

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Ambiental



EVALUACIÓN DE PARAMETROS DE OPERACIÓN DE UN EQUIPO DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA REDUCCIÓN DE LA DUREZA TOTAL A PARTIR DE AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE OSMOSIS INVERSA

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero Ambiental

Autores:

Carlos Cesar Arroyo Blanco

Danilo Monge Poma

Asesor:

Dr. Ricardo Rodríguez Vílchez.

Lima - Perú

2021

ACTA DE AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTACIÓN DE TESIS

El asesor Ricardo Rodríguez Vílchez, docente de la Universidad Privada del Norte, Facultad de Ingeniería, Carrera profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL, ha realizado el seguimiento del proceso de formulación y desarrollo de la tesis de los estudiantes:

- Arroyo Blanco, Carlos Cesar.
- Monge Poma, Danilo.

Por cuanto, **CONSIDERA** que la tesis titulada: Evaluación de parámetros de operación de un equipo de Electrocoagulación para la reducción de la Dureza total a partir de agua residual proveniente de Osmosis inversa. para aspirar al título profesional de: *Ingeniero Ambiental* por la Universidad Privada del Norte, reúne las condiciones adecuadas, por lo cual, AUTORIZA al o a los interesados para su presentación.

Dr. Ricardo Rodríguez Vílchez
Asesor

ACTA DE APROBACIÓN DE LA TESIS

Los miembros del jurado evaluador asignados han procedido a realizar la evaluación de la tesis de los estudiantes: Arroyo Blanco, Carlos Cesar y Monge Poma, Danilo para aspirar al título profesional con la tesis denominada: Evaluación de parámetros de operación de un equipo de Electrocoagulación para la reducción de la Dureza total a partir de agua residual proveniente de Osmosis inversa.

Luego de la revisión del trabajo, en forma y contenido, los miembros del jurado concuerdan:

Aprobación por unanimidad

Aprobación por mayoría

Calificativo:

Excelente [20 - 18]

Sobresaliente [17 - 15]

Bueno [14 - 13]

Calificativo:

Excelente [20 - 18]

Sobresaliente [17 - 15]

Bueno [14 - 13]

Desaprobado

Firman en señal de conformidad:

Ing. /Lic. /Dr. /Mg. Nombre y
Apellidos
Jurado
Presidente

Ing. /Lic. /Dr. /Mg. Nombre y
Apellidos
Jurado

Ing. /Lic. /Dr. /Mg. Nombre y
Apellidos
Jurado

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a Dios por su misericordia, su gracia, fidelidad y amor; a mi madre Irma Blanco y mi hermana Mónica por su inmensurable amor y confianza depositado en mí para lograr mis objetivos, a mi tío Javier, tía Doris y tío José por sus palabras de aliento; y sus oraciones que fueron vitales para mi desarrollo, a mis abuelos Francisco Blanco y Gloria Aranda que son un propósito más a mi vida y a mi asesor Ricardo Rodríguez Vílchez por dedicar su tiempo en ayudarme y brindarme su experiencia, al profesor Juan Medina Collana por ser de apoyo vital en el desarrollo de la tesis.

Dedico esta tesis a mi mamá Norma Nelly, quien fue mi especial motivación para culminar esta tesis. A mi familia y amistades quienes me alentaron en cada proceso.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por la gran bendición que nos acompaña toda la vida, por ser misericordioso con nosotros, inspirador y darnos fuerzas para ser perseverantes.

A nuestros padres, por su sacrificio y arduo trabajo en estos largos años; ya que sin ellos no podríamos lograr esta meta.

Asimismo, a todas las personas que nos han apoyado para que este proceso se alcance con éxito.

TABLA DE CONTENIDOS

ACTA DE AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTACIÓN DE TESIS	i
ACTA DE APROBACIÓN DE LA TESIS	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE TABLAS	viii
INDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	1
SUMMARY	2
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	3
1.1 Realidad del problemática.	3
1.2 Bases Teóricas	11
1.3 Formulación del problema.	20
1.3.1 Problema General	20
1.3.2 Problemas Específico	20
1.4 Justificación	20
1.5 Objetivos	21
1.5.1 Objetivo General	21
1.5.2 Objetivos Específicos	21
1.6 Hipótesis	21
1.6.1 Hipótesis General	21
1.6.2 Hipótesis Específica	21

CAPITULO II. METODOLOGÍA	23
2.1 Tipo de investigación	23
2.1.1 Según el propósito: Explicativo	23
2.1.2 Según el diseño de investigación: Experimental factorial	23
2.2 Población y muestra	23
2.2.1 Población	23
2.2.2 Muestra	23
2.2.3 Materiales e instrumentos	25
2.3 Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos	25
2.3.1 Método de análisis de datos	25
2.3.2. Procedimiento de análisis de datos	28
2.4 Equipo experimental del módulo de electrocoagulación	33
2.4.1 Descripción del equipo de electrocoagulación	33
2.4.2 Procedimiento de instalación	36
2.4.3 Alimentación del módulo de electrocoagulación	36
2.4.4 Fase experimental	36
CAPITULO III. RESULTADOS	38
3.1 Resultado de Parametros evaluados	38
3.1.1 Caracterización Fisico – Quimico	38
CAPITULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	59
4.1 Discusión	59
4.2 Conclusiones	61
REFERENCIAS	62

ANEXOS	68
ANEXO 1: Matriz de consistencia.	68
ANEXO 2: Materiales	69
ANEXO 3: Instrumentos	70
ANEXO 4: Diagrama de Procesos	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.Conservación y preservación de muestra de agua en función del parámetro evaluado.....	28
Tabla 2.Diseño factorial tres (03) por dos (02)	28
Tabla 3.Promedio del Análisis Físico Químico del agua residual proveniente de Osmosis Inversa.	35
Tabla 4.Resultados del pH.....	38
Tabla 5.Resultados de la conductividad.	39
Tabla 6.Resultados de la Dureza Total.	40
Tabla 7.Resultados de los Solidos Totales Suspendidos.	41
Tabla 8.Resultados de la Turbiedad	42
Tabla 9.Diseño factorial tres (03) por dos (02) completo.....	43
Tabla 10.Analisis de Varianza (Anova)	48
Tabla 11.Resumen del Modelo (Anova).....	49

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Reactores por el tipo de flujo.....	13
<i>Figura 2.</i> Ley de Faraday para electrocoagulación	15
<i>Figura 3.</i> Matriz Factorial	16
<i>Figura 4.</i> Esquema de una celda de electrocoagulación.	37
<i>Figura 5.</i> Probabilidad de normalidad.....	44
<i>Figura 6.</i> Varianza constante (Residuos vs. Ajustes).....	45
<i>Figura 7.</i> Prueba de independencia (Residuos vs. Orden).	46
<i>Figura 8.</i> Diagrama de Pareto	47
<i>Figura 9.</i> Efectos principales.....	49
<i>Figura 10.</i> Interacción de factores.....	50
<i>Figura 11.</i> Contorno de dureza total vs. Flujo; Voltaje.....	51
<i>Figura 12.</i> Contorno de dureza total vs. Volumen; Voltaje.	52
<i>Figura 13.</i> Contorno de dureza total vs. Flujo; Volumen.	53
<i>Figura 14.</i> Variación del pH en el postest.	54
<i>Figura 15.</i> Variación de la Conductividad en el postest.	55
<i>Figura 16.</i> Variación de la Dureza Total en el postest.	56
<i>Figura 17.</i> Variación de Solidos totales disueltos en el postest.	57
<i>Figura 18.</i> Variación de la Turbiedad en el postest.	58
<i>Figura 19.</i> Matriz de consistencia.	68
<i>Figura 20.</i> Materiales de construcción del equipo.	69
<i>Figura 21.</i> Instrumentos utilizados para la medición de los parámetros Físico Químicos.	70
<i>Figura 22.</i> Plano del equipo de electrocoagulación.	71

Figura 23. Módulo digital de la celda de electrocoagulación. 72

Figura 24. Módulo y Estructura de Electrocoagulación. 73

RESUMEN

La planta osmosis inversa genera como parte de su proceso agua residual con alto contenido de sales, comúnmente a esta corriente se le denomina rechazo o concentrado; en la mayoría de los casos estos se descargan a la red de alcantarillado.

La electrocoagulación es una técnica que se viene investigando para tratar aguas residuales industriales, domésticas y urbanas. Este proceso está dotado de una fuente de poder y de varios electrodos cuya finalidad es aportar iones desestabilizadores de partículas coloidales que remplazan las funciones de un coagulante como tratamiento convencional.

La investigación tiene como objetivo la evaluación de los parámetros de las variables de operación de un equipo de electrocoagulación con respecto a la reducción de la dureza total procedente del agua residual de Osmosis Inversa.

Para su evaluación se construyó un equipo de electrocoagulación con electrodos paralelepípedos de magnesio y acero inoxidable en forma de zigzag y se evaluó las variables de operación como: potencial eléctrico, flujo volumétrico y volumen tratado del agua residual.

En esta investigación se consideró las variables flujo de 100 mL/s. y 150 mL/s., potencial eléctrico de 4V y 7.4 V y Volumen de 1000 mL y 3000 mL.

Los parámetros más adecuados obtenidos de acuerdo a las variables de operación fueron los siguientes: flujo (150 mL/s.), potencial eléctrico (7.4 V) y volumen (3000mL); donde se obtuvieron una mayor remoción de la dureza total, alcanzando un porcentaje de reducción de 24.61%.; donde la dureza total promedio se redujo de 534.355 a 427.70 (mgCaCo₃), cuyo valor se encuentra por debajo de los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en el D.S. N°031-2010 SA.

Palabras clave: Electrocoagulación, Límites Máximos Permisibles (LMP), variables de operación.

SUMMARY

The reverse osmosis plant generates as part of its process waste water with a high content of salts, commonly this stream is called reject or concentrate; in most cases these are discharged into the sewer network.

Electrocoagulation is a technique that has been investigated to treat industrial, domestic and urban wastewater. This process is equipped with a power source and several electrodes whose purpose is to provide destabilizing ions of colloidal particles that replace the functions of a coagulant as a conventional treatment.

The present research aims to evaluate the parameters of the operating variables of an electrocoagulation equipment with respect to the reduction of the total hardness from the Reverse Osmosis wastewater.

For its evaluation, an electrocoagulation equipment was built with parallelepipedic magnesium and stainless steel electrodes in a zigzag shape and the operating variables such as: electric potential, volumetric flow and treated volume of waste water were evaluated.

