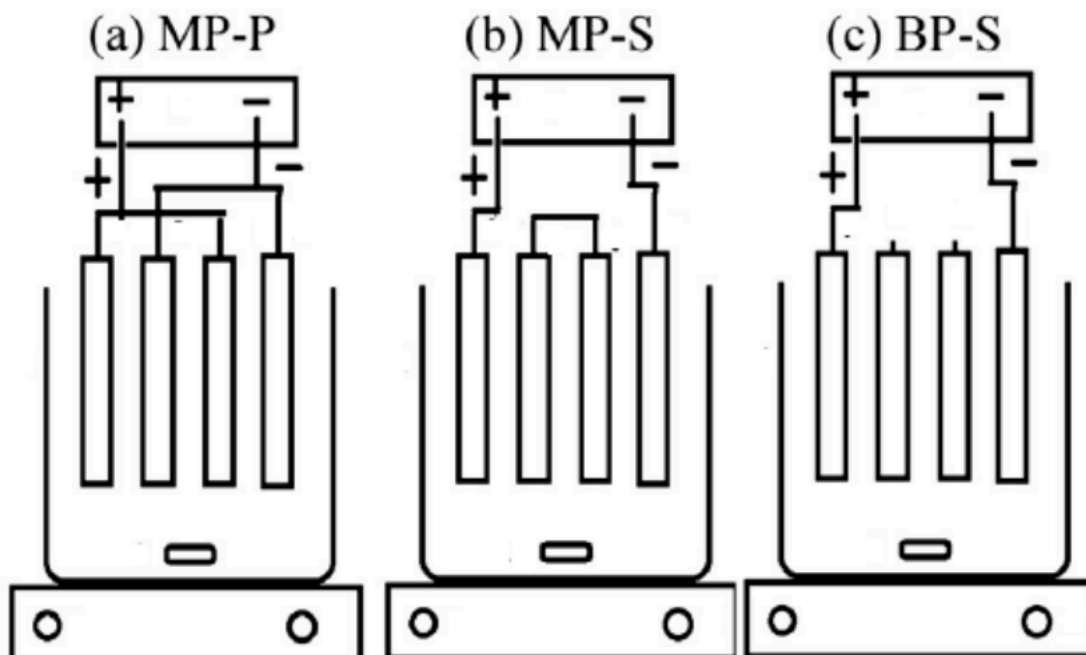
2.1.13. Espaciamiento entre electrodos en la electrocoagulación

La resistencia eléctrica es proporcional a la distancia entre electrodos, a mayor distancia habrá mayor resistencia al paso de corriente. Estudios previos determinan que la distancia varia de 5 mm a 3 cm obteniéndose buena remoción de contaminantes; es importante determinar la distancia óptima para un efluente específico (Phlakornkule, Polgumhang & Tongdaung, 2009).

Al existir el aumento en la distancia de los electrodos sobre la distancia optima, ocurre una reducción en cuanto a la eficiencia de eliminación de contaminantes. Esto se debe a que el tiempo que se produce en el viaje de los iones aumenta lo que produce una disminución de la atracción electrostática, lo que da como resultado una menor formación de flóculos para coagular el contaminante (Yaguana & Almeida, 2015).

2.1.14. Arreglo de electrodos

El modo de conexión que se da entre los electrodos y el material que se escoge para realizar el tratamiento electroquímico contribuye a un papel esencial en el análisis del costo de dicho proceso (Koyba, 2010). En la figura 4, los tres diferentes modos de conexión de electrodos:



*Figura 4. Diferentes modos de conexión de electrodos.
Fuente: (Khandegar, 2013)*

Conexión en paralelo en electrodos monopolares (MP-P): Tanto los ánodos y cátodos se encuentran conectados en paralelo debido a que el paso de corriente se distribuye entre todos los electrodos a la resistencia de las células individuales. Esta conexión necesita un diferencial de potencial más bajo en comparación con las conexiones en serie y además es efectiva cuando los electrodos son de aluminio o hierro (Yaguana & Almeida, 2015 & Koyba, 2011).

Conexión en serie de electrodos monopolares (MP-S): En este tipo de conexión de electrodos monopolares en serie, cada par se encuentra conectado internamente entre sí. Esta conexión necesita un diferencial de potencial más alto para una corriente dada debido a que existe una adición en las células (Yaguana & Almeida, 2015).

Conexión en serie de electrodos bipolares (BP-S): En este modo de conexión los electrodos que se encuentran en los extremos se encuentran conectados a la fuente de energía y no existe una conexión eléctrica entre los electrodos internos (Yaguana & Almeida, 2015).

1.10. Ventajas

- Dependiendo el tipo de líquido, ya sea alcalino o ácido, la electrocoagulación ayudará a disminuir o aumentar respectivamente su pH.
- Los costos de operación son menores en comparación a otros procesos convencionales usando productos químicos.
- Facilidad para automatizar el proceso.
- No dispone partes mecánicas, por lo cual requiere menos mantenimiento.
- Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminante.
- Requiere de equipos simples y de fácil operación.

Este proceso es favorecido por el paso de corriente eléctrica el cual genera movimiento de las partículas más pequeñas del contaminante, incrementando la coagulación.

1.11. Desventajas

- Los electrodos de sacrificio se deben reponer conforme estos se vayan utilizando, lo que genera costos adicionales como mantenimiento y limpieza continua de electrodos.
- Este tratamiento puede ser muy costoso en lugares donde la energía eléctrica representa un costo relativamente 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.

1.12. Leyes de Faraday

2.1.15. Primera ley de Faraday

En la electrolisis la masa de un elemento liberado o depositado en un electrodo durante el proceso de electrolisis es directamente proporcional a la cantidad de la electricidad suministrada la cual pasa a través de la solución (Lower, 2004); que, se representa con la relación:

$$m \propto I \cdot t$$

Ecuación de la primera Ley de Faraday:

$$m = Z \cdot I \cdot t \quad [2.10]$$

Donde:

m: masa depositada o liberada del electrodo (g)

I: intensidad de corriente ($C \cdot s^{-1}$)

t: tiempo (s)

Z: constante de equivalencia electroquímica ($g \cdot C^{-1}$)

En la siguiente figura 5 se representa la primera Ley de Faraday:

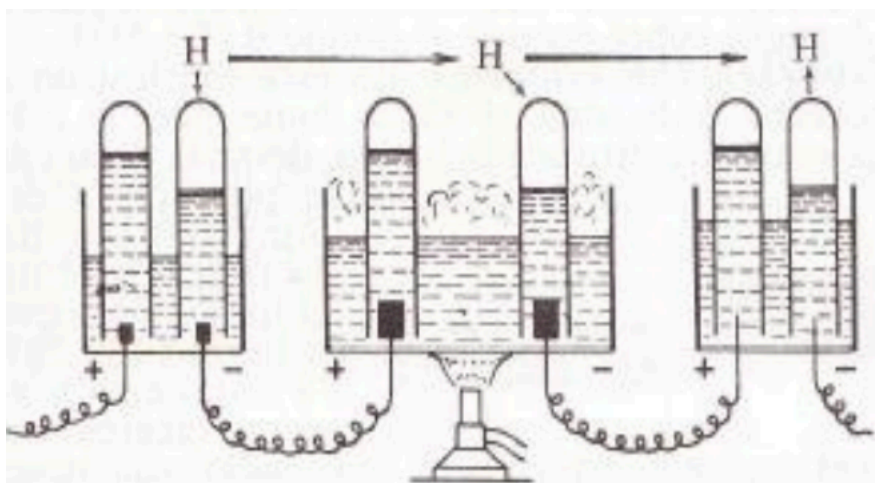


Figura 5. Primera ley de Faraday
Fuente: (Jaramillo, 2012)

La constante de equivalencia electroquímica se define como la cantidad de sustancia liberada o depositada cuando un culombio de carga eléctrica pasa a través de la solución electrolítica.

2.1.16. Segunda ley de Faraday

La cantidad de sustancias formadas en un electrodo es proporcional a la cantidad de cargas que pasan a través de sistema, y el número total de moles de la sustancia formada en un electrodo está relacionado estequiométricamente con la cantidad de electricidad puesta en el sistema (Beltrán, 2014).

Ecuación Segunda Ley de Faraday:

$$m = \frac{i \cdot t \cdot PM}{F \cdot e} \quad [2.11]$$

m = masa de la sustancia producida por el electrodo ($g \cdot cm^{-2}$)

i = Corriente eléctrica ($A \cdot cm^{-2}$)

t = tiempo transcurrido (s)

PM = peso molecular del electrodo ($g \cdot gmol^{-1}$)

e = número de electrones a reducir u oxidar

F : constante de Faraday ($96485 C \cdot gmol^{-1}$)

En la siguiente figura 6 se representa la segunda Ley de Faraday:

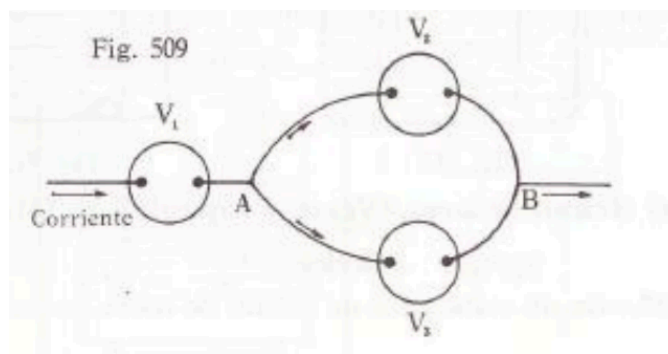


Figura 6. Segunda ley de Faraday
Fuente: (Jaramillo, 2012)

1.13. Corriente alterna

La **corriente alterna (CA)** es un tipo de corriente eléctrica, en la que la dirección del flujo de electrones va y viene a intervalos regulares o en ciclos. La corriente que fluye por las líneas eléctricas y la electricidad disponible normalmente en las casas procedente de los enchufes de la pared es corriente alterna (*Scientific Committes*). Como se puede observar en la figura 7.

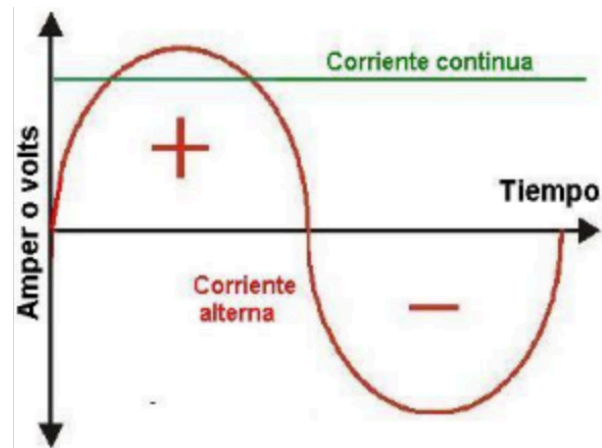


Figura 7. Corriente alterna
Fuente: (Monografías)

1.14. Corriente continua

La corriente directa (CD) o corriente continua (CC) es aquella cuyas cargas eléctricas o electrones fluyen siempre en el mismo sentido en un circuito eléctrico cerrado, moviéndose del polo negativo hacia el polo positivo de una fuente de fuerza electromotriz (FEM), tal como ocurre en las baterías, las dinamos o en cualquier otra fuente generadora de ese tipo de corriente eléctrica (*Irazoque, 2014*). A continuación, se muestra la figura 8.