In this investigation, the variables flow of 100 mL / s were considered. and 150 mL / s., electric potential of 4V and 7.4 V and Volume of 1000 mL and 3000 mL.

The most suitable parameters obtained according to the operation variables were the following: flow (150 mL / s.), Electric potential (7.4 V) and volume (3000mL); where a greater removal of the total hardness was obtained, reaching a reduction percentage of 24.61%; where the average total hardness was reduced from 534.355 (mgCaCo₃) to 427.70 (mgCaCo₃), whose value is below the Maximum Allowable Limits (LMP) established in the S.D. N ° 031-2010 SA.

Keywords: Electrocoagulation, Maximum Permissible Limits (PML), operating variables.

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Realidad de la problemática.

La disponibilidad de agua es de suma importancia para la vida y el desenvolvimiento económico de cualquier región del mundo. Durante muchos años, todos los recursos eran considerados disponibles para cualquier uso antrópico, sin tener en cuenta la calidad o las necesidades para los usos ambientales. Cuando se considera la distribución del agua entre los distintos usuarios, la agricultura aparece como el sector de mayor demanda. Las dos terceras partes de los recursos hídricos se destinan al uso agrícola, con una demanda creciente para el turismo, usos urbanos e industriales, compitiendo por un acceso a un recurso cada vez menos disponible, sin embargo, el agua para uso doméstico es el más exigente, en términos de calidad y seguridad del suministro. El agua potable es necesaria para la vida, para la salud y para una existencia productiva. La salud humana depende no sólo de la cantidad de agua suministrada, sino principalmente de la calidad. (Fernández Cirelli, 2012, pág. 153)

Según la (Organización mundial de la Salud, 2005; citado por (Xavier Elías, 2012, pág. 12)). Afirma: “La cantidad adecuada de agua para consumo humano (beber, cocinar, higiene personal y limpieza del hogar) es de 50 L/hab-día. A nivel mundial, se extraen actualmente unos 3.600 km³ de agua dulce para consumo humano, es decir, 1.600 L/hab-día, de los cuales, aproximadamente la mitad no se consume (se evapora, infiltra al suelo o vuelve a algún cauce) y, de la otra mitad, se calcula que el 65% se destina a la agricultura, el 25% a la industria y, tan solo el 10% a consumo doméstico”.

Asimismo, según el informe de (Veneman, 2006; citado por (Pérez Fernández, D. y Santos Souza M., 2017, pág. 4)): “Cada año mueren 1,5 millones de niños y niñas por

consumo de agua no apta, más de 1000 millones de personas carecen de agua potable y 2600 millones tienen servicios básicos deficientes”.

Por otro lado, según la (Academias y organizaciones científicas miembros del Interamerican Network of Academies of Sciences, 2019, pg. 116). Afirma: “Únicamente el 71% de la población mundial cuenta con un servicio de agua potable cuando es necesario y libre de contaminación. Por lo tanto el 29% de la población mundial todavía no tiene acceso a este servicio. Asimismo, los datos muestran que sólo el 65% de la población de América Latina usa agua potable segura.

Los datos de los servicios de saneamiento son más graves; sólo 39% de la población mundial usa un servicio de saneamiento seguro y gestionado”.

Asimismo, la (Academias y organizaciones científicas miembros de IANAS, 2019, pg. 546). Afirma: “En Perú el 54% de la población rural accede al servicio de agua potable con conexión a domicilio y 21% cuenta son sistemas de alcantarillado, pero sólo 3% de éstos se encuentran en buen estado.

El Proyecto “Estudio Hidrogeológico de Agua Subterránea-Perforación de Pozo Tubular Sector Mojeque, Valle San Rafael, donde se menciona que el Manejo de los recursos de aguas subterráneas de la gran Lima y construcción y equipamiento de 51 pozos por la empresa Consorcio Internacional Binnie & Parnerts”, señaló que el abastecimiento de agua de las poblaciones numerosas como Carabayllo es mediante agua subterránea (almacenado en pozos) y el río Chillón, esto es en temporada de invierno y verano respectivamente. (Municipalidad Distrital de Casma, 2012, pg. 27).

La presente investigación, se basa en otras investigaciones internacionales e internacionales con la finalidad de tener una guía para el correcto uso de un equipo de electrocoagulación como también la manipulación de los parámetros de operación y la elección de los electrodos.

La revista Mexicana de Ingeniería, con artículo titulado “Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación” publicado por Soberanis Piña, M. et al., (2011); sostiene las principales variables que intervienen en los mecanismos de remoción, tales como: la densidad de corriente; el tipo de material, tamaño y distancia en los electrodos; el tipo de conexiones utilizadas; el amperaje y voltaje aplicado; el pH, temperatura y conductividad del agua; el tiempo de residencia y el tipo de flujo utilizado. Demostrando que la electrocoagulación funciona adecuadamente como una tecnología alterna en el tratamiento de aguas residuales y agua potable.

El artículo científico titulado “Evaluación del proceso de Electrocoagulación para la remoción de la turbidez del agua de río, agua residual y agua de estanque” de la Revista Mexicana de Ingeniería Química, publicado por Pérez Sicarios S. et al., (2011); sostiene la influencia de la corriente eléctrica aplicada al electrodo determina la velocidad de reacción. Asimismo, señala que la cantidad de iones de aluminio generado es proporcional a la corriente por lo que una concentración más alta aumenta la eliminación de la turbidez. Sin embargo, esto representa un incremento de los costes de operación. Además, las mejores condiciones de flujo fue 0.5 L/min, con un tiempo de 15 minutos y con una intensidad de corriente de 0.2 A (16V) con valores de 98, 97 y 96 % para la eliminación de la turbidez. Demostrando que es posible la eliminación de la turbidez.

El artículo científico titulado “Electrocoagulación de soluciones de índigo carmín empleando ánodos de magnesio y de aleación AZ31” de la revista Colombiana DYNA publicado por Donneys Victoria et. al., (2018), sostienen el desempeño del magnesio de alta pureza y la aleación AZ31 como ánodos de sacrificio en la electrocoagulación para la disminución de color y carbono orgánico disuelto (COD) de los efluentes de la industria textil. Estos experimentos se llevaron a cabo mediante un diseño factorial a dos (02)

niveles con los siguientes factores: Velocidad de agitación, temperatura, concentración de colorante y densidad de corriente. Asimismo, recalca que los cationes generados en el ánodo de sacrificio se hidrolizan formando aglomerados amorfos insolubles, los cuales proveen superficies activas para la adsorción coloides presentes en el agua. Por otra parte, el cátodo se descompone electroquímicamente donde el agua produce burbujas de hidrogeno, estas posteriormente atrapan los floculos y lo llevan a la superficie por efecto de la flotación. Cabe resaltar que los ánodos de magnesio pueden producir hidrogeno durante su polarización, esto es denominado efecto diferencial negativo y es particular del magnesio. Entre los resultados obtenidos por medio del ánodo de magnesio encontramos una remoción del color del 99% y el COD del 84% y con ello demostrando una eficiencia óptima para la elección de este ánodo.

En la tesis titulada “Diseño y construcción de un reactor de electrocoagulación para el estudio de tratamiento de agua residual de pintura y acabado textil” publicado por (Jaramillo Terán Enelio, 2012) de la Universidad Técnica del Norte (Ecuador), sostiene que es necesario conocer los factores de agitación, caudal, pH, conductividad, DBO5 y DQO para una eficiente remoción. Por lo tanto, concluye una remoción de pH del 9,24 a 9,07 (1,84%), Solidos totales suspendidos de 84 mg/L a 71mg/L (15,5%), DBO5 de 313 mgO₂/L a 112 mgO₂/L (64,2%), DQO de 480 mg/L a 227 mg/L (52,7%) con un caudal de 2L/min, una conductividad promedio de 1900 mS/cm, voltaje de 6 v, y con un tiempo de 3 minutos.

En el artículo científico titulada “Study on the Removal of Water Hardness by Electrocoagulation Technique”, de la revista International Journal of Chemical and Biochemical Sciences, publicada por Helmy, E., Nassef E. & Hussein M. (2017); refieren que prepararon una célula electrolítica para eliminar calcio y magnesio por electróagulación, en la que usaron una placa horizontal cuadrada de Al como cátodo y 4

matrices de aluminio horizontal como ánodo. Este estudio alcanzó el 53.53% calcio eliminado y 100% magnesio eliminado a 50.56 mA / cm², por lo que se encontró que el porcentaje de eliminación es directamente proporcional al tiempo de electrólisis por un periodo de 60 minutos.

En el artículo científico titulada “The Efficiency of Electrocoagulation process using Aluminum Electrodes in Removal of Hardness from Wáter”, de la revista Journal of Environmental Health Science and Engineering, publicada por Malakootian M., & Yousefi N. (2009) Sostiene que construyeron una planta piloto, compuesto por electrodos de lámina de aluminio, las mismas que se conectaron como monoplares y estos a una fuente de alimentación para alimentar corriente eléctrica. Los autores afirman que lograron una mayor remoción con un pH = 10.1, diferencia potencial de 20v y un intervalo de tiempo de 60 minutos, teniendo como resultado una eficiencia del 95,6%; por lo que concluye que con al aumentar el pH, la tasa de eliminación de la dureza aumenta.

En el artículo científico titulada “Review of Studies on Hardness Removal by Electrocoagulation”, de la revista International Research Publication House, publicada por Pooja, K., & Salkar, D. (2017) se enfocan en revisar diversas publicaciones dedicadas al tratamiento de aguas residuales por electrocoagulación. Cabe resaltar que en su estudio menciona que con un modo continuo existe una eficiencia de tratamiento de 90.6 % de una muestra de agua salobre con placas de Fe. Asimismo, mencionan que se está expandiendo el rango de aplicación de la electrocoagulación debido a que es factible, económicos y tiene diversas aplicaciones en el mundo para tratar agua, agua residual y metales pesados.

En el artículo científico titulada “Performance Evaluation of Electrocoagulation process using Iron-rod Electrodes for Removing Hardness from Drinking Wáter” de la revista Desalination, publicada por Malakootian , Mansoorian & Moosazadeh (2010) ,

tuvieron como objetivo investigar la eficiencia del proceso de electrocoagulación en la eliminación de la dureza del agua a través del uso de electrodos de varilla de hierro. Para su estudio, se trabajó con una muestra de agua de la red de distribución de la ciudad de Anar ubicada en la parte noroeste de la provincia de Kerman, Irán. Los parámetros para eliminar la dureza, fueron pH (3.0, 7.0 y 10.0), potencial eléctrico de 6, 12 y 24 V; asimismo con tiempo de reacción de 10, 20 y 30 min. Se obtuvo una eficiencia de eliminación de Calcio de 98.2% y 97.4% para la dureza con los siguientes parámetros: Calcio con pH 10, voltaje 12 y un transcurso de tiempo de 60 min.

Poma Javier y Quispe Sanca (2016) en su tesis titulada “Remoción de Contaminantes de Agua Residuales Urbanas por el Método de Electrocoagulación”, de la Universidad Nacional del Centro del Perú. Sostiene que la variación de la densidad de corriente y el tiempo a nivel de laboratorio tiene influencia directa en la remoción de los contaminantes, asimismo se recalca que el tiempo de residencia óptimo para el proceso de electrocoagulación es 20 minutos, con una distancia entre electrodos de 1 cm. Se concluye y demuestra que los porcentajes de remoción de los indicadores son del 85,9% para DBO, 75,3% para DQO, 93,8 % para aceites y grasas, 89,5% para conductividad eléctrica, 79,6% para turbiedad, 95,3% para sólidos totales, 91,0% para sólidos suspendidos, 91,3% para sólidos disueltos, 70,3% y para dureza total, 91,3%.

La tesis titulada “Evaluación de la Eficiencia de una Celda de Electrocoagulación a Escala Laboratorio para el Tratamiento de Agua” publicada por (Aguilar Ascón, 2015), de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos; sostiene que la electrocoagulación es un proceso efectivo en la remoción y disminución de contaminantes, siendo así este método una alternativa viable; asimismo señala la influencia del pH, intensidad de corriente y el tiempo en el tratamiento de agua en el proceso donde se usaron electrodos de aluminio y fierro. Entre los resultados obtenidos fueron la disminución de la turbiedad

de 700 UNT a 0 UNT en un tiempo de 15 minutos, la disminución de DQO de 2030 mg/L a 420 mg/L con condiciones de amperaje de 5A, la conductividad desde 29300 uS/cm a 2250 uS/cm y con un pH de 7.12. Demostrando una eficiencia del 87%.

La tesis titulada "Remoción Eficiente de Colorante Refractario Azul MNO Reactivo en Combinación con Vinil Sulfónico en aguas Residuales Mediante técnicas de Electrocoagulación y Adsorción" publicada por (Bermeo Garay M, 2017), de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos; sostiene que la configuración más eficiente para el tratamiento por electrocoagulación (sin uso de un sistema de adsorción de carbón activado) a los efluentes textiles en la ciudad de Guayaquil fue de 3 celdas y 2 paquetes a 15A, logrando así una remoción correspondiente a 31 mg/equivalente al 97.54% de la Demanda Química de Oxígeno; así mismo obtuvo una reducción de 3500 a 32 unidades de color, equivalente a 99.11% de remoción.

Castillo Castro y Oliden Arturo (2017), en su tesis titulada "Influencia de la distancia entre Electroodos y Densidad de Corriente en la Disminución de carga Contaminante de Residuos Líquidos de Pelambre por Electrocoagulación" de la Universidad Nacional de Trujillo, realizaron su proceso como tal en un tanque de acrílico con electrodos de aluminio. El estudio afirma que la densidad de corriente influye positivamente en la disminución de la carga orgánica contaminante de residuos líquidos de pelambre por electrocoagulación, ya que existió un mejor resultado a una distancia de 1.5 cm entre electrodos para carga orgánica y por otro lado, para reducir DQO la densidad de corriente es de 100 A/m². Asimismo, logran alcanzar 54.8% de reducción para Sulfuros y 36.45% para DQO.

La tesis titulada "Evaluación de la Tratabilidad del Efluente generado por un Laboratorio Metalúrgico aplicando la Electrocoagulación" publicada por (Condori Pantoja, 2018), de la Universidad Nacional Agraria La Molina; diseñó un

electrocoagulador con dimensiones 40.8 cm x 10.6 cm x 14 cm y una capacidad de 6.168 L para evaluar la factibilidad de remoción de metales pesados (Pb, Cd y Cr) del efluente generado por el laboratorio metalúrgico Alfred H. Knight utilizando la electrocoagulación. En todas las pruebas, se trabajó con un tiempo de remoción de 60 minutos, logrando así una remoción de hasta 94.67% de Plomo con electrodos de hierro a 1 cm de distancia. Sin embargo, al usar electrodos de aluminio para el Cadmio se alcanzó una reducción de hasta 49.54% a 1.5 cm de distancia; asimismo para el caso cromo se logró reducir 49.46% de cromo a 1 cm de distancia.

La tesis titulada “Tratamiento de Agua Residual procedente de Lavadoras por el Método de Electrocoagulación para la Reutilización en Riego de Vegetales - Ate Vitarte” publicada por (Cuba Tello, 2020), de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos; comprobó la viabilidad de uso de electrocoagulación con electrodos de aluminio y acero inoxidable con una capacidad de 10 litros de agua para tratar agua residual originario de lavadoras para regar los vegetales del condominio Jardines de Santa Clara de ate Vitarte. Por medio de análisis de varianza (ANOVA) determinó que los parámetros con mayor influencia en la remoción de la turbiedad fueron intensidad y tiempo. Se alcanzó una remoción de 99.02 % en turbiedad, 90.83% en DQO y 95.93% en Sólidos suspendidos Totales con niveles óptimos de 5 Amperios, 15 minutos, distancia de 2 cm y pH de 7.5.

La tesis titulada “Electrocoagulación en la Remoción de Mercurio de las Aguas Residuales en el Centro Poblado la Rinconada - Puno” publicada por (Quispe Quispe, 2015), de la Universidad Nacional del Altiplano; construyó una celda de electrocoagulación con material acrílico con capacidad de 1000 mL y una configuración de electrodos monopolar, empleando 5 placas de aluminio como electrodos, 3 placas conectadas al terminal positivo y 2 placas conectadas al terminal negativo de la fuente de poder; con una separación entre electrodos de 20 mm y un área total de los electrodos

sumergidos (ánodos de sacrificio) de 302.4 cm². Se logró reducir las concentraciones de dureza, alcalinidad, sulfatos, calcio, magnesio y mercurio. Sin embargo existió mayor remoción de hasta 97.00% (0.018 mg/L) de mercurio a una densidad de corriente de 6.61 mA/cm², asimismo una concentración de NaCl de 3 g/L y 30 minutos de tratamiento.

Coronel Huamán y Vila Vera (2013), en su tesis “Remoción de Contaminantes de las Aguas Residuales Urbanas del Colector parra del Riego por el Método de Electrocoagulación mediante Paneles Fotovoltaicos, a nivel de Laboratorio” de la Universidad Nacional del Centro del Perú; para lo cual se trató 1.8 L de agua residual con electrodos de aluminio y fierro , llegando a concluir en su estudio que el tiempo de residencia y la densidad de corriente tienen efecto significativo en la remoción de contaminantes, esto según su análisis de varianza. Entre los diferentes parámetros que logró reducir se destaca la dureza total, el cual disminuyo en un 86.65% bajo los siguientes niveles óptimos: 20 min por cada prueba, 1 cm de distancia entre electrodos, 67.5W (generado por paneles fotovoltaicos) y una densidad de corriente de 32.72 A/m².

1.2 Bases Teóricas

1.2.1 Osmosis Inversa

Es la aplicación de presión osmótica (PO) o mayor a ella para pasar solución diluida como agua desde la solución concentrada hacia la solución menos concentrada, esto a través de la membrana semipermeable. (Torres Ruiz, 2016, pág., 16)

La osmosis inversa es la migración del agua de una solución de mayor concentración a una de menor, a través de una barrera semipermeable por efecto de la aplicación de una presión mayor a la presión osmótica. Con esto se logra retener las sales de la solución en la barrera (Ferreira Ascencio, 2014, pág., 27).

1.2.2 Agua residual de osmosis inversa

El proceso de Ósmosis inversa es un proceso industrial donde el agua a tratar se desmineraliza al ser colocado en presiones altas a un conjunto de membranas semipermeables, estas membranas son seleccionadas de acuerdo a las especificaciones de las características físico químicos del agua. Este proceso genera dos tipos de agua, una es permeado donde pasa a través de la membrana y el otro es el agua residual donde se deriva la mayor cantidad de sales y es desechado.

1.2.3 Electrocoagulación

La electrocoagulación es un método alternativo a los sistemas convencionales de tratamiento de efluentes y se basa en el principio de electrólisis, ya que combina la coagulación química con los principios eléctricos, produciendo iones metálicos de alta valencia como coagulante en celdas electrolíticas (Reyes Ávila, D. y Mercado Martínez, I., 2003, pág., 13)

La electrocoagulación es un método electroquímico de tratamiento de aguas contaminadas el cual emplea electrodos consumibles para suplir iones en el agua residual. Asimismo usan un electrodo de sacrificio para que se corroa y se lleve a cabo la coagulación (Aristizábal Castrillón, A. y Bermúdez Agudelo, M., 2007)

1.2.4 Coagulación

Es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados. Para ello se usan coagulantes químicos y la aplicación de energía de mezclado. Este tratamiento resulta un gasto elevado cuando no está bien realizado (SEDAPAL, 2000, pág., 9-13).

1.2.5 Floculación

La floculación es el proceso posterior a la coagulación, que consiste en la agitación de la masa coagulada, la misma que sirve para favorecer el aumento de tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad. Existen dos tipos de floculación: Pericinéctica (producido por el movimiento natural de las moléculas del agua y esta inducida por la energía térmica) y Orto cinética (Se basa en las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua, el que es inducido por una energía exterior a la masa de agua) (SEDAPAL, 2000, pág., 33-34).

1.2.6 Reactores de electrocoagulación

Los Reactores de electrocoagulación se clasifican en Reactor tipo Batch o Reactor de Sistema Continuo. La selección de lo señalado líneas atrás, dependerá del tipo de la concentración y tipo de contaminante, así como de la cantidad de agua residual a tratar.

Otra característica es en función de la flotación, una vez sometido al proceso de electrocoagulación, el contaminante puede ser separado por flotación o sedimentación.