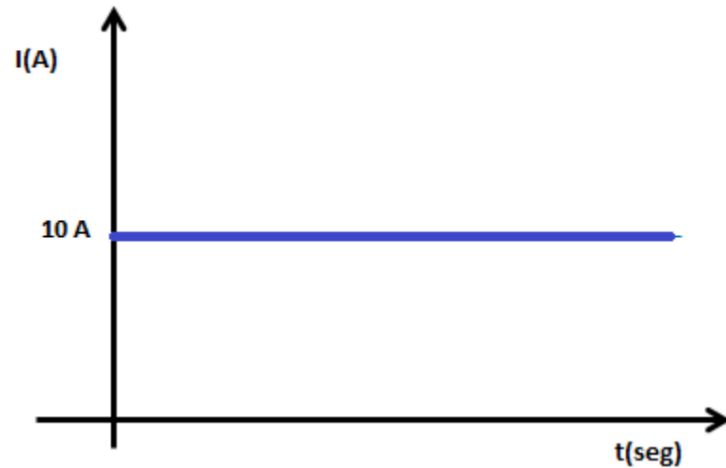


Figura 8. Corriente continua
Fuente: (Irazoque, 2014)

1.15. Diodo rectificador

El diodo rectificador es un dispositivo semiconductor que se utiliza para convertir la corriente alterna en corriente continua. Tiene una conductividad unidireccional evidente y puede fabricarse con materiales semiconductores como el germanio o el silicio.

Se utilizan muchos tipos de diodos para una amplia gama de aplicaciones. Los diodos rectificadores son un componente vital en las fuentes de alimentación, donde se utilizan para convertir la tensión alterna en tensión continua (*Electrónica online*). Se observa en la figura 9.

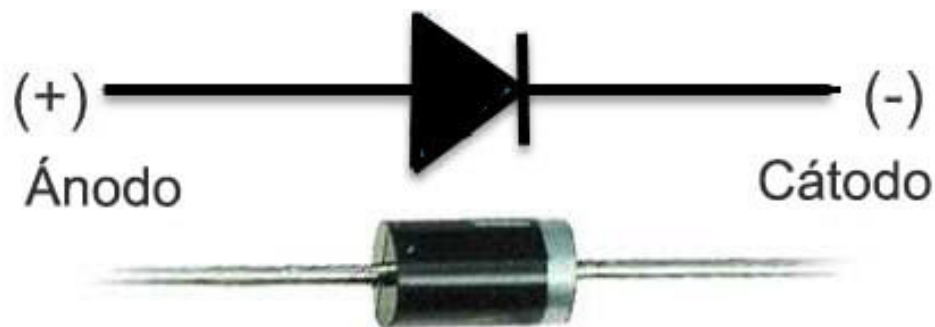


Figura 9. Diodo rectificador
Fuente: (*Electrónica online*)

1.16. Potencial Zeta

Un punto particular de interés es el potencial donde se unen la capa difusa y la de Stern. Este potencial es conocido como el potencial zeta, ya que este puede ser medido de una forma muy simple, mientras tanto que la carga que se ubica en la superficie y su potencial no se pueden medir. Además, puede ser una manera efectiva de controlar el comportamiento del coloide ya que indica cambios en el potencial de la superficie y en las fuerzas de repulsión de los coloides. El potencial zeta se refiere a la potencia electrostática que existe entre la separación de la capas que rodean a la partícula (Sandoval et al, 2000); ver figura 10 el potencial Z.

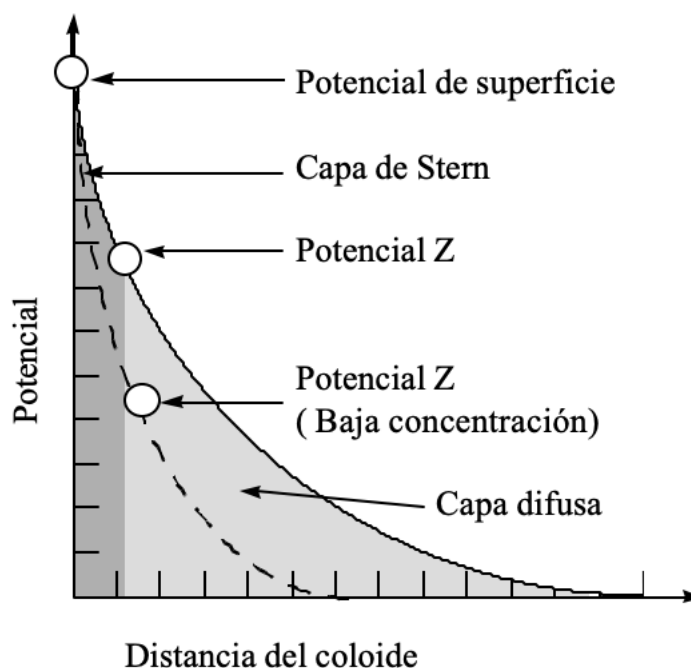


Figura 10. Potencial Z.
Fuente: (Sandoval et al, 2000)

2.1.17. Modelo de la doble capa

Este modelo se utiliza para visualizar la atmósfera iónica en la proximidad del coloide cargado y poder explicar cómo actúan las fuerzas eléctricas de repulsión. Para entender este modelo se puede visualizar como una secuencia de etapas que ocurren alrededor de un coloide negativo, si los iones que neutralizan sus cargas son repentinamente separados (Sandoval et al, 2000); ver figura 11 explicación de las capas de un coloide.

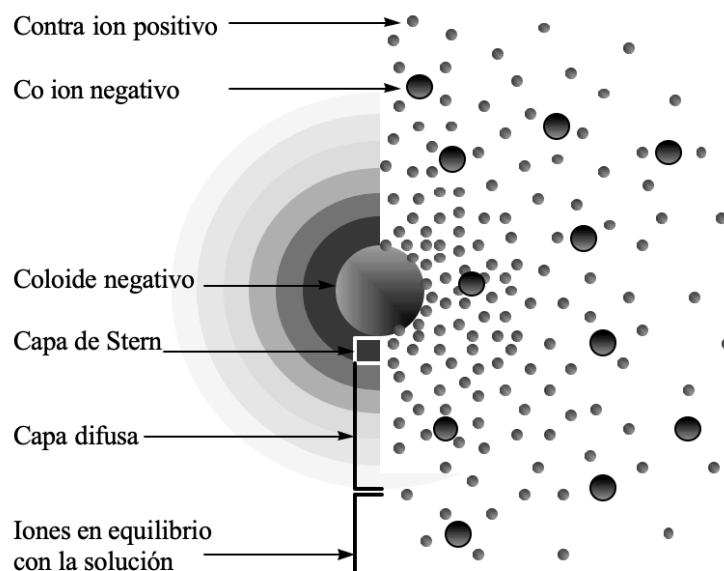


Figura 11. Capas de un coloide.
Fuente: (Sandoval et al, 2000)

Como se observa en la figura 11, la vista izquierda muestra el cambio en la densidad de carga alrededor del coloide, y la vista derecha muestra la distribución de los iones positivos y negativos alrededor del coloide cargado (Sandoval et al, 2000).

El ion positivo es denominado contraión en la solución. Al inicio, la atracción del coloide negativo hace que algunos iones positivos formen una rígida capa adyacente alrededor de la superficie del coloide; esta capa de contraiones se conoce como la capa de Stern.

Existe un equilibrio dinámico donde otros iones positivos son atraídos por el coloide negativo, pero estos son rechazados por la capa de Stern, y otros iones positivos que intentan acercarse al coloide. Este equilibrio resulta en la formación de la *capa difusa* de contraiones, estos tienen una alta concentración cerca de la superficie, la cual va disminuyendo gradualmente con la distancia hasta que logra un equilibrio con la concentración de contraiones en el seno de la disolución.

En la capa difusa existe un déficit de iones negativos, llamados *coiones* pues tienen la misma carga que el coloide. Esta concentración de iones se incrementa gradualmente al alejarse, mientras que las fuerzas repulsivas del coloide son compensadas por los iones positivos. Esta capa difusiva puede ser visualizada como una atmósfera cargada rodeando el coloide.

Los contraiones de la capa de Stern y de la capa difusa son los que juntos se denominan la doble capa. Este espesor depende del tipo y concentración de los iones de la solución (Sandoval et al, 2000).

1.17. Coloides

Los coloides tienen un tamaño intermedio entre las partículas en solución verdadera y las partículas en suspensión. Los límites se encuentran enumerados en la figura 12, son aproximados ya que el tamaño y la naturaleza del material son los que determinan si la partícula es coloidal (Ritcher, 1992).

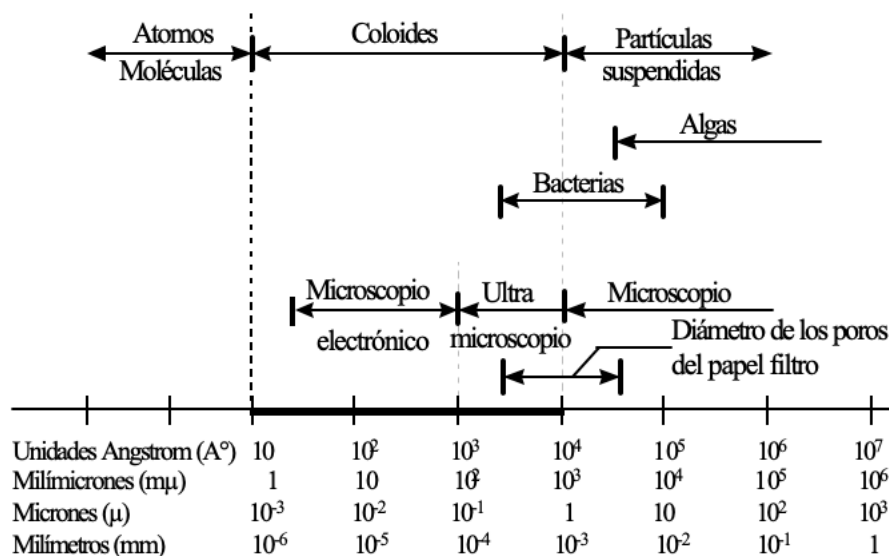


Figura 12. Distribución del tamaño de las partículas en el agua.
Fuente: (Arboleda, 1982)

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL TEMA

3.1. Materiales y métodos

La investigación se desarrolló empleando aguas de formación provenientes del campo de Lago Agrio Norte proporcionados por la empresa estatal Petroecuador; es decir, la empresa facilitó el agua residual. Al agua tratada se midieron los parámetros pH, DQO, dureza total, hierro total, conductividad, cloruros y sólidos suspendidos totales.

Para establecer los parámetros, primero se realizó una fase experimental donde se obtuvo el agua ya tratada proveniente del proceso electroquímico. Se tomó la muestra de cada uno de los ensayos descritos en la tabla 1.

HIERRO			ALUMINIO		
ENSAYO	TIEMPO (min)	INTENSIDAD (amperaje)	ENSAYO	TIEMPO (min)	INTENSIDAD (amperaje)
1	3	5	1	3	5
2	6	5	2	6	5
3	9	5	3	9	5
4	12	5	4	12	5
1	3	10	1	3	10
2	6	10	2	6	10
3	9	10	3	9	10
4	12	10	4	12	10
1	3	15	1	3	15
2	6	15	2	6	15
3	9	15	3	9	15
4	12	15	4	12	15

Tabla 1. Ensayos realizados.
Fuente: Alex Salazar, 2022

Después del proceso electroquímico, de cada uno de los ensayos se tomó 50 ml y se colocaron en botellas de plástico nuevas. Las muestras fueron tomadas de la zona en donde se

encontraban los electrodos para un mejor resultado al momento de medir los parámetros antes mencionados.

La electrocoagulación se realizó en una celda electrolítica cuyo material es plástico transparente con capacidad para 12 litros, provista de cuatro electrodos: 2 de hierro y 2 de aluminio con una distancia entre los electrodos de 2 cm dispuestos alternadamente y en forma paralela (MP-P), que se conectaron a una fuente de voltaje con control para la corriente entre 0 a 25 A.

El proceso se realizó de dos maneras, donde el electrodo de hierro actúa como ánodo de sacrificio y el electrodo de aluminio realiza la misma función durante los ensayos previstos para cada uno.

En la figura 13 se muestra una vista general de los equipos utilizados en el proceso de electrocoagulación para las aguas de formación. Donde se puede observar: un regulador de voltaje de 12 a 24 voltios, lagartos de conexión, electrodos de hierro y aluminio y el recipiente de plástico.



Figura 13. Equipos utilizados en el proceso de electrocoagulación.
Fuente: Alex Salazar, 2022

En la figura 14 se observa el proceso de electrocoagulación con los electrodos de aluminio y hierro conectados a la fuente de energía a través de los lagartos de conexión a las diferentes intensidades que se indican en la tabla 1 para los diferentes ensayos.



Figura 14. Prueba de electrocoagulación.
Fuente: Alex Salazar, 2022

Los electrodos de hierro se fabricaron como se observa en la figura 15, con las medidas según la tabla 2.

Especificación	Dimensiones (cm)
Altura	16.3
Largo	16.4
Ancho	2.3
Diámetro	2.54

Tabla 2. Dimensiones electrodo de hierro.
Fuente: Alex Salazar, 2022



Figura 15. Electrodo de hierro.
Fuente: Alex Salazar, 2022

De similar manera se fabricó dos electrodos de aluminio como se aprecia en la figura 16, con las medidas según la tabla 3.

Especificación	Dimensiones (cm)
Altura	16.3
Largo	16.4
Ancho	2.3
Diámetro	1.27

Tabla 3. Dimensiones electrodo de aluminio.
Fuente: Alex Salazar, 2022



Figura 16. Electrodo de aluminio.
Fuente: Alex Salazar, 2022

3.2. Análisis físico-químico de las aguas tratadas

El objetivo de llevar a cabo pruebas de laboratorio a las aguas de formación es con la finalidad de poder conocer las propiedades físicos-químicas para su posterior y correcto tratamiento.

3.2.1. pH

Medida relativa de acidez o alcalinidad de un agua. El pH es importante debido que se tiene un pH bajo (más ácido) la corrosión aumentará. La medición de este factor se tomó mediante el método electrométrico, empleando un pHmetro electrónico.

3.2.2. Dureza total

La dureza es causada por los cationes divalentes metálicos que son capaces de reaccionar con el jabón para formar precipitados y con ciertos aniones presentes en el agua para formar costras.

La dureza es la solución tanto de sales de calcio como de magnesio en forma de cationes y aniones, generalmente la dureza se la expresa en función del carbonato de calcio.

Esta prueba se basa en la determinación de calcio y magnesio en una muestra de agua por titulación con un agente secuestrante (ácido etilendiaminotraacético), en presencia de agente orgánico sensible a los iones de calcio y magnesio. La dureza total se da en mg/L.

3.2.3. Hierro total

El contenido de hierro disuelto generalmente es bajo en el agua de formación, valores altos indican corrosión. El cual puede estar disuelto en forma férrica o ferrosa (Fe^{+3} o Fe^{+2}), o también su puede encontrar en suspensión como precipitado de hierro. El contenido de hierro es usado para detectar o monitorear el grado de corrosión. El análisis se realizó mediante el kit Merck de ensayo colorímetro; es decir que, según la coloración, determina la cantidad de hierro en solución.

3.2.4. Conductividad

Comúnmente se usa para indicar la concentración total de los constituyentes ionizados.

3.2.5. Cloruros

El ion más predominante en el agua de formación, que la caracteriza; a su mayor fuente es el cloruro de sodio por lo que la concentración de cloruros es la medida de la salinidad de agua. Su presencia en el agua procede de la disolución de suelos y rocas que los contienen y que están en contacto con el agua.

La prueba está basada en la titulación del agua, que contiene el ion cloruro, con una solución estándar de nitrato de plata, el cromato de potasio es quien empieza a reaccionar con el agente titulante, generando una coloración rojiza propia del cromato de plata

3.2.6. Sólidos suspendidos totales

Los sólidos coloidales consisten en limo fino, bacterias, partículas causantes de color, virus, etc., que no sedimentan sino después de periodos razonables, y su efecto global se traduce en el color y la turbiedad de aguas sedimentadas sin coagulación. Los sólidos disueltos, materia orgánica e inorgánica, son invisibles por separado, no son sedimentables y globalmente causan diferentes problemas de olor, sabor, color y salud, a menos que sean precipitados y removidos mediante métodos físicos y químicos. El método se aplicó en el laboratorio para la matriz agua. Está validado para el intervalo de 4,5 a 20000 mg/L.

Es un método gravimétrico que se basa en la retención de las partículas sólidas en un filtro de fibra de vidrio a través del cual se hace pasar una muestra homogénea; el residuo que queda retenido se seca a 103-105°C. El incremento en el peso del filtro representa la cantidad de sólidos suspendidos totales.

3.2.7. DQO

Es la cantidad de oxígeno obtenido a partir de oxidantes químicos necesarios para la oxidación completa de sustancias disueltas o suspendidas en agua.

Su determinación permite evaluar cuantitativamente las sustancias oxidables por oxidantes fuertes como el dicromato de potasio en disoluciones fuertemente acidas de sulfúrico concentrado. La prueba consistió en una valoración por retroceso añadiendo una concentración conocida y en exceso de dicromato.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como parte del proyecto se obtuvieron los resultados que se visualizan en las diferentes figuras. Los valores obtenidos de las variables y propiedades fueron medidos en el laboratorio de la carrera de Ingeniería Ambiental (CICAM).

En las gráficas 17 y 18 se presentan los resultados de la variación del pH en el tratamiento electroquímico para tiempos de 3, 6, 9 y 12 minutos que corresponde al diseño experimental.

Para ambos casos de ánodos con los materiales de hierro y aluminio se observa una disminución de su pH inicial el cual tiene un valor de 8.2 donde en el caso del ánodo de hierro existe un mejor resultado al tiempo de 9 minutos con una intensidad de 10 amperios, mientras tanto en el ánodo de aluminio se tiene una relación directamente proporcional con la intensidad de 15 amperios a medida que avanza el tiempo la reducción del pH también se reduce.

Esto se produce debido a que ambos ánodos durante el tratamiento en cada electrodo se forma el coagulante que en el caso del aluminio es el hidróxido de aluminio y en el hierro el hidróxido de hierro que ayudan en la disminución del pH inicial del agua residual.

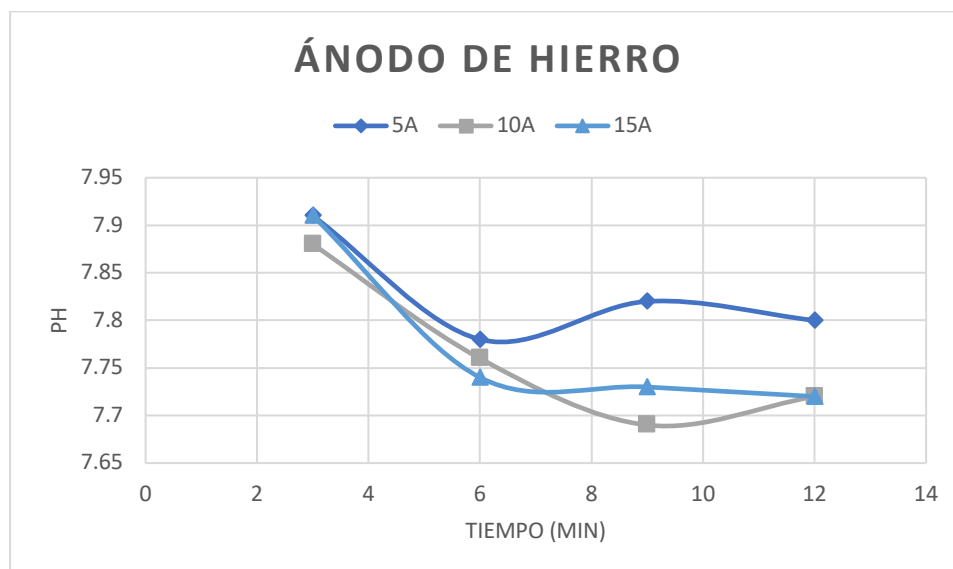


Figura 17. Variación del pH con ánodo de hierro. Tabla 1 anexos.
Elaborado por: Alex Salazar, 2022

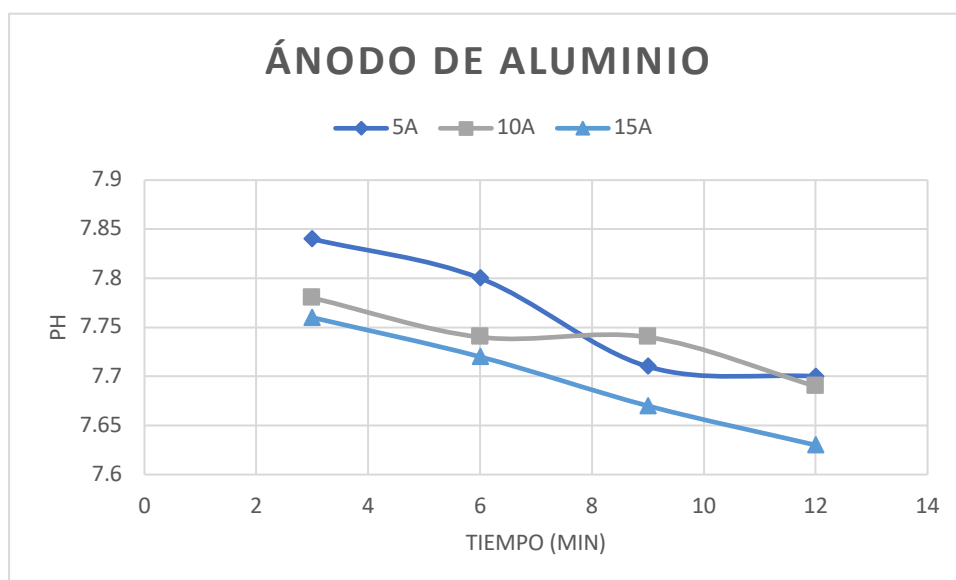


Figura 18. Variación del pH con ánodo de aluminio. Tabla 2 anexos.
Elaborado por: Alex Salazar, 2022

La conductividad del agua residual sin tratar tiene un valor de 30.8 mS/cm. Al observar las gráficas 19 y 20 para los ánodos de hierro y aluminio claramente se observa un aumento en la conductividad después del tratamiento electroquímico.