Ver figura 1. (Restrepo Mejía, 2006, pág., 68).

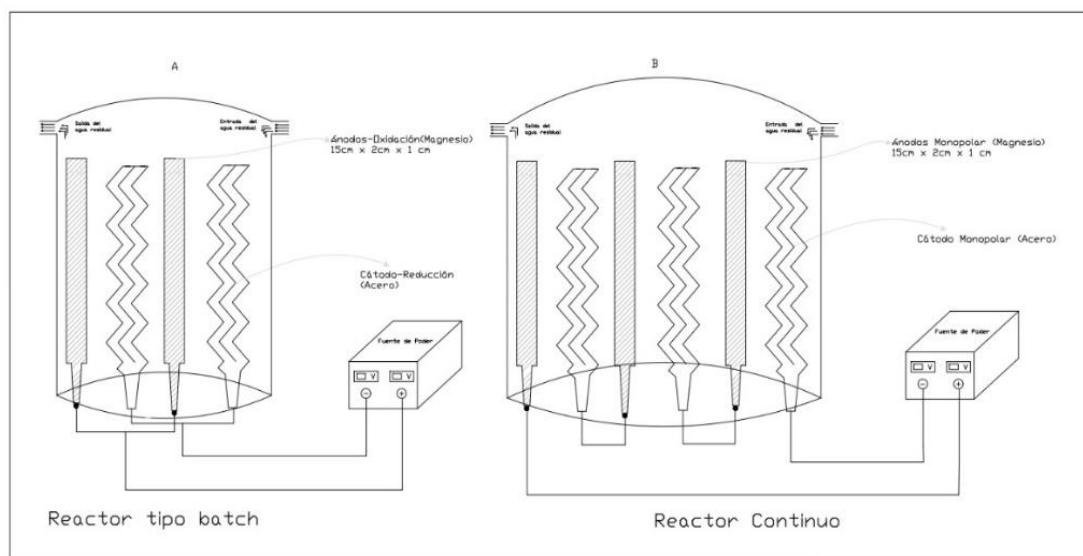


Figura 1. Reactores por el tipo de flujo.

Fuente: Elaboración propia.

1.2.7 Electrodo

Arboleda & Herrera (2015), afirma que el electrodo es la parte electrónica conductora de una celda electroquímica, pudiendo ser estructuras complicadas o simples (Arboleda Camacho, J. y Herrera López, P., pág. 9).

Los electrodos proporcionan iones tanto positivos como negativos. El ánodo provee iones metálicos. A este electrodo se le conoce como electrodo de sacrificio, ya que la placa metálica que la conforma se disuelve, mientras que la placa que forma el cátodo permanece sin disolverse. Los iones producidos cumplen la función de desestabilizar las cargas que poseen las partículas contaminantes presentes en el agua. Cuando estas cargas se han neutralizado los sistemas que mantienen las partículas en suspensión desaparecen, permitiendo la formación de agregados de los contaminantes e iniciando el proceso de coagulación. Los iones que proveen los electrodos desencadenan un proceso de eliminación de contaminantes (Restrepo Mejía, 2006, pág., 65).

1.2.8 Electrodo de Sacrificio

El electrodo de sacrificio llamado ánodo (proveedor iones metálicos); ya que la placa metálica con la que está conformado se disuelve, mientras que con el cátodo ocurre lo contrario (Arboleda Camacho, J. y Herrera López, P., 2015, pág. 9).

Son barras o láminas de metal que serán disueltas por el proceso de electrocoagulación ya que son estas las que proporcionan los iones necesarios para desestabilizar los coloides presentes en el agua a tratar.

1.2.9 Reactor por el tipo de flujo

Esta clasificación se base a lo que se desea aprovechar como es el flujo horizontal o vertical provocado por el oxígeno y el hidrogeno generado en los procesos anódicos, catódicos de oxidación y reducción del agua, además de acuerdo a la circulación del agua se puede conectar celdas o solo un canal (Guohua Chen, 2003, pág. 16-17).

1.2.10 Ley de Faraday

La ley de Faraday nos permite calcular la cantidad de masa que se adhiere a los electrodos en los ensayos, esto a causa de los fenómenos electrolíticos. Asimismo, establece la razón de cambio de flujo magnético que pasa a través de una solución electrolítica y el peso de la sustancia que se forma por reacción química en los electrodos (Reyes Ávila, D. y Mercado Martínez, I., 2003, pág., 11-12).

Esta ley de acuerdo al proceso de electrocoagulación señala que la cantidad de sustancias formadas en un electrodo es proporcional a la cantidad de cargas que pasan a través del sistema, y el número total de moles de sustancia formada en un electrodo está relacionado estequiométricamente con la cantidad de electricidad puesta en el sistema. (Restrepo Mejía, 2006, pág., 66).

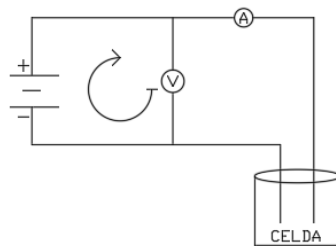


Figura 2. Ley de Faraday para electrocoagulación

Fuente: Elaboración propia.

$$See = \frac{n \cdot F \cdot V \cdot \vartheta}{3.6 \cdot 10^3 \cdot M} \quad (3)$$

$$\vartheta = \frac{\Delta M_{teórico}}{\Delta M_{experimental}} \quad (4)$$

$$\Delta M_{teórico} = \frac{M \cdot I \cdot t_{EC}}{n \cdot F} \quad (5)$$

Donde:

N: Número de electrones.

F: Constante de Faraday ($96487 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$).

V: Voltaje (Volt).

ϑ : Eficiencia de la corriente (%).

M: Peso molecular del aluminio ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$).

$\Delta M_{experimental}$: Pérdida de peso experimental de los electrodos (g) durante el proceso de electrocoagulación (g).

$\Delta M_{teórico}$: Cantidad teórica de hierro que se disuelve de acuerdo a la Ley de Faraday (g).

1.2.11 Optimización

El propósito de la optimización de los procesos es reducir o eliminar la pérdida de tiempo y recursos, gastos innecesarios, obstáculos y errores, llegando a la meta del proceso.

1.2.12 Diseño factorial

Se sostiene que el diseño factorial tiene como principal objetivo determinar una combinación de niveles de los factores en la que el desempeño del proceso sea mejor. (G. de Benitez y G. Pece, 2010, pág. 3)

Se entiende por diseño experimental o factorial a la planeación de una serie de experimentos donde se varían los valores de las variables de entrada de un proceso o sistema y se miden los valores de las variables respuesta o variable de salida, con el fin de optimizarla en algún sentido. (Siqueiros Tarazón, 2004, pág. 4) (Ver figura 3)

experiencias	Factores				Parámetro 1	Parámetro 2	Parámetro 3	Parámetro n°
	X1	X2	X3					
1									
2									
3									
⋮									
n°									

Figura 3. Matriz Factorial

Fuente: Elaboración propia.

1.2.13 Flujo

El flujo como parámetro tiene importancia cuando se quiera conocer el movimiento provocado por el oxígeno y el hidrogeno generados en el proceso anódico y catódico de oxidación. Este mismo nos indica el volumen que pasa por un área en un

tiempo determinado; por ejemplo, galones por minuto o litros por minuto (Guohua Chen, 2004, pág., 16).

1.2.14 Parámetros de Operación

Los parámetros de operación aportan información actualizada y objetiva para determinar y mejorar el rendimiento del equipo, estos indican los requerimientos y condiciones necesarias, con ello nos permiten garantizar un óptimo aprovechamiento del equipo de electrocoagulación.

Un parámetro se considera esencial en todas las áreas y es un indicativo bien marcado para lograr evaluar o valorar una situación particular. Por ejemplo, a partir de un parámetro, una determinada circunstancia puede ser entendida o colocada en perspectiva para su programación.

1.2.15 Densidad de corriente

En el proceso de electrocoagulación este parámetro tiene influencia en la remoción del contaminante de un agua. Este es proporcional a su eficiencia, ya que determina la cantidad de iones del electrodo liberado. Cabe resaltar que aun siendo proporcional su eficiencia, al ser demasiado grande la densidad de corriente podría existir disminución en la eficiencia (Restrepo Mejía, 2006, pág., 71).

1.2.16 Conductividad eléctrica

Este parámetro es un indicador que depende de la cantidad de sales disueltas presentes en un líquido y es inversamente proporcional a la resistividad del mismo (Aguilar Asco, 2015, pág., 36).

1.2.17 Filtro

Es una operación que consiste en hacer pasar un líquido que contiene materias en suspensión a través de un medio filtrante que permite el paso del líquido pero no el de las partículas sólidas, las cuales quedan retenidas en el medio filtrante. De este modo, las partículas que no han sedimentado en el decantador son retenidas en los filtros (Jaramillo Terán, 2012, pág., 57).

1.2.18 Parámetros Físico químicos

Ph

El pH puede influir en el tratamiento de agua como la desinfección y coagulación. Es común adicionar un alcalino para medios ácidos que tengan pH menor a 7, esto con el objetivo de optimizar los procesos de coagulación. (Lidia de Vargas, 2004, pág., 13)

Asimismo el pH influye en el proceso de electrocoagulación, ya que participa directamente en el equilibrio del hidrolisis, que determina el origen de las diversas especies en solución (Ojeda Armaigmac, 2010, pág., 8).

Conductividad Eléctrica

La conductividad específica del agua es la medida de la habilidad para transportar una corriente eléctrica, varía con el tipo y cantidad de iones que contenga, asimismo esto depende de la temperatura (Roccio Yauri, Luis 2015, pág., 31).

El agua pura tiene una conductividad eléctrica muy baja. El agua natural tiene iones en disolución y su conductividad es mayor y proporcional a la cantidad y características de esos electrolitos (Marón Ocampo y Osés Pérez, 2013, pág., 25).

Turbiedad

La turbiedad es originada por las partículas en suspensión o coloides. La turbiedad reduce la transparencia del agua en diferentes grados. Asimismo, este parámetro es de

vital importancia para determinar la dosis del coagulante y así poder reducir a una turbiedad residual más baja. (Lidia de Vargas, 2004, pág., 5).

Se entiende por turbiedad como la propiedad óptica de una muestra que tiende a expandirse y con esto absorber la luz (Pinzón Gamboa, 2010, pág., 6).