En la gráfica 19 el valor máximo que se obtiene es de 35.2 mS/cm a una intensidad de 15 amperios la cual empieza su aumento a partir de los 9 minutos, este caso se produce debido a la formación de flóculos durante el proceso de tratamiento; es decir, que a mayor intensidad de corriente existe mayor liberación de iones disueltos por parte del electrodo y se debe encontrar el punto adecuado de floculación.

Para el ánodo de aluminio en la gráfica 20 se observa el mismo comportamiento que en el ánodo de hierro; en este caso el flujo de corriente que pasa a través del sistema que disuelve el aluminio provocando el aumento de la conductividad en este ánodo.

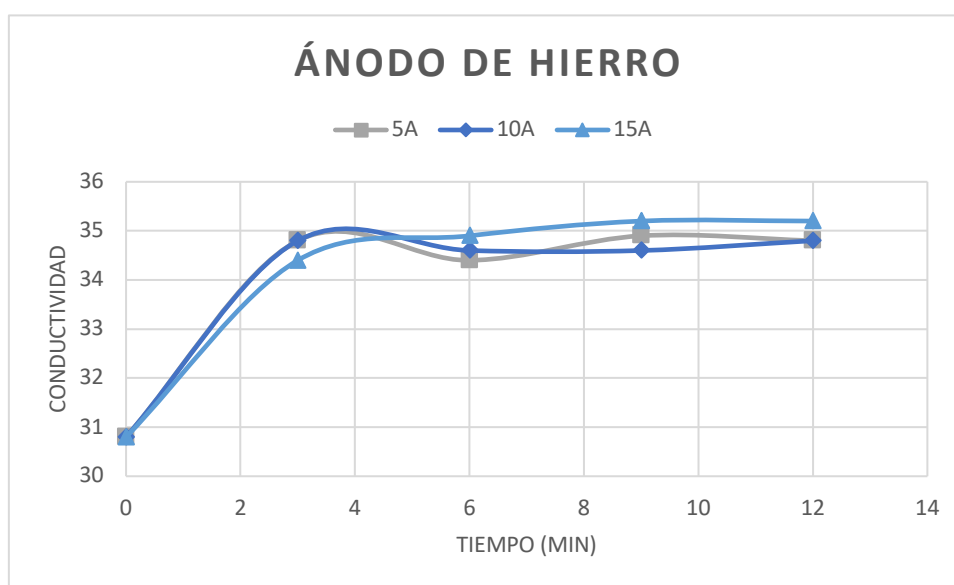


Figura 19. Variación de la conductividad con ánodo de hierro. Tabla 3 anexos.
Elaborado por: Alex Salazar, 2022

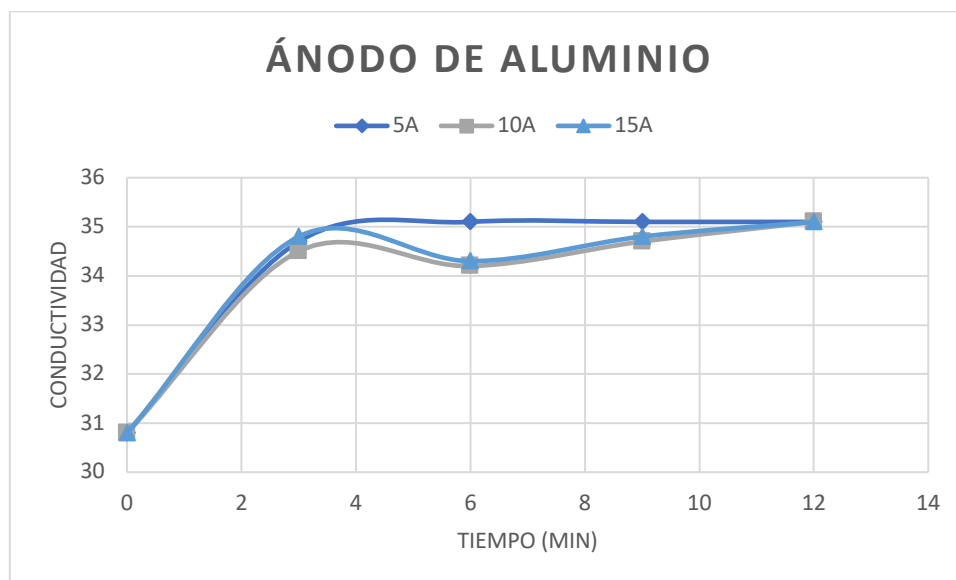


Figura 20. Variación de la conductividad con ánodo de aluminio. *Tabla 4 anexos.*
Elaborado por: Alex Salazar, 2022

En la figura 21 se observa el contenido de hierro total donde el ánodo de hierro al momento de ser utilizada en el tratamiento electroquímico no afecta al valor del parámetro antes mencionado ya que este electrodo no se solubiliza durante el proceso, lo que muestra bajo valores.

En la figura 22 se observa que existe un aumento considerable a medida que, tanto el tiempo como la intensidad aumentan, debido a la solubilidad de dicho electrodo que se produce durante el proceso, ausencia de sólidos suspendidos por flocularse o sedimentarse o falta de precisión en los equipos utilizados.

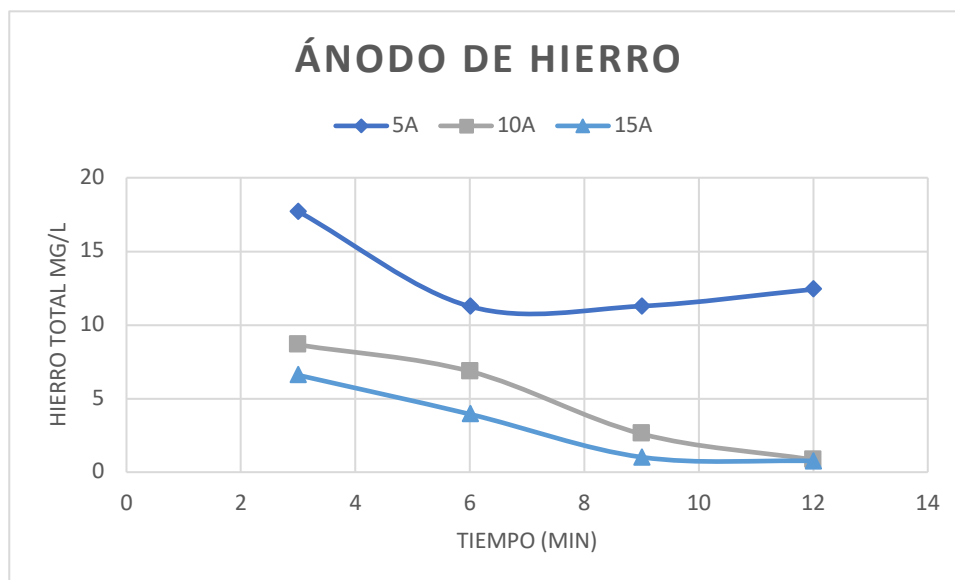


Figura 21. Variación del contenido de hierro total con ánodo de hierro. *Tabla 5 anexos.*
Elaborado por: Alex Salazar, 2022

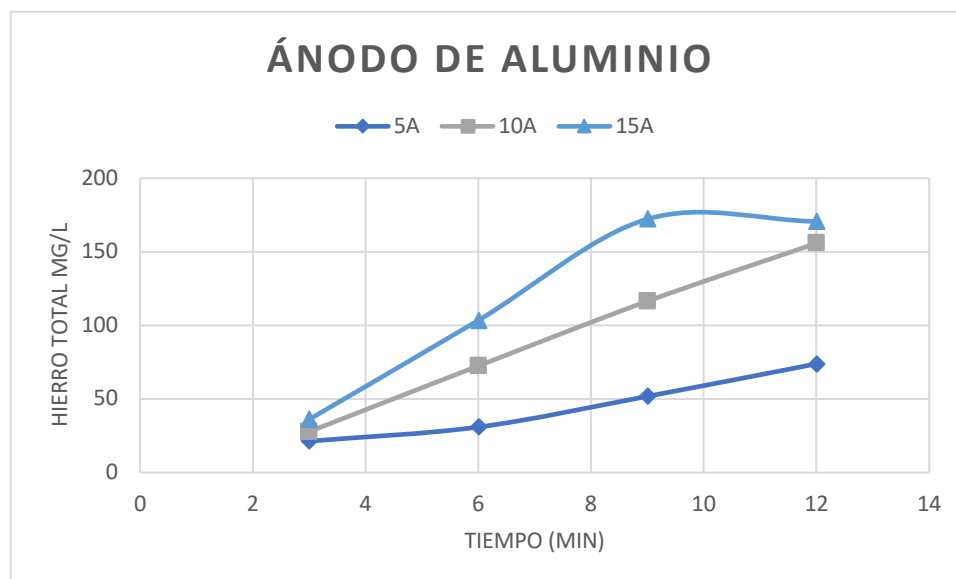


Figura 22. Variación del contenido de hierro total con ánodo de aluminio. *Tabla 6 anexos.*
Elaborado por: Alex Salazar, 2022

En el porcentaje de remoción de DQO, como se observa en las figuras 23 y 24, en el ánodo de hierro el mayor porcentaje de remoción se obtiene a la intensidad de 15 amperios a partir de los 6 minutos, donde se da el inicio de una consecuente estabilidad al finalizar el tratamiento con el agua residual. Para el ánodo de aluminio, al finalizar el tratamiento, las 3 intensidades llegan casi

al mismo punto sobresaliendo entre estos el tiempo que se da a los 9 minutos y siendo la intensidad de 5 amperios y 15 amperios donde existe una mayor remoción.

La remoción del DQO en ambos casos se obtiene hasta un 50%, lo que nos indica que es un resultado alentador.