Es una forma indirecta de medir la concentración de las partículas suspendidas en un líquido; mide el efecto de la dispersión que estas partículas presentan al paso de la luz; y es función del número, tamaño y forma de partículas (Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima, 2000, pág., 19).

Dureza

Corresponde a la suma de los cationes polivalentes expresados como la cantidad equivalente de carbonato de calcio, entre los más comunes se encuentra el magnesio y calcio. Se puede considerar agua dura cuando tiene de 200 a 300 mg/L; medianamente dura, cuando tiene de 100 a 200 mg/L y blanda cuando tiene dureza menor de 100 mg/L (en todos los casos, como CaCO_3) (Lidia de Vargas, 2004, pág., 30).

Sólidos Totales Disueltos

Desde un punto de vista físico, los sólidos totales que se encuentran como impurezas en el agua y pueden ser clasificados en partículas no filtrables o en suspensión (Pinzón Gamboa, 2010, pág., 5).

La movilidad de los iones disueltos y en su valencia, implica un cambio en la conductividad, y por ello el valor de la conductividad es muy usado en el análisis de aguas para obtener un valor estimadamente rápido del contenido de sólidos disueltos (Marón Ocampo y Osés Pérez, 2013, pág., 25).

1.3 Formulación del problema.

1.3.1 Problema General

- ¿Cuáles serán los parámetros de operación de un equipo de electrocoagulación para la reducción de la dureza total a partir de agua residual proveniente de osmosis inversa?

1.3.2 Problemas Específico

- ¿Cuáles serán las características físico químicos del agua residual a partir del agua residual de osmosis inversa?
- ¿Cuáles serán los parámetros y niveles más adecuados del equipo de electrocoagulación (Flujo Volumétrico, Potencial eléctrico y volumen)?
- ¿Cuáles serán las características físico químicos (pH, conductividad, sólidos totales disueltos, Dureza Total y NTU) del agua residual después del tratamiento mediante el equipo de electrocoagulación?

1.4 Justificación

El agua de consumo humano es una fuente principal de iones de Calcio (Ca^{+2}) y Magnesio (Mg^{+2}), sin embargo, en la actualidad el agua residual producido del Osmosis inversa contiene sales (iones) muy elevadas que se evidencian al realizar un monitoreo de la calidad de agua, donde dichas aguas son vertidas sin ningún tratamiento. En esta investigación se desea destinar para consumo humano, por lo tanto se usó como referencia el D.S. N°031-2010-MINSA. Por ese motivo se hace necesario la evaluación de tratamientos más eficientes con la finalidad de evaluar los parámetros de operación como el de la electrocoagulación. Este proyecto tiene como finalidad optar una nueva tecnología eficiente en la reducción de los iones de Calcio y Magnesio tal como la electrocoagulación con ánodos de Magnesio por el mayor desprendimiento de iones y capturar la dureza total del agua.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

- Determinar los parámetros de operación más adecuados del equipo de electrocoagulación para la reducción de la dureza total a partir del agua residual proveniente de osmosis inversa.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar el parámetro físico químicas (pH, conductividad, sólidos totales disueltos, NTU y dureza total) del agua residual proveniente de osmosis inversa.
- Evaluar los parámetros y niveles más adecuados de experimentación del equipo de electrocoagulación (flujo volumétrico, potencial eléctrico y conductividad).
- Evaluar los parámetros físico químicos (pH, conductividad, sólidos totales disueltos y NTU) de las corrientes de concentrado y diluidas procedentes del módulo de electrocoagulación.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis General

- Con la evaluación de los parámetros de operación del equipo de electrocoagulación más adecuados se reducirá la dureza total (altamente soluble) a partir de agua residual cumpliendo con la norma D.S. 031-2010-MINSA.

1.6.2 Hipótesis Específica

- Al caracterizar los parámetros físicos químicos a partir del agua residual de osmosis inversa, se espera conocer la composición química (Dureza Total, Sólidos Totales Disueltos, pH, NTU y Conductividad).
- Al evaluar los parámetros y niveles de experimentación (Potencial eléctrico, flujo volumétrico y volumen) del equipo de electrocoagulación se logrará alcanzar altos valores de porcentaje de separación de sales.

- Al caracterizar los parámetros físico químicos (pH, conductividad, sólidos totales disueltos, dureza total y NTU) de las corrientes de concentrado y diluido, se logrará conocer la concentración.

CAPITULO II. METODOLOGÍA

2.1 Tipo de investigación

2.1.1 Según el propósito: Explicativo

Según (Hernández Sampiere, R., Fernández Collado, C. y Baptista Lucio, P., 2014) esta investigación tiene como propósito concentrar su atención a las posibilidades concretas de llevar a la práctica las teorías generales y destinar los esfuerzos a resolver las necesidades que se plantean, asimismo se analiza el causa-efecto para con ello conocer los factores que intervienen.

2.1.2 Según el diseño de investigación: Experimental factorial

En los diseños experimentales se analiza el efecto sobre las variables dependientes de acuerdo a la manipulación de dos (02) o más variables independientes que son incluidos en dos (02) o más niveles, con la finalidad que estos se combinen (Babbie, 2014 y Wiersma y Jurs, 2008 citado por (Hernández Sampiere, R., Fernández Collado, C. y Baptista Lucio, P., 2014, pág. 148).

2.2 Población y muestra

2.2.1 Población

Agua residual proveniente del equipo de Osmosis Inversa (50 litros).

2.2.2 Muestra

Las unidades de análisis son las siguientes:

- De 1 a 3 litros de muestra por experimento según el diseño factorial, siendo un total de 8 experimentos.

2.2.2.1 Tipo de muestra: Simple o puntual

Según (Corporación Autónoma Regional de Los Valles del Sinu y del San Jorge, 2012, pág. 2) una muestra simple o puntual “Es una muestra recolectada en un lugar y tiempo específico y que refleja las circunstancias particulares del cuerpo de agua para el momento y sitio de su recolección”.

2.2.2.2 Número de muestras

En la hipótesis general, el número general de muestras es de 8, por lo tanto; el número total de muestras para el Pretest se usaron 8 (Grupo control) y para las muestras del postest fueron 8 (Grupo experimental).

2.2.2.3 Muestra de Grupo control

Las muestras tomadas para el grupo control se les llama a aquellas que son analizadas antes de un experimento (Pretest), dicho de otra manera; antes del módulo de electrocoagulación.

2.2.2.4 Muestra de Grupo experimental

Las muestras tomadas para el grupo experimental son aquellas muestras que son analizadas después del experimento (postest), dicho de otra manera; después de pasar por el módulo de electrocoagulación.

2.2.2.5 Procedimiento de toma de muestra: Directamente (in situ)

La presente investigación se desarrolló en la empresa Ingeniería de membranas ubicada en el distrito de Carabayllo. Las muestras de agua residual se tomaron directamente del equipo de Osmosis Inversa.

Los recipientes que no contienen ni requieren preservantes se pueden enjuagar (purgar) dos o tres veces, con la misma agua que se va a analizar y entonces se toma la muestra por cada uno de los parámetros que se enviarán al laboratorio (Corporación Autónoma Regional de Los Valles del Sinu y del San Jorge, 2012).

2.2.3 Materiales e instrumentos

2.2.3.1 Materiales

Para la construcción del equipo de electrocoagulación se utilizaron los materiales que se muestran en la figura 20 (Ver anexo 2)

2.2.3.2 Instrumentos

Para los análisis de los parámetros Físico químicos se utilizaron los instrumentos que se muestran en la figura 21 (Ver anexo 3).

2.3 Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

Las técnicas de muestreo varían de acuerdo con la situación específica y según los objetivos previstos; algunos estudios requieren solamente muestra instantánea o simple (Normas Técnicas NTC-ISO 5667-2 y 5667-3, pág. 5).

Respecto al análisis de datos de la hipótesis general se empleó el Software Minitab 18 por su diseño en ejecutar funciones de estadística avanzada, asimismo por su confiabilidad en estadística para un diseño experimental donde se tiene una matriz factorial.

2.3.1 Método de análisis de datos

Para el transporte, conservación y preservación de las muestras analizadas de acuerdo al parámetro físico químicos evaluados se tuvo como guía la Resolución Jefatural N°010-2016 ANA- Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales. (Autoridad Nacional del Agua, 2016).

Para la toma de muestras de los parámetros Físico químicos, los procedimientos se describen a continuación: Se usó envases de 1 litro (plástico blanco), se realizó análisis inmediatos para los parámetros in situ (pH y Conductividad). Se usó preservantes de acuerdo al parámetro necesario como en el caso de la dureza total donde se añade gotas de Ácido Nítrico (HNO₃). Luego, la muestra es almacenada en un cooler con geles

refrigerantes, se aseguró que el cooler contenía únicamente las muestras. Finalmente se trasladó las muestras.

2.3.1.1 Determinación del pH:

- ✓ Se lavó el electrodo del pH-metro con agua destilada y se secó cuidadosamente con papel.
- ✓ Se llenó en un vaso precipitado de 50 ml con la muestra y se procedió a introducir el electrodo hasta que el resultado sea estable.
- ✓ Se retiró el electrodo del vaso precipitado para lavarse con agua destilada y se secó.
- ✓ Se tomó nota del resultado en una libreta de apuntes.

2.3.1.2 Conductividad Eléctrica:

- ✓ Se encendió el equipo Martini Instrument (Conductímetro) y se esperó que se estabilice la lectura.
- ✓ Se lavó la celda conductimétrica con agua destilada y se procedió a secar cuidadosamente.
- ✓ Se llenó un vaso precipitado de 50 ml con la muestra y se procedió a introducir la celda conductimétrica hasta que el resultado sea estable, evitando alguna burbuja dentro del recipiente.
- ✓ Se retiró la celda conductimétrica del vaso precipitado y se procedió a lavarse con agua destilada y se secó.
- ✓ Se tomó nota del resultado en una libreta de apuntes.

2.3.1.3 Determinación de la turbidez:

- ✓ Se encendió el equipo Turbimímetro (Hach) y se cogió un frasco donde se limpió la parte externa para que nada interfiera con el paso de luz.
- ✓ Se llenó el frasco con la muestra hasta la línea límite y se procedió a analizar.
- ✓ Se tomó nota del resultado en una libreta de apuntes.