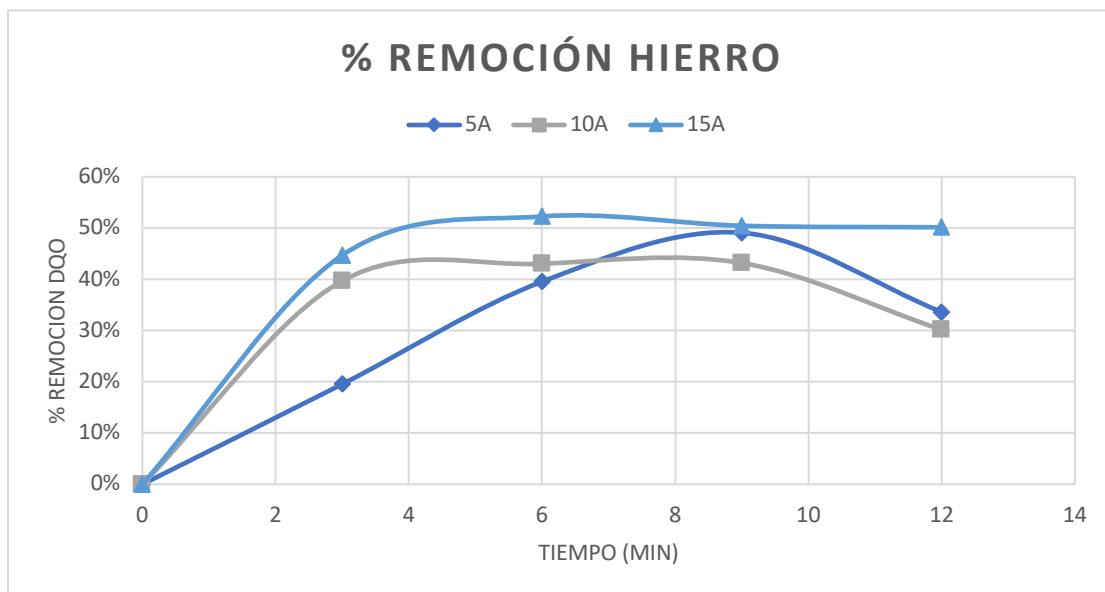


Figura 23. Porcentaje de remoción del DQO con ánodo de hierro. *Tabla 7 anexos.*
Elaborado por: Alex Salazar, 2022

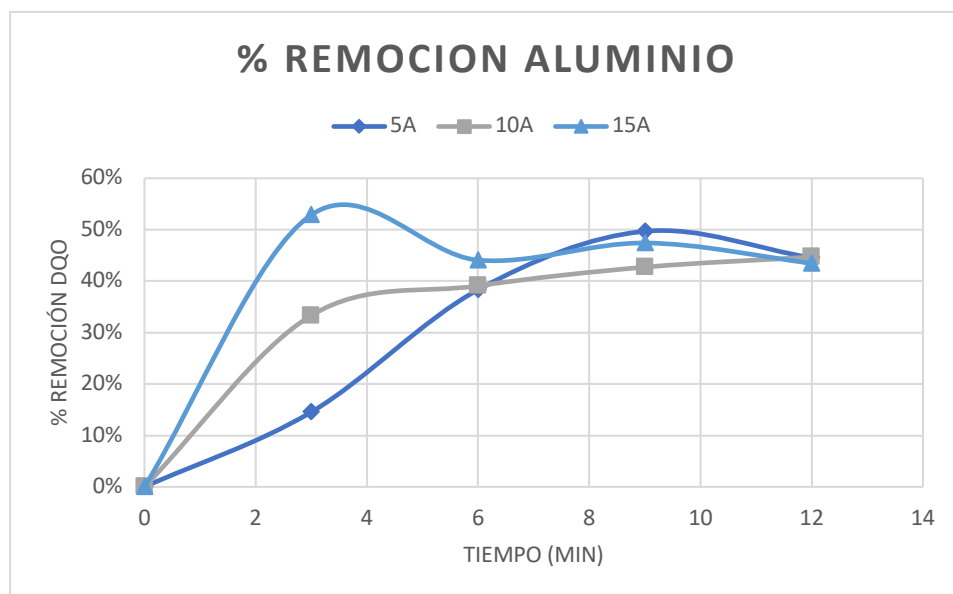


Figura 24. Porcentaje de remoción del DQO con ánodo de aluminio. *Tabla 8 anexos.*
Elaborado por: Alex Salazar, 2022

Como se observa en las gráficas 25 y 26, el contenido de dureza total varía según el ánodo empleado en el proceso. Para la figura 26 la dureza total se encuentra entre los valores de 3000 a 4000 mg/L, lo que indica que los iones divalentes que pueden existir en el tratamiento como calcio, magnesio y hierro se liberan durante el tratamiento debido a la existencia de sólidos suspendidos o flóculos con hierro que se disuelven. Mientras que en la figura 25 con el ánodo de aluminio se tiene resultados con valores casi similares por lo cual durante el tratamiento estos sólidos suspendidos o flóculos que igualmente se disuelven con el ánodo de aluminio durante el proceso.

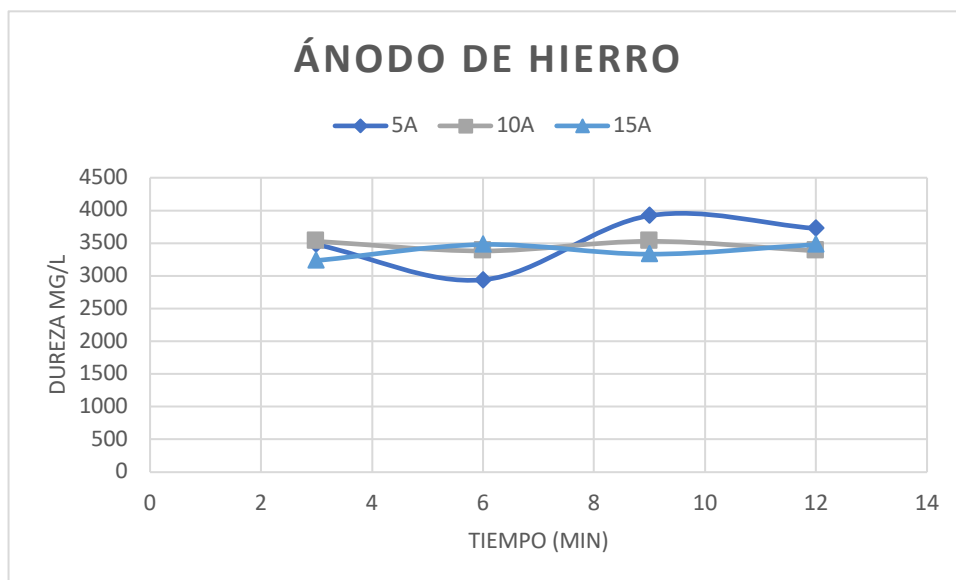


Figura 25. Dureza total ánodo de hierro. Tabla 9 anexos.
Elaborado por: Alex Salazar, 2022

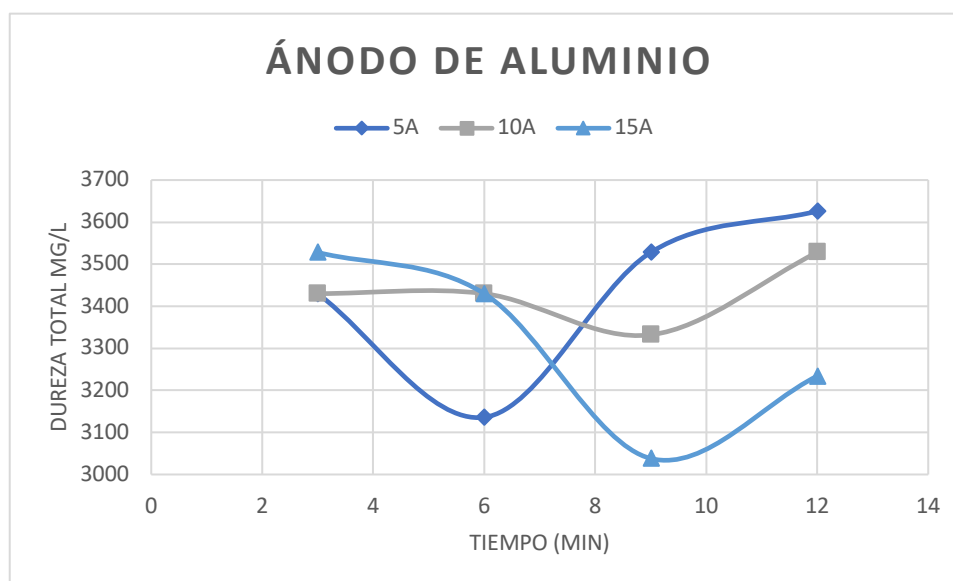


Figura 26. Dureza total ánodo de aluminio. Tabla 10 anexos.
Elaborado por: Alex Salazar, 2022

Después de cada tratamiento con los ánodos de hierro y aluminio. se puede observar los resultados en las figura 27 y 28 los resultados donde. En el caso del ánodo de hierro, el contenido de cloruros aumento en relación al valor inicial de 5850 mg/L, donde claramente se puede observar que el aumentó de este constituye un problema para las tuberías. Como se mencionó

para el parámetro de dureza total los valores tan elevados se deben a sólidos suspendidos o flóculos iniciales.

Se supondría que algunos de estos se disuelven durante el proceso dado ya que no se añade ningún mineral soluble, ya que el agua residual puede contener precipitados de calcio que en el caso del ánodo de hierro estos se dirigen hacia el cátodo de aluminio provocando la solubilidad de ánodo y consecuentemente aumentando los valores de los cloruros.

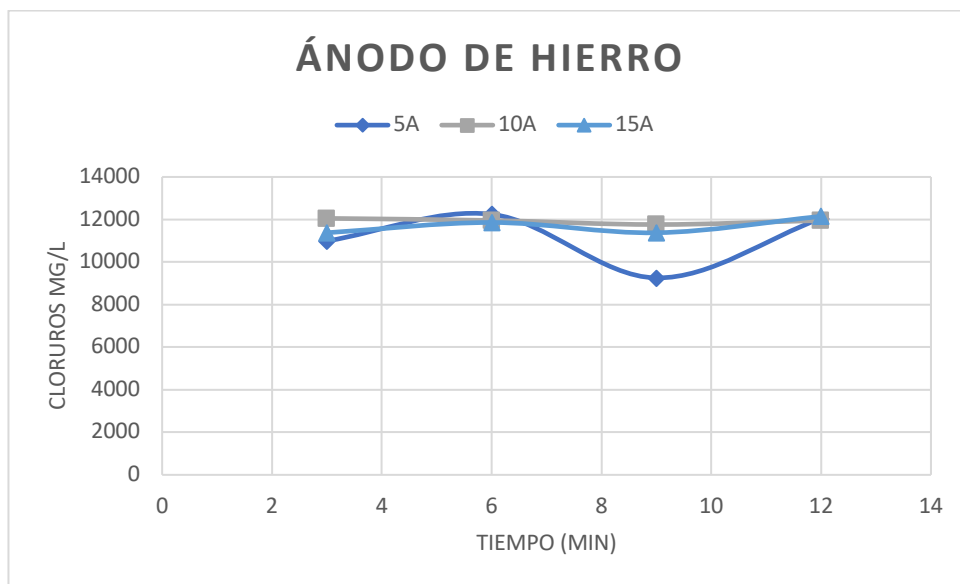


Figura 27. Contenido de cloruros ánodo de hierro. Tabla 11 anexos.
Elaborado por: Alex Salazar, 2022