2.3.1.4 Sólidos totales disueltos:

- ✓ Se encendió el equipo Multiparametro (Hach) y se esperó que se estabilice la lectura.
- ✓ Se lavó el electrodo con agua destilada y se procedió a secar con papel.
- ✓ Se llenó un vaso precipitado de 50 ml con la muestra y se procedió a introducir el electrodo hasta que el resultado sea estable.
- ✓ Se retiró el electrodo del vaso precipitado y se procedió a lavarse con agua destilada y se secó.
- ✓ Se tomó nota del resultado en una libreta de apuntes.

2.3.1.5 Dureza total:

- ✓ Se encendió el equipo Medidor de Dureza total (Hanna) y se esperó que se estabilice la lectura.
- ✓ Se cogió el frasco y se limpió la parte externa para que nada interfiera con el paso de luz.
- ✓ Se llenó el frasco con el agua hasta la línea límite y se introdujo al equipo.
- ✓ Se evaluó la dureza.
- ✓ Se tomó nota del resultado en una libreta de apuntes.

Tabla 1. *Conservación y preservación de muestra de agua en función del parámetro evaluado.*

PARÁMETRO	TIPO DE RECIPIENTE	CONDICIONES DE PRESERVACIÓN Y ALMACENAMIENTO	TIEMPO MÁXIMO DE ALMACENAMIENTO
Ph Conductividad eléctrica turbiedad	Plástico o vidrio	in situ	24 horas
	Plástico o vidrio	in situ	24 horas
	Plástico o vidrio	in situ	24 horas
Dureza	PE-HD o PTFE/ PFA O FEP	Acidificar a Ph 1-2 con HNO ₃ o HCl.	1 mes
Solidos Totales disueltos	Plástico o vidrio		7 días

Fuente: Autoridad Nacional del Agua, 2016.

En la tabla 1, se evidencia los parámetros, el tipo de recipiente, las condiciones de preservación y el tiempo de conservación. Estos procedimientos se siguieron de acuerdo a la R.J N° 010-2016-ANA- Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales.

2.3.2. Procedimiento de análisis de datos

El análisis y procesamiento de los datos se efectuó mediante el software Minitab 18, usando diseño de experimentos se empleó un diseño factorial (tres factores y dos niveles por triplicado (ver tabla 2 y 9), donde el programa estadístico procesó los datos y proporcionó las diferentes combinaciones de tratamientos y mediante su aplicación se realizó una serie de tablas, gráficas y se realizó las siguientes pruebas estadísticas para determinar el efecto de los factores (voltaje, flujo y volumen) en la variable respuesta (reducción de dureza total)

Tabla 2. *Diseño factorial tres (03) por dos (02)*

DISEÑO EXPERIMENTAL-FACTORIAL										
PROMEDIO DE POSTEST										
Numero de experiencias	X1 (Voltaje)	X2 (Flujo)	X3 (Volumen)	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Yn°
1	4 V	100 ml/s	1000 ml	Y1.1	Y2.1	Y3.1	Y4.1	Y5.1		Yn.1
2	7,4 V	100 ml/s	1000 ml	Y1.2	Y2.2	Y3.2	Y4.2	Y5.2		Yn.2
3	4 V	150 ml/s	1000 ml	Y1.3	Y2.3	Y3.3	Y4.3	Y5.3		Yn.3
4	7,4 V	150 ml/s	1000 ml	Y1.4	Y2.4	Y3.4	Y4.4	Y5.4		Yn.4
5	4 V	100 ml/s	3000 ml	Y1.5	Y2.5	Y3.5	Y4.5	Y5.5		Yn.5
6	7,4 V	100 ml/s	3000 ml	Y1.6	Y2.6	Y3.6	Y4.6	Y5.6		Yn.6
7	4 V	150 ml/s	3000 ml	Y1.7	Y2.7	Y3.7	Y4.7	Y5.7		Yn.7
8	7,4 V	150 ml/s	3000 ml	Y1.8	Y2.8	Y3.8	Y4.8	Y5.8		Yn.8

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 2, se evidencia un diseño factorial de tres (03) factores de X1 (Voltaje), X2 (Flujo) y X3 (Volumen) por dos (02) niveles donde uno es la columna de experiencias (Y1.1 a Y1.8) con el cruce de los factores; asimismo se observa la combinación de los factores por cada experiencia donde cabe resaltar que ninguna combinación es repetida para tener experimentos independientes. Por otro lado se evidencia los resultados promedios del Pretest y Posttest de cada experimento por cada parámetro.

2.3.2.1 Análisis de residuales

Esta gráfica nos muestra el ajuste de la regresión de los promedios en los valores del cálculo por cada experimento que tiene similitud en las combinaciones de los factores, además para que se cumpla dichos valores tiene que sujetarse a la normalidad, donde los valores siguen una tendencia o se alejan de la curva; varianza constante, donde cada promedio tiene una tendencia predicha e independencia de cada experimento, esto quiere decir que ningún otro experimento guarda similitud, tendencia o patrones (Soporte Minitab, s.f.; 2018)

2.3.2.2 Histograma de residuos

Esta grafica nos muestra cómo se distribuye cada residuo de acuerdo a cada tratamiento.

2.3.2.3 Gráfica de probabilidad de residuales

La gráfica normal muestra si los residuos siguen una tendencia de acuerdo a la línea normal (Gráficas de probabilidad residual en Minitab, s.f.; 2018).

2.3.2.4 Residuos vs. Ajustes

Esta gráfica nos muestra si los residuos tienen alguna tendencia constante o están distribuido aleatoriamente (Gráficas de residuos incluidas en Minitab, s.f.; 2018).

2.3.2.5 Residuos vs. Orden de los datos:

Esta gráfica nos muestra que cada residuos son independientes en cada tratamiento, asimismo nos señala si cada residuo guarda correlación, idealmente cada residuo generado tiene que estar aleatoriamente rodeando a la línea central (la línea normal) (Gráficas de residuos incluidas en Minitab, s.f.; 2018).

2.3.2.6 Análisis de varianza (ANOVA)

Este dato sirve para observar varios grupos de los factores cuantitativos donde se compara las medias de los grupos, asimismo se observa el grado de libertad de cada factor y como cada factor predicho por el programa tiene un nivel de importancia de acuerdo al ajuste del valor p donde es menor al nivel de significancia y con ello aceptar o rechazar una hipótesis (nula o alternativa). (¿Qué es ANOVA?, s.f.: 2018).

- **Gráficas de probabilidad normal y la "prueba del lápiz grueso"**

También llamada “Prueba del lápiz grueso”, sirve para una aproximación informal de una prueba de normalidad. Para entender mejor esta gráfica, imaginaremos que las bandas son representadas por un lápiz grueso colocado sobre la línea ajustada:

Si los datos son muy distantes de los bordes del lápiz grueso, es probable que los datos no sean normales.

Si los puntos son cubiertos por el lápiz grueso, es probable que los datos si sean normales.

Esta prueba se usa con reiteración en una gráfica de probabilidad, ya que ayuda a una rápida evaluación visual; sin embargo, no es un sustituto de la inferencia estadística de la prueba de normalidad como tal (Gráficas de probabilidad normal y la "prueba del lápiz grueso”, s.f.; 2018).

- **Grados de libertad (GL)**

Muestra el número de elementos independientes en la suma de cuadrados, las cuales componen los siguientes elementos para su análisis: (Métodos y fórmulas para el análisis de varianza en ANOVA de un solo factor, s.f.; 2018).

- **Suma de los cuadrados (SC)**

Es la variación total en los datos.

- **Cuadrados medios (CM)**

El cálculo del cuadrado medio del factor sigue:

Factor CM= (Factor SC) / (Factor GL)

- **Valor F**

F=CM (Factor)/CM (Error)

- **Valor p**

Es la probabilidad de obtener una estadística de prueba que sea por lo menos tan extrema como el valor calculado real, si la hipótesis nula es verdadera.

- **Valor S**

Un estimado de σ , la medida de la desviación estándar dentro de una muestra. Observe que $S^2 = \text{Error de CM}$. Esto es equivalente a la desviación estándar agrupada usada en el cálculo de los intervalos de confianza individuales.

- **Valor R-cuad**

$1 - ((\text{Error SC} / \text{SC Total}))$

- **Valor R-cuad.(ajustado)**

$$1 - \frac{\text{Error CM}}{\text{SC Total} / \text{GL Total}}$$

Donde:

CM	Cuadrado medio
SC	Suma de los cuadrados
GL	Grados de libertad

2.3.2.7 Diagrama de Pareto

Es un diagrama donde nos muestra el grado de importancia de los factores predichos, estos están organizados de mayor y menor grado, en esta grafica también se muestra cómo interactúan cada factor así sean independientes o en grupos; estos asimismo son generados con el nivel de **significancia de 0.05**. (Elementos básicos de un diagrama de Pareto, s.f.; 2018).

2.3.2.8 Gráfica de efectos principales

Esta gráfica nos muestra las diferencias de las medias de nivel en cada factor que uno incluye en el programa, asimismo nos señala como cada factor tiene importancia de acuerdo a cada nivel (¿Qué es una gráfica de efectos principales?, s.f.; 2018).

2.3.2.9 Gráfica de interacción

Esta gráfica nos muestra cual es la importancia de niveles de los factores agrupados entre sí por sus medias en el eje X. Mientras las líneas sean menos paralelas mayor será la interacción entre cada factor (Revisión general de Gráfica de interacción, s.f.; 2018).

2.3.2.10 Gráfica de contorno

En esta gráfica se observa una vista bidimensional donde cada línea y puntos tienen una respuesta predicha por el programa y son de gran importancia de acuerdo a las condiciones que uno incluye, esta grafica por colores de menos a mayor contraste, donde el mayor contraste tiene mayor importancia, asimismo muestra las condiciones en los ejes; este puede ser generados entre factores de dos en dos (Gráficas de contorno y gráficas de superficie 3D, s.f.; 2018).

2.4 Equipo experimental del módulo de electrocoagulación

2.4.1 Descripción del equipo de electrocoagulación

La dimensión de la celda a escala laboratorio tiene una capacidad de tratar 4.5 litros de agua. El material de la celda es de acrílico transparente, de forma cilíndrico rectangular, en donde se sumergen los electrodos (Magnesio y Acero inoxidable) en orificios enroscable en la base del cilindro (ver figura 23, anexo 2).