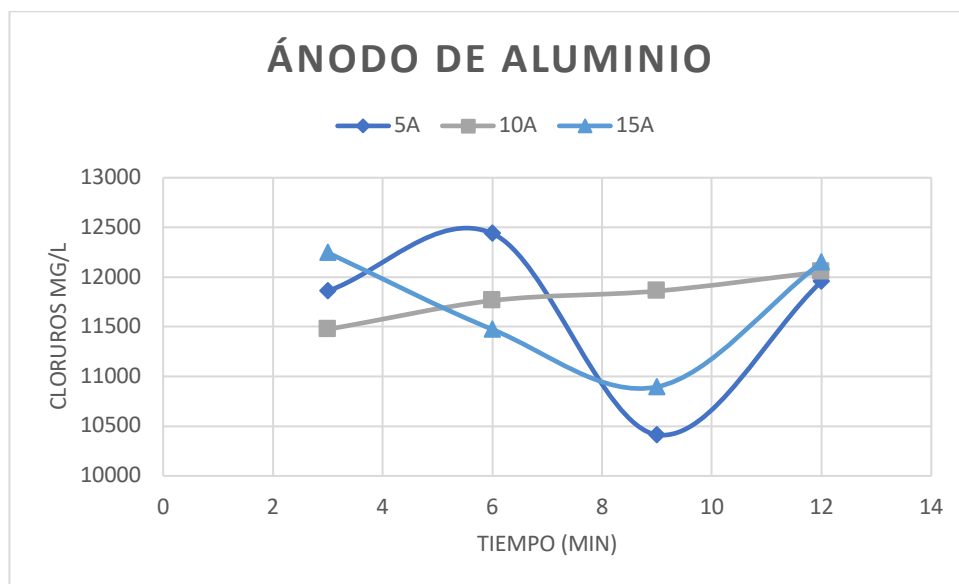


Figura 28. Contenido de cloruros ánodo de aluminio. Tabla 12 anexos.
Elaborado por: Alex Salazar, 2022

El contenido de sólidos suspendidos totales aumenta después del tratamiento para cada uno de los ánodos a las diferentes intensidades para las figuras 29 y 30. El alto contenido de este parámetro presenta un problema para un uso posterior del agua tratada ya que al presentar un alto contenido de sólidos suspendidos pueden obstruir filtros, tuberías; por lo que es importante su eliminación después del tratamiento electroquímico. En ambos casos de ánodos, los sólidos suspendidos vienen por la solubilidad de los electrodos que se producen durante el tratamiento. lo que afecta la calidad final del agua.

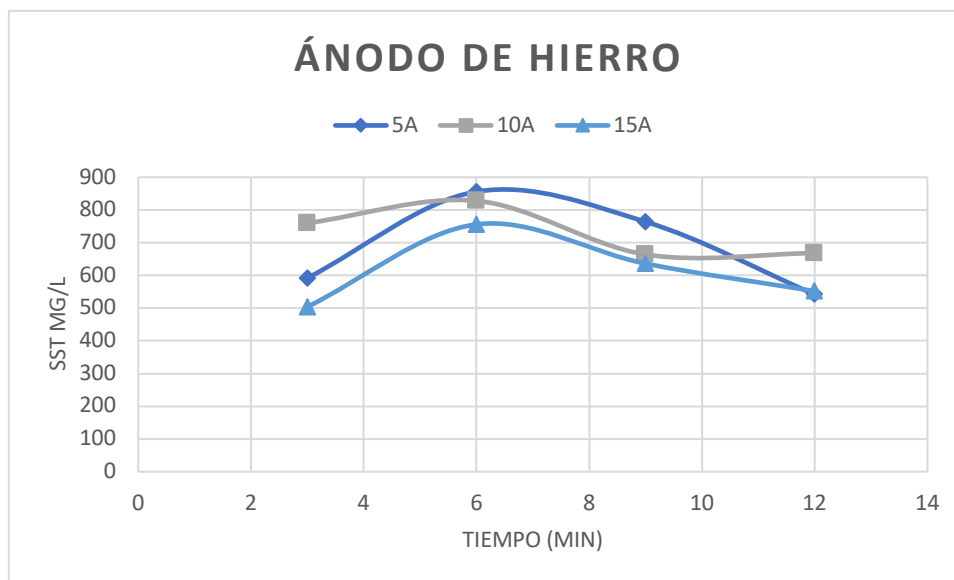


Figura 29. Sólidos suspendidos totales ánodo de hierro. Tabla 13 anexos.
Elaborado por: Alex Salazar, 2022

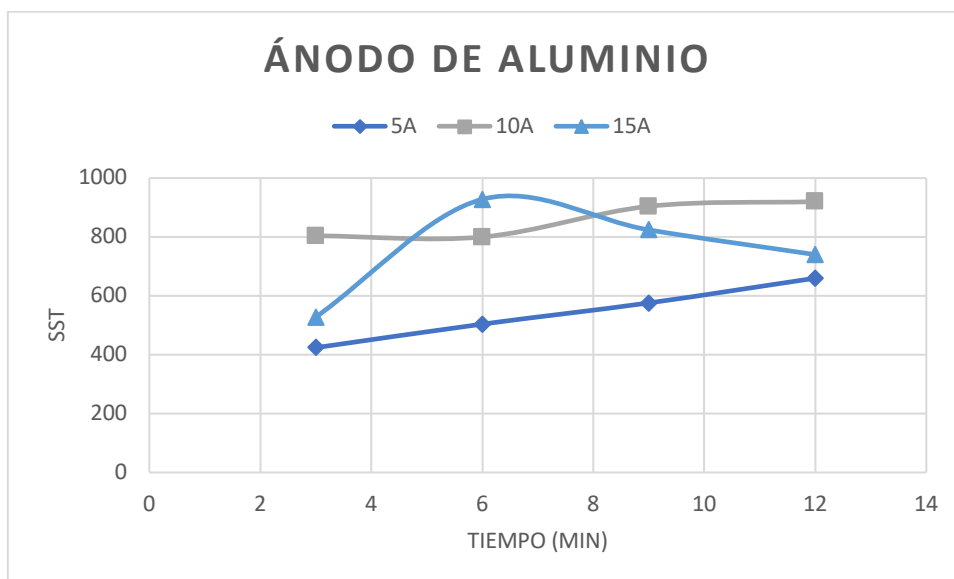


Figura 30. Sólidos suspendidos totales ánodo de aluminio. Tabla 14 anexos.
Elaborado por: Alex Salazar, 2022

4.1. Análisis de costos

El consumo de energía y el material empleado para la construcción de los electrodos en el proyecto son necesarios para determinar el valor de implementación de este proceso en la

industria ecuatoriana. El tratamiento tuvo una duración de 40 horas. En las tablas 4 y 5 se presentan los costos de materiales y equipos.

Materiales	Costo \$
Aluminio	4.5
Hierro	4.9
Cuba eléctrica (plástico)	7
Total	16.4

Tabla 4. Costo de materiales
Elaborado por: Alex Salazar, 2022

Equipos y mano de obra	Costo \$
Variador de voltaje	200
Multímetro	30
Lagartos de conexión	20
Electrodos de aluminio (2)	76
Electrodo de hierro (2)	50
Mano de obra	100
Total	476

Tabla 5. Costos de equipos maniobrados
Elaborado por: Alex Salazar, 2022

Para calcular el consumo de energía se utiliza la fórmula:

Ecuación consumo energético:

$$\text{Consumo}_{\text{energético}} = \frac{V \cdot I \cdot t}{\text{vol}}$$

[4.1]
(Ozyonar, 2011)

Donde:

V= Voltaje [V]

I= Corriente [A]

t= tiempo de operación electrocoagulación [s]

vol= Volumen agua residual tratada [m^3]

Existe una relación directa entre la corriente suministrada y el consumo de energía que requiere el electrodo. De acuerdo a la Ley de Faraday se puede determinar la fórmula para el consumo del electrodo, en el caso del ánodo de aluminio:

Ecuación consumo de energía del electrodo:

$$\text{Faraday}/m^3 = \frac{I*t}{F*vol} \quad [4.2]$$

Ecuación desgaste del electrodo:

$$\text{Consumo}_{\text{electrodo}} = \frac{Mw*I*t}{vol*F*z} \quad [4.3]$$

(Ozyonar, 2011)

Donde:

F= Constante de Faraday (96485 C/mol)

Mw= Masa molar del aluminio (Al=26.98 g/mol, Fe=55,847 g/mol)

z= número de electrones libres (zAl=3, zFe=3)

Reemplazando valores en las fórmulas antes escritas se obtiene los siguientes valores:

Ánodo de aluminio:

$$\text{Consumo}_{\text{energetico}} = \frac{24[V] * 5[A] * 3[min]}{12[L]} = 0,5 \text{ kWh}/m^3$$

$$\text{Consumo}_{\text{electrodo}} = \frac{26,98[\frac{g}{mol}] * 5[A] * 3[min]}{12[L] * 96.485[\frac{C}{mol}] * 3} = 0,011 \text{ kgAl}/m^3$$

El costo de operación para el proceso de electrocoagulación considerando los costos actuales de kW/h en el país y el costo del kg de la materia prima como el aluminio y hierro, se calcula con la siguiente expresión y se muestra en la figura 29 el costo de operación para el aluminio:

Ecuación costos de operación:

$$\text{Costos de operación} = X * \text{Energía}_{\text{consumo}} + Y * \text{Electrodo}_{\text{desgaste}} \quad [4.4]$$

Donde:

$$X = 0.092 \text{ \$/kWh}$$

$$Y = 4.5 \text{ \$/kgAl}$$

$$\text{Costos de operación} = 0.092 * 0.5 + 4.5 * 0.011 = 0.0955 \text{ \$/m}^3$$

A continuación, se muestra en la figura 31 los resultados para el material de aluminio:

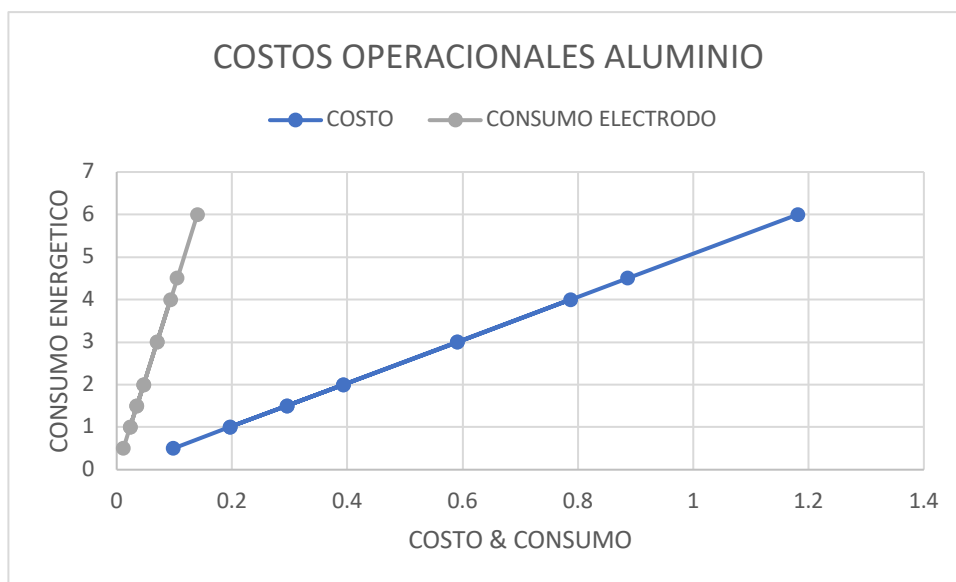


Figura 31. Costos operacionales con material de aluminio. Tabla 15 anexos.
Elaborado por: Alex Salazar, 2022

$$\text{Consumo}_{\text{energético}} = \frac{24[V] * 5[A] * 3[\text{min}]}{12[L]} = 0,5 \text{ kWh/m}^3$$

$$\text{Consumo}_{\text{electrodo}} = \frac{55,847 \left[\frac{g}{\text{mol}} \right] * 5[A] * 3[\text{min}]}{12[L] * 96.485 \left[\frac{C}{\text{mol}} \right] * 3} = 0,036 \text{ kgFe/m}^3$$

Donde:

X= 0.092 \$/kWh

Y= 4.9 \$/kgFe

$$\text{Costos de operación} = 0.092 * 0.5 + 4.9 * 0.036 = 0.22 \text{ \$/m}^3$$

A continuación, se muestra en la figura 32 los resultados para el material de hierro:

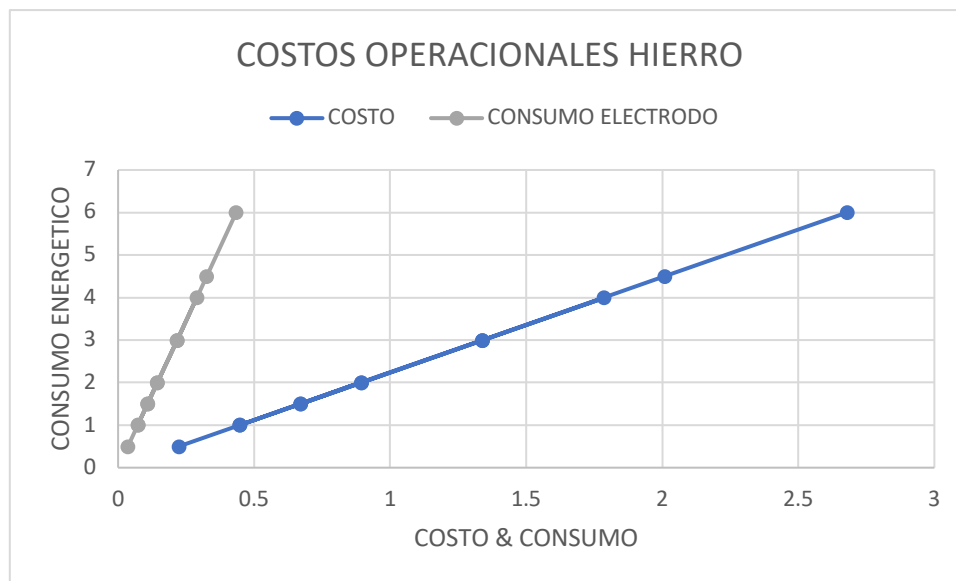


Figura 32. Costos operacionales con material de hierro. Tabla 16 anexos.
Elaborado por: Alex Salazar, 2022

4.2. Discusión de resultados

El realizar pruebas iniciales al agua de formación para así tener un mejor panorama del agua a ser tratada y evitar o minimizar que aquellas partículas iniciales distorsionen los resultados finales.

En cuanto a los resultados el electrodo de hierro presenta mejores resultados después del tratamiento electroquímico a los parámetros medidos como hierro total y sólidos suspendidos totales, mientras que el electrodo de aluminio se evidencia mejores resultados en los parámetros pH y dureza total. En los demás parámetros existe una igualdad de los electrodos en los

resultados de los parámetros: contenido de cloruros, porcentaje de remoción del DQO y conductividad.

Los costos de operación para el tratamiento electroquímico varían dependiendo el material predominante, bien pueden ser solamente electrodos de hierro o de aluminio, pero para este proyecto se usó ambos materiales que son fáciles de hallar y no representan un costo significativamente alto, lo que si viene a ser un limitante es el costo energético que varía según donde se realice este proceso.

El estudio se enfocó principalmente en la identificación de los parámetros que han sido considerados en otros proyectos de estudio como: *“Efecto del pH y la conductividad en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea”*, en las que resalta los parámetros: pH, DQO y conductividad. Donde el pHm, al ser un agua residual alcalina durante el proceso y como se menciona antes, después del tratamiento este valor inicial puede decrecer, para el porcentaje de remoción del DQO el valor máximo alcanzado después del tratamiento electroquímico es un 50% muy diferente al valor alcanzado en el proyecto citado, y esto se debe a que tipo de agua residual es diferente; y, la conductividad se observa un aumento de su valor en ambos proyectos debido a la presencia hidróxido de hierro y del hidróxido de aluminio.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

La electrocoagulación se presenta como una alternativa al tratamiento de aguas; la tecnología ofrece una gran remoción de los contaminantes contenidos en las aguas residuales.

Se prepararon electrodos de hierro y aluminio con el fin de analizar cuál de los materiales nos brindan mejores resultados; cuando cada uno de los electrodos actúa como el ánodo de sacrificio durante el proceso de la electrocoagulación.

El electrodo de aluminio se muestra como el material con mejores resultados en cuanto a la remoción de contaminantes en el agua de formación según a los parámetros; pH, dureza y porcentaje de remoción del DQO.

Se deben analizar los flóculos iniciales con el fin de poder realizar un tratamiento previo al agua de formación para que los resultados de los parámetros de contenido de cloruros y sólidos suspendidos totales no se vean afectados al finalizar el tratamiento.

El electrodo de hierro realiza su función respecto al contenido de hierro total dentro del agua de formación reduciendo el contenido del mismo después del tratamiento electroquímico.

Respecto de los valores presentados, la eficiencia de la remoción del DQO, presenta un resultado 52.88%; lo que determina que la eficiencia de la planta de tratamiento del agua de formación es media.

Se diseñó y construyeron electrodos de hierro y aluminio debido a que estos dos materiales son los más utilizados desde el inicio de la electroquímica y datos se dispone de en bibliografía indicando que son los materiales con mejores resultados.

Los electrodos de sacrificio utilizados en el proceso de electrocoagulación son los primeros en agotarse; requieren ser reemplazados cada cierto tiempo conforme avance su deterioro durante el tratamiento electroquímico.

El desarrollo del prototipo de tratamiento por electrocoagulación promueve que futuros estudiantes identifiquen un nuevo enfoque dentro de la carrera de ingeniería en petróleos hacia la electroquímica ya que es fácil de aprender y entender.

5.2. RECOMENDACIONES

Para la electrocoagulación es fundamental realizar estudios preliminares a nivel de laboratorio, antes de tomar la decisión de implementar este tratamiento a las aguas residuales, ya que las condiciones son diferentes para cada agua residual según los yacimientos productores

Evaluar el tratamiento a diferentes distancias entre placas y tiempos de tratamiento, para seleccionar las condiciones óptimas del reactor.

Se recomienda evaluar la eficiencia de la electrocoagulación con otras variables como el pH, distancia entre electrodos, tipo de conexión, entre otros.

Se deben analizar los flóculos iniciales con el fin de poder realizar un tratamiento previo al agua de formación para que los resultados de los parámetros de contenido de cloruros y sólidos suspendidos totales no se vean afectados al finalizar el tratamiento.

A partir de esta investigación a escala piloto, se recomienda la aplicación industrial del proceso de electrocoagulación, para la validación de las variables estudiadas. Además de la importancia de continuar con el análisis de otros factores de influencia en esta propuesta de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- ARANGO, Álvaro. Efecto del pH y la conductividad en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. En: Revista Producción + Limpia. 2012. Vol. 7.
- ARBOLEDA, Jorge. Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua. pp. 20-43. 1982.
- BELTRÁN, KAREN. Diseño conceptual y construcción de un electro coagulador controlado por labview. Bogotá, 2015, 77p. Tesis de grado con modalidad de solución a un problema ingenieril para optar al título de Ingeniero Ambiental. Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería Ambiental.
- CANTERA, Luis. Automatización del proceso de tratamiento de aguas pluviales por el método de electrocoagulación. México, 2013, 147p. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero de Control y Automatización. Instituto Politécnico Nacional, Facultad de Ingeniería mecánica y eléctrica.
- Educa Madrid. {En Línea}. Julio 05 del 2022. Disponible en: http://educa.madrid.org/web/ies.isidradeguzman.alcala/departamentos/fisica/temas/redo_x/electrolisis.html
- Electrónica online. {En Línea}. Disponible en: <https://electronicaonline.net/componentes-electronicos/diodo/diodo-rectificador/>
- EL-NASS, Muftah. SULAIMAN, Al-Zuhzir. AMAL, Al-Lobaney. Treatment of petroleum refinery wastewater by continuous electrocoagulation. International Journal of Engineering Research & Technology. Octubre 2013. Vol 2. Pág 2144-2150.
- ESMAEILIRAD, Nasim; CARLSON, Ken; OMUR, Pinar. Influence of softening sequencing on electrocoagulation treatment of produce water. En: Elsevier. Octubre, 2014. Pag 721 – 729.

- Flowen. {En línea}. Mayo 20, 2022. Disponible en: <https://flowen.com.pe/site/tratamiento-de-aguas-residuales-industriales-mediante-electrocoagulacion/>
- GARCÍA-SEGURA, S. , Eiband, MMSG, DE MELO, JV y MARTÍNEZ HUITLE, CA (2017) Revista de química electroanalítica , 801 , 267-299
- GIL, Julio. Tratamiento electroquímico para la remoción de metales pesados en residuos líquidos peligrosos generados en los laboratorios de docencia de la universidad del cauca. Santiago de Cali, 2012. 127 p. Trabajo de grado para optar Maestría en ingeniería con énfasis en ingeniería sanitaria y ambiental. Universidad del Valle.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. {En Línea}. Agosto 2 de, 2007. Disponible en:
<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Suspendidos+Totales+en+aguas.pdf/f02b4c7f-5b8b-4b0a-803a-1958aac1179c>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. {En Línea}. Octubre 4 de, 2007. Disponible en:
<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Dureza+total+en+agua+con+EDTA+por+volumetr%C3%ADa.pdf/44525f65-31ff-482e-bbf6-130f5f9ce7c3>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. {En Línea}. Diciembre 28 de, 2007. Disponible en:
<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADgeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. {En Línea}. Septiembre 28 de, 2007. Disponible en:
<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/pH+en+agua+por+Electrometr%C3%ADa.pdf/ec53b64e-91eb-44c1-befe-41fcfccdff1>

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. {En Línea}. Julio 12 de, 2007. Disponible en:
<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Conductividad+EI%C3%A9ctrica.pdf/f25e2275-39b2-4381-8a35-97c23d7e8af4>
- IRAZOQUE, Shirley. Evaluación de corriente pulsada y otras variables en la remoción de sílice por electrocoagulación. México, 2014. Tesis que para optar por el grado de maestro en ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Programa de maestría y doctorado en ingeniería ingeniería ambiental – agua.
- JARAMILLO, Enelio. Diseño y construcción de un reactor de electrocoagulación para el estudio del tratamiento de agua residual de tintura y acabado textil. Ecuador, 2012. Tesis previa la obtención del título de Ingeniero Textil. Universidad Técnica del Norte, Facultad de Ingeniería en ciencias aplicadas.
- KHANDEGAR, V. S. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent – A review. *Journal of Environmental Management*, 128 (2013). Pág. 5135-5141.
- KOBYA, M. Treatment of potable water containing lo concetration of arsenic with electrocoagulation: different connection modes and Fe-Al electrodes. *Separation and Purification Technology*. 77 (2011), 282-288.
- KUMAR, P. Ratna; *et al.* Removal of arsenic from water by electrocoagulation. En: *Chemosphere*. 2004. Vol. 55. p. 1245-1252.
- Lenntech. pH y Alcalinidad. {En Línea}. Julio 25 del 2022. Disponible en:
www.lenntech.es/ph-y-alcalinidad.htm.
- LINARES-HERNANDEZ, Ivonne; MARINEZ MIRANDA, Verónica; BARRERA-DÍAZ, Carlos; PAVÓN-ROMERO, Sergio; BERNAL.MARTÑINEZ, Lina; LUGO-LUGO, Violeta. Oxidación de materia orgánica persistente en aguas residuales o industriales mediante

tratamientos electroquímicos. En revista Avances en Ingeniería. 2011. Vol 2. No 1. Pág. 21-36.