Dichos electrodos están colocados en la base y conectados a una fuente de poder por donde se suministra intensidad de corriente eléctrica para el proceso de electrocoagulación, esta intensidad es variable de acuerdo a los experimentos. (Ver figura 23 y 24)

2.4.1.1 Celda de electrocoagulación

La celda de electrocoagulación fue diseñada para tratar 4.5 litros de agua, el material de material acrílico transparente con la finalidad de observar los procesos físicos químicos en el proceso de electrocoagulación. La celda es totalmente desarmable para brindar mantenimiento de limpieza a los electrodos por cada prueba. (Ver figura 23)

La celda tiene forma cilíndrica rectangular con las siguientes dimensiones:

Diámetro: 16 cm Altura: 21 cm

El agua a tratar se llenó hasta una altura de 21 cm. La celda se diseñó con un criterio de generar dos (2) zonas donde se les denominó:

2.4.1.1.1 Zona de reacción

Se consideró así donde se encuentran sumergidos los electrodos y se observa el proceso de electrocoagulación (Ver figura 23)

2.4.1.1.2 Zona de sedimentación

Se consideró así donde precipitan los lodos sedimentados durante el proceso de electrocoagulación. (Ver figura 23)

2.4.1.2 Electrodo

El material utilizado como electrodos fueron el magnesio y acero inoxidable. Las dimensiones de los electrodos de magnesio fueron de 15cm de largo, 2 cm de ancho y 1cm de anchura, de forma paralelepípedo. El ánodo de acero inoxidable fue en forma de zigzag, donde sus dimensiones fueron de 16 cm de altura y una separación de 20°. (Ver figura 20, Anexo 2)

Para determinar el espaciado entre las barras de magnesio se colocó a 4 cm del centro del ánodo de acero inoxidable. Se utilizaron un total de 4 electrodos de Magnesio y 1 ánodo de Acero inoxidable, el electrodo de magnesio se utilizó como sacrificio (Ver figura 7)

2.4.1.3 Fuente de Poder

La fuente de poder utilizada nos permitió regular la cantidad de intensidad de corriente suministrada a la celda, esta fuente de poder tenía una capacidad de 15 amperios y un voltaje de 0 a 30 V, para las mediciones se colocaron los cables por debajo de la base de la celda donde el electrodo se enrosca y sobresale por debajo de la base. Para el suministro de corriente se utilizó cables y cocodrilos para conectarlos a las barras de magnesio y al acero inoxidable. (Ver figura 20, anexo 2)

2.4.1.4 Ensayos de laboratorio preliminares.

El proceso de electrocoagulación depende de factores que influyen en si como la intensidad de corriente, pH, conductividad, tiempo de tratamiento, flujo y el material de los electrodos. Conocer estos en ensayos preliminares permitió conocer y evaluar el modulo a escala de laboratorio.

2.4.1.5 Caracterización físico química del agua a tratar.

El agua seleccionada para realizar los experimentos en el laboratorio proviene del agua residual del equipo de osmosis inversa la cual es en la empresa Ingeniería de Membranas ubicado en el distrito de Carabayllo; asimismo los resultados de la caracterización es el promedio de todas las muestras tomadas.

Respecto a los parámetros que influyen directamente con el proceso de electrocoagulación como el pH y la conductividad presentan valores normales que es casi neutro, pH 8.2788 y conductividad 1215.25 uS/cm por lo cual no fue necesario agregarle un coagulante y no considerarse como variable respuesta para los experimentos.

Los valores de Solidos totales disueltos de 559.90 y turbiedad 0.079, ambos presentan valores por debajo del DS. 031-MINSA-SA por lo cual no se consideró como una variable respuesta.

Sin embargo los valores de la dureza total se evidenciaron por encima de los Valores de acuerdo al DS. 031-MINSA-SA para agua residual de osmosis inversa cuyo valor es de 534.355 mgCaCo₃, por lo cual este parámetro es considerado como Variable respuesta para la presente investigación. (Ver tabla 3)

Tabla 3. *Promedio del Análisis Físico Químico del agua residual proveniente de Osmosis Inversa.*

PARAMETRO	UNIDAD	RESULTADO	LMP
pH	-	8.2788	6.5-8.5
Conductividad	uS/cm	1215.25	1500
Solidos Totales Disueltos	STD	559.90	1000
Turbiedad	NTU	0.079	5
Dureza	mgCaCo ₃	534.355	500

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3, se puede observar los parámetros analizados junto con sus resultados para conocer las características físico químicas de las condiciones iniciales del agua residual de osmosis inversa.

2.4.2 Procedimiento de instalación

2.4.2.1 Dimensión.

El módulo de electrocoagulación está compuesto por cuatro (04) electrodos de Magnesio (Mg), este se compró en la empresa Cathodic Protection of Perú S.A.C.

La estructura está compuesto por Hierro, donde las dimensiones son de 1.60 metros de largo x 0.30 metros de ancho x 0.30 metros de profundidad, sin considerar el tanque de almacenamiento y la celda de electrocoagulación.

Los elementos del sistema son los siguientes: El tanque de almacenamiento (0.22 metros de diámetro x 0.15 metros de altura), un cartucho como filtro final de 1 micra. A continuación, se observa el módulo de electrocoagulación y esquema en la figura 22, 23 y 24.

2.4.3 Alimentación del módulo de electrocoagulación

El módulo de electrocoagulación se alimentó del agua residual proveniente de Osmosis inversa siguiendo todos los pasos antes mencionados en el 3.2.2.5

2.4.4 Fase experimental

El módulo de electrocoagulación es alimentado por 4.42 litro de agua residual de osmosis inversa donde es bombeado de manera recircular por un motor hacia la celda que está colocado los electrodos de magnesio y el ánodo de acero inoxidable; estos a su vez conectados a la fuente eléctrica, donde se genera la liberación de burbujas de hidrogeno gaseoso las cuales ayudan a la flotación de las partículas floculadas (Ver figura 4), las cuales serán retiradas posteriormente mediante un filtro.

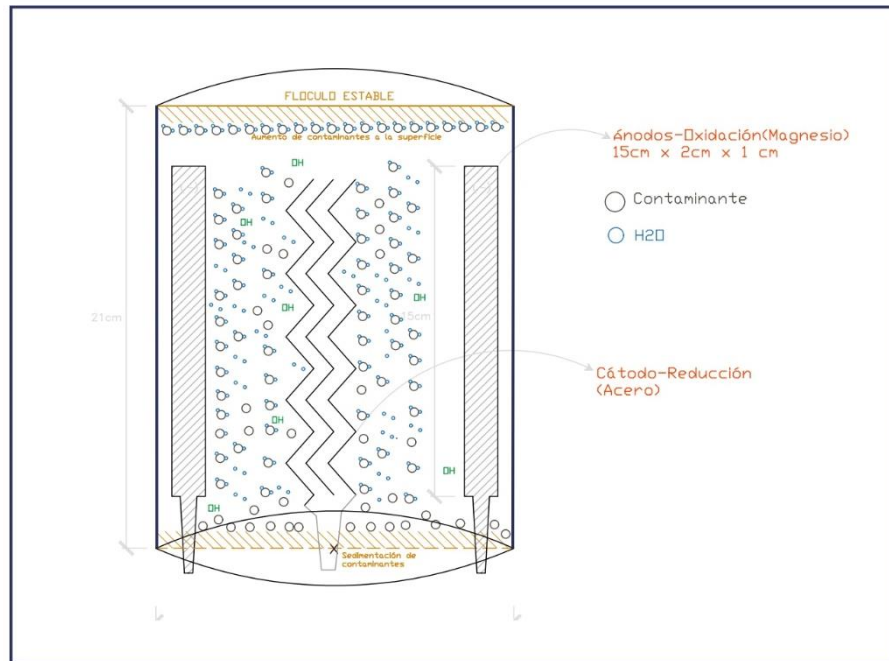


Figura 4. Esquema de una celda de electrocoagulación.
Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO III. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la investigación durante el tratamiento.

3.1 Resultado de Parametros evaluados

3.1.1 Caracterización Físico – Químico

La tabla 4, 5, 6, 7 y 8 muestra los resultados obtenidos en el equipo de electrocoagulación evaluando el pretest y postest.

Tabla 4. *Resultados del pH.*

pH							
	Pretest	Postest 1	Postest 2	Postest 3	Promedio	LMP (min)	LMP (max)
1	8.30	8.43	8.38	8.37	8.39	6.5	8.5
2	8.33	8.42	8.39	8.23	8.35	6.5	8.5
3	8.15	8.36	8.33	8.12	8.27	6.5	8.5
4	8.18	8.38	8.31	8.13	8.27	6.5	8.5
5	8.31	8.43	8.38	8.17	8.33	6.5	8.5
6	8.13	8.23	8.18	8.11	8.17	6.5	8.5
7	8.43	8.29	8.21	8.17	8.22	6.5	8.5
8	8.40	8.31	8.27	8.15	8.24	6.5	8.5
Promedio	8.2788	8.36	8.31	8.18	8.2813		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. *Resultados de la conductividad.*

Conductividad (uS/cm)						
	Pretest	Postest 1	Postest 2	Postest 3	Promedio	LMP
1	1200	995.85	995.35	995.33	995.51	1500
2	1210	950.61	950.19	950.23	950.34	1500
3	1220	988.94	988.46	988.66	988.69	1500
4	1218	946.55	946.61	946.31	946.49	1500
5	1210	992.46	991.94	992.75	992.38	1500
6	1225	957.83	957.37	957.41	957.54	1500
7	1220	980.72	980.28	980.37	980.46	1500
8	1219	940.34	939.86	940.53	940.24	1500
Promedio	1215.25	969.16	968.76	968.95	968.96	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Resultados de la Dureza Total.