- Lower, S. Chemical reaction at an electrode, galvanic and electrolytic cells, simon Fraser university, Vancouver, Canada (2004).
- MARTÍNEZ, Fabiola. Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional. Ciudad Real. 2007. 279p. Memoria para optar al grado de Doctor en Ingeniería Química. Universidad de Castilla-La Mancha. Facultad de Ciencias Químicas.
- MEJIA, Claudia y OSORIO, Víctor. Decoloración de aguas residuales con alto contenido de índigo por el método de electrocoagulación. En: Revista Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. 2003. Vol. 29. p. 115-118.
- MOLLAH, A. Y. Electrocoagulation (EC) – science and Applications. (2001). ELSEVIER. Pág. 29-41.
- MOLLAH, M. P. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. (2004). Journal of Hazardous Materials. Master, B109 (1-3). Pág. 165-171.
- Monografías. {En Línea}. Disponible en:
<https://www.monografias.com/trabajos102/instalacion-electrica/instalacion-electrica>
- Madrid Blogs. {En Línea}. Septiembre 17, 2010. Disponible en:
<https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2010/09/17/131491>
- OTHMAN, Fadil et al. Enhancing suspended solids removal wastewater using Fe electrodes. Malaysian Journal of Civil Engineering. (2006). Pág. 139-148.
- OZYONAR, K. B. Operating cost analysis and treatment of domestic wastewater by electrocoagulation using aluminum electrodes. Journal of Environmental Management, 1(2011), 173-179.

- PHLAKORNKULE, S. POLGUMHANG, S. y TONGDAUNG, W. Performance of an electrocoagulation process in treating direct dye: batch and continuous upflow processes. (2009). World Academy of Science, Eng. ineering and Technology
- PIÑA, Soberanis; DOMINGUEZ, Martin; RAMIREZ, González. Review of design variables and operation conditions in electrocoagulation. En: Revista Mexicana de Ingeniería Química. Abr 2011, Vol 10. No 2. Pág. 3
- RESTREPO, Ana; ARANGO, Álvaro; GARCES, Luis. La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. En: Producción + Limpia. Jul – Dic 2006, Vol 1. No 2. Pág.4.
- RICHTER, Carlos. “Mejoramamiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano” Tomo I Coagulación, pp. 1-10. 1992.
- Scientific Committes. {En Línea}. Disponible en:
https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/es/campos-electromagneticos/glosario/abc/corriente-alterna.htm
- STREBER, F. Principios de química. México, 1983: Reverte.
- SANDOVAL, Luciano; MONTELLANO, Leticia; PIÑA, Martin; SANCHÉZ, Laura. Potencial Zeta como una herramienta de las partículas la reducción del volumen del lodo a disponer. 2000
- YAGUANA, Nancy; ALMEIDA, Juan. Diseño y construcción de un reactor prototipo a nivel de laboratorio utilizado para el tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación. Tesis previa para la obtención del título de Ingeniero Mecatrónico. Sangolquí. 2015. 136p. Escuela Politécnica Nacional del Ejercito. Departamento de Ciencias e la Energía y Mecánica.

ANEXOS

HIERRO		
INTENSIDAD	pH	min
5A	7.91	3
	7.78	6
	7.82	9
	7.8	12
10A	7.88	3
	7.76	6
	7.69	9
	7.72	12
15A	7.91	3
	7.74	6
	7.73	9
	7.72	12

Tabla 1. Valores obtenidos del pH a diferentes intensidades y tiempos, ánodo de hierro

ALUMINIO		
INTENSIDAD	pH	min
5A	7.84	3
	7.8	6
	7.71	9
	7.7	12
10A	7.78	3
	7.74	6
	7.74	9
	7.69	12
15A	7.76	3
	7.72	6
	7.67	9
	7.63	12

Tabla 2. Valores obtenidos del pH a diferentes intensidades y tiempos, ánodo de aluminio

HIERRO		
INTENSIDAD	mS/cm	min
5A	34.8	3
	34.4	6
	34.9	9
	34.8	12
10A	34.8	3
	34.6	6
	34.6	9
	34.8	12
15A	34.4	3
	34.9	6
	35.2	9
	35.2	12

Tabla 3. Valores obtenidos de conductividad a diferentes intensidades y tiempos, ánodo de hierro

ALUMINIO		
INTENSIDAD	mS/cm	min
5A	34.7	3
	35.1	6
	35.1	9
	35.1	12
10A	34.5	3
	34.2	6
	34.7	9
	35.1	12
15A	34.8	3
	34.3	6
	34.8	9
	35.1	12

Tabla 4. Valores obtenidos de conductividad a diferentes intensidades y tiempos, ánodo de aluminio

HIERRO		
INTENSIDAD	mg/L	min
5A	17.71	3
	11.26	6
	11.28	9
	12.42	12
10A	8.65	3
	6.85	6
	2.6	9
	0.84	12
15A	6.59	3
	3.94	6
	1.02	9
	0.76	12

Tabla 5. Valores obtenidos del contenido de hierro total a diferentes intensidades y tiempos, ánodo de hierro

ALUMINIO		
INTENSIDAD	mg/L	min
5A	21.34	3
	30.95	6
	51.8	9
	73.88	12
10A	27.76	3
	72.47	6
	116.4	9
	155.8	12
15A	36.15	3
	103.4	6
	172.2	9
	170.6	12

Tabla 6. Valores obtenidos del contenido de hierro total a diferentes intensidades y tiempos, ánodo de aluminio

HIERRO		
INTENSIDAD	% REMOCION	min
5A	19.55%	3
	39.55%	6
	49.09%	9
	33.64%	12
10A	39.70%	3
	43.03%	6
	43.18%	9
	30.15%	12
15A	44.70%	3
	52.27%	6
	50.45%	9
	50.15%	12

Tabla 7. Valores obtenidos del porcentaje de DQO total a diferentes intensidades y tiempos, ánodo de hierro

ALUMINIO		
INTENSIDAD	% REMOCION	min
5A	14.55%	3
	38.33%	6
	49.70%	9
	44.55%	12
10A	33.33%	3
	39.09%	6
	42.73%	9
	44.70%	12
15A	52.88%	3
	44.09%	6
	47.42%	9
	43.48%	12

Tabla 8. Valores obtenidos del porcentaje de DQO total a diferentes intensidades y tiempos, ánodo de aluminio

HIERRO		
INTENSIDAD	mg/L	min
5A	3479	3
	2940	6
	3920	9
	3724	12
10A	3528	3
	3381	6
	3528	9
	3381	12
15A	3234	3
	3479	6
	3332	9
	3479	12

Tabla 9. Valores obtenidos del dureza total a diferentes intensidades y tiempos, ánodo de hierro

ALUMINIO		
INTENSIDAD	mg/L	min
5A	3430	3
	3136	6
	3528	9
	3626	12
10A	3430	3
	3430	6
	3332	9
	3528	12
15A	3528	3
	3430	6
	3038	9
	3234	12

Tabla 10. Valores obtenidos del dureza total a diferentes intensidades y tiempos, ánodo de aluminio

HIERRO		
INTENSIDAD	mg/L	min
5A	10992	3
	12246	6
	9257	9
	12053	12
10A	12053	3
	11957	6
	11764	9
	11957	12
15A	11378	3
	11860	6
	11378	9
	12149	12

Tabla 11. Valores obtenidos de cloruros total a diferentes intensidades y tiempos, ánodo de hierro

ALUMINIO		
INTENSIDAD	mg/L	min
5A	11860	3
	12439	6
	10414	9
	11957	12
10A	11474	3
	11764	6
	11860	9
	12053	12
15A	12246	3
	11474	6
	10896	9
	12149	12

Tabla 12. Valores obtenidos de cloruros total a diferentes intensidades y tiempos, ánodo de aluminio

HIERRO		
INTENSIDAD	mg/L	min
5A	592	3
	856	6
	764	9
	542	12
10A	760	3
	828	6
	664	9
	668	12
15	504	3
	756	6
	636	9
	552	12

Tabla 13. Valores obtenidos del contenido solidos suspendidos totales total a diferentes intensidades y tiempos, ánodo de hierro

ALUMINIO		
INTENSIDAD	mg/L	min
5A	424	3
	504	6
	576	9
	660	12
10A	804	3
	800	6
	904	9
	920	12
15	528	3
	928	6
	824	9
	740	12

Tabla 14. Valores obtenidos del contenido solidos suspendidos totales total a diferentes intensidades y tiempos, ánodo de aluminio

CONSUMO ENERGÉTICO (kWh/m3)	CONSUMO ELECTRODO (kg/m3)	COSTO DE OPERACIÓN (\$/m3)
0.5	0.011651207	0.09843043
1	0.023302413	0.196860859
1.5	0.03495362	0.295291289
2	0.046604826	0.393721718
1	0.023302413	0.196860859
2	0.046604826	0.393721718
3	0.069907239	0.590582578
4	0.093209653	0.787443437
1.5	0.03495362	0.295291289
3	0.069907239	0.590582578
4.5	0.104860859	0.885873866
6	0.139814479	1.181165155

Tabla 15. Costos operacionales con material de aluminio.

CONSUMO ENERGÉTICO (kWh/m3)	CONSUMO ELECTRODO (kg/m3)	COSTO DE OPERACIÓN (\$/m3)
0.5	0.03617596	0.2232622
1	0.07235192	0.44652441
1.5	0.10852788	0.66978661
2	0.14470384	0.89304882
1	0.07235192	0.44652441
2	0.14470384	0.89304882
3	0.21705576	1.33957322
4	0.28940768	1.78609763
1.5	0.10852788	0.66978661
3	0.21705576	1.33957322
4.5	0.32558364	2.00935984
6	0.43411152	2.67914645

Tabla 16. Costos operacionales con material de hierro.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CAMPUS POLITÉCNICO "J. RUBEN ORELLANA R."

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

ORDEN DE EMPASTADO

De acuerdo con lo estipulado en el artículo 27 del Instructivo para la Implementación de la Unidad de Titulación en las Carreras y Programas Vigentes de la Escuela Politécnica Nacional, aprobado por el Consejo Politécnico el 29 de abril de 2015, se autoriza la impresión y encuadernación final del Trabajo de Titulación presentado por el(la) señor(ita):

SALAZAR RODRIGUEZ ALEX DALTON

Fecha de autorización: Quito DM., 16 de enero de 2023

PhD. Pedro Reyes B.
DECANO