	Dureza Total (mgCaCo ₃)									LMP
	Pretest	Postest 1	Postest 2	Postest 3	Promedio	Porcentaje de Reducción (%)				
						Postest 1	Postest 2	Postest 3	Promedio	
1	531.5	451.40	451.33	451.15	451.29	15.07 %	15.08 %	15.12 %	15.09 %	500
2	532.53	411.51	411.40	411.18	411.36	22.73 %	22.75 %	22.79 %	22.75 %	500
3	531.83	446.23	446.00	445.77	446.00	16.10 %	16.14 %	16.18 %	16.14 %	500
4	533.36	409.61	409.50	409.24	409.45	23.20 %	23.22 %	23.27 %	23.23 %	500
5	533.40	440.76	440.60	440.40	440.59	17.37 %	17.40 %	17.44 %	17.40 %	500
6	536.67	409.93	409.80	409.68	409.80	23.62 %	23.64 %	23.66 %	23.64 %	500
7	535.25	445.92	445.80	445.66	445.79	16.69 %	16.71 %	16.74 %	16.71 %	500
8	540.30	407.51	407.30	407.21	407.34	24.58 %	24.62 %	24.63 %	24.61 %	500
Promedio	534.355	427.86	427.72	427.54	427.70	19.92 %	19.94 %	19.98 %	19.95 %	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. *Resultados de los Solidos Totales Suspendidos.*

Solidos Totales Disueltos (STD)						
	Pretest	Postest 1	Postest 2	Postest 3	Promedio	LMP
1	560.13	480.09	480.6	480.31	480.33	1000
2	563.23	450.6	450.42	450.37	450.46	1000
3	561.28	477.64	477.53	477.48	477.55	1000
4	565.27	462.53	462.45	462.33	462.44	1000
5	557.12	483.16	483.09	483.05	483.10	1000
6	559.53	453.4	453.37	453.63	453.47	1000
7	548.60	479.23	479.16	479.01	479.13	1000
8	564.01	440.25	440.13	440.07	440.15	1000
Promedio	559.90	465.86	465.84	465.78	465.83	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. *Resultados de la Turbiedad*

Turbiedad (NTU)						
	Pretest	Postest 1	Postest 2	Postest 3	Promedio	LMP
1	0.08	0.092	0.050	0.048	0.063	5
2	0.078	0.084	0.072	0.036	0.064	5
3	0.075	0.093	0.063	0.043	0.066	5
4	0.08	0.085	0.075	0.039	0.066	5
5	0.077	0.098	0.082	0.046	0.075	5
6	0.087	0.083	0.068	0.033	0.061	5
7	0.079	0.089	0.079	0.045	0.071	5
8	0.073	0.082	0.055	0.036	0.058	5
Promedio	0.079	0.088	0.068	0.041	0.066	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Diseño factorial tres (03) por dos (02) completo

DISEÑO EXPERIMENTAL-FACTORIAL													
	PROMEDIO PRETEST								PROMEDIO DE POSTEST				
Numero de experiencias	X1 (Voltaje)	X2 (Flujo)	X3 (Volumen)	Ph	Conductividad (mS/cm)	Dureza total (mgCaCo3)	NTU	STD	Ph	Conductividad (mS/cm)	Dureza total (mgCaCo3)	NTU	STD
1	4 V	100 ml/s	1000 ml	8.3	1200	531.5	0.08	560.13	8.39	995.51	451.30	0.06	480.33
2	7,4 V	100 ml/s	1000 ml	8.33	1210	532.53	0.078	563.23	8.35	950.34	411.36	0.06	450.46
3	4 V	150 ml/s	1000 ml	8.15	1220	531.83	0.075	561.28	8.27	988.69	446.00	0.07	477.55
4	7,4 V	150 ml/s	1000 ml	8.18	1218	533.36	0.08	565.27	8.27	946.49	409.45	0.07	462.44
5	4 V	100 ml/s	3000 ml	8.31	1210	533.4	0.077	557.12	8.33	992.38	440.59	0.08	483.10
6	7,4 V	100 ml/s	3000 ml	8.13	1225	536.67	0.087	559.53	8.17	957.54	409.80	0.06	453.47
7	4 V	150 ml/s	3000 ml	8.43	1220	535.25	0.079	548.6	8.22	980.46	445.79	0.07	479.13
8	7,4 V	150 ml/s	3000 ml	8.4	1219	540.3	0.073	564.01	8.24	940.24	407.34	0.06	440.15

En la tabla 9, se evidencia un diseño factorial de tres (03) factores con dos (02) niveles donde cada experiencia es independiente, así mismo se observa el promedio del Pretest y posttest para cada experiencia.

3.1.1.1 Análisis de los Residuales

Los residuos son generados por la diferencia entre la respuesta observada y la respuesta predicha por el modelo en cada prueba experimental.

Los residuales deben cumplir los siguientes supuestos:

- Normalidad (Ver figura 5).
- Varianza constante (igual varianza en los tratamientos) (Ver figura 6).
- Independencia (Ver grafico 7).

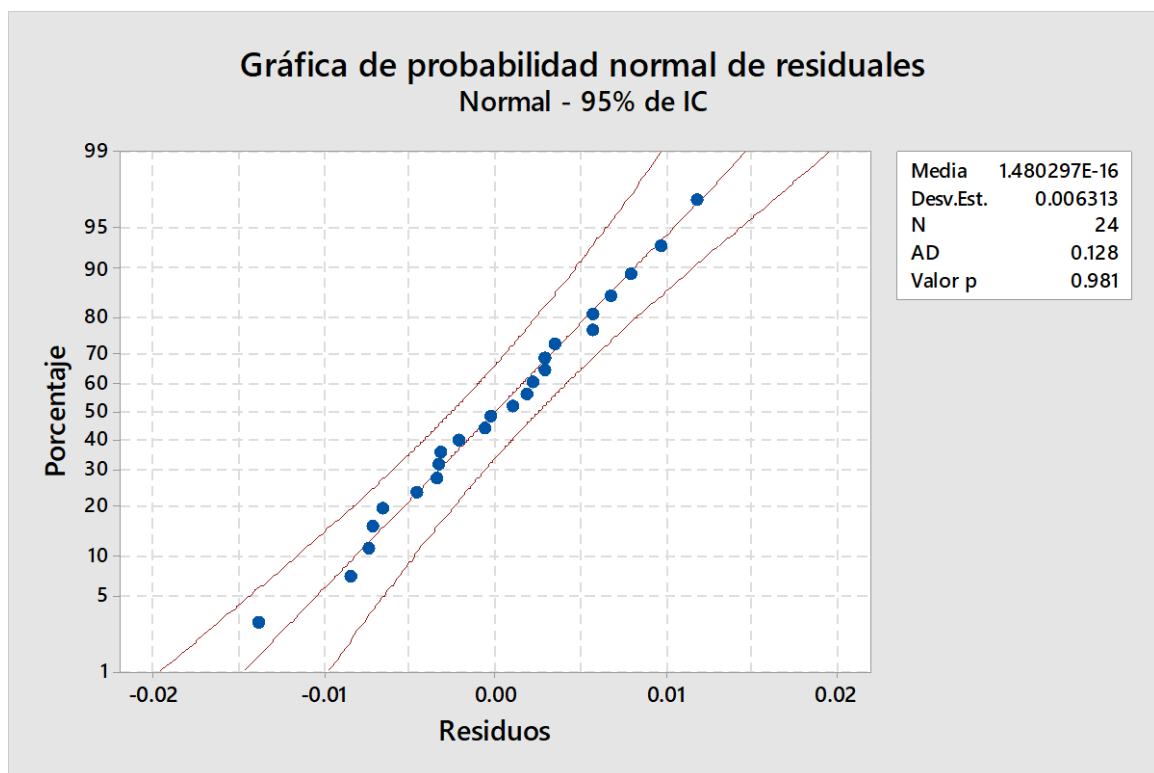


Figura 5. Probabilidad de normalidad.

Fuente: Elaboración propia.

H1: Los datos no siguen una distribución normal

H0: Los datos siguen una distribución normal

$\alpha=0.05$, nivel de significancia

IC: Intervalo de Confianza

En la figura 6, los datos están relativamente cerca de la línea de distribución normal ajustada. El **valor p (0.981)** es mayor que el nivel de significancia de 0.05, por lo tanto, NO se puede rechazar la hipótesis nula de que los datos siguen una distribución normal.

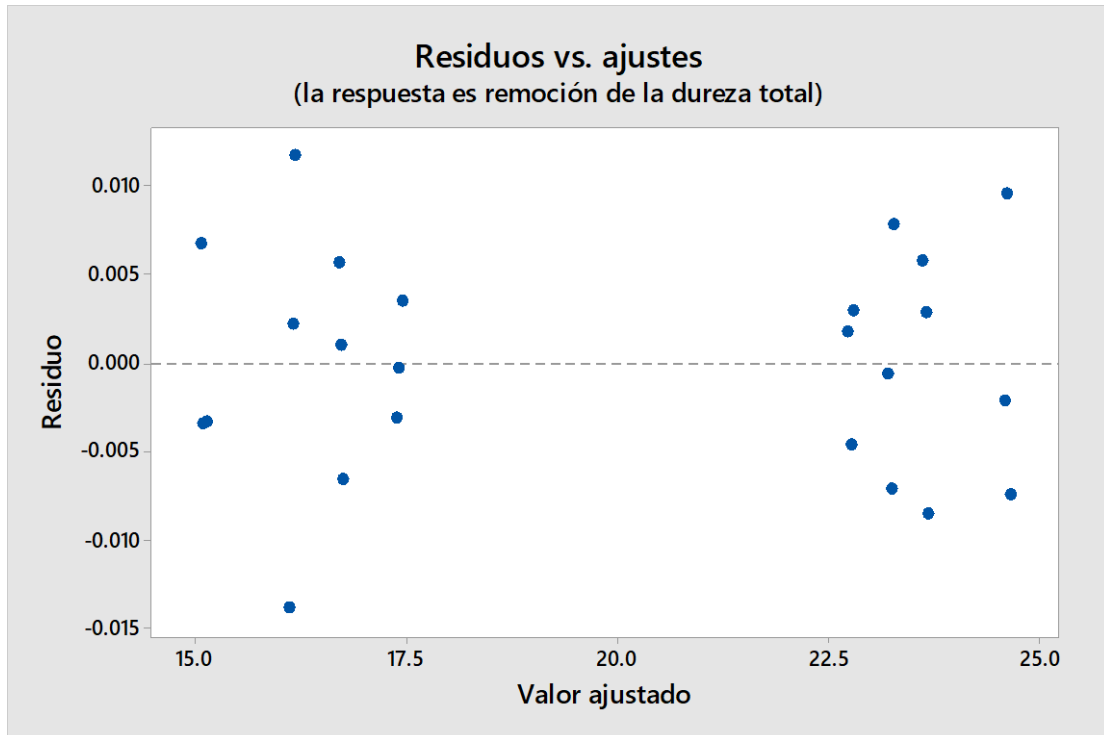


Figura 6. Varianza constante (Residuos vs. Ajustes)
 Fuente: Elaboración propia.

En la figura 6, los residuos están distribuidos aleatoriamente y la varianza en los diferentes tratamientos son aproximadamente iguales por lo tanto la varianza es constante.

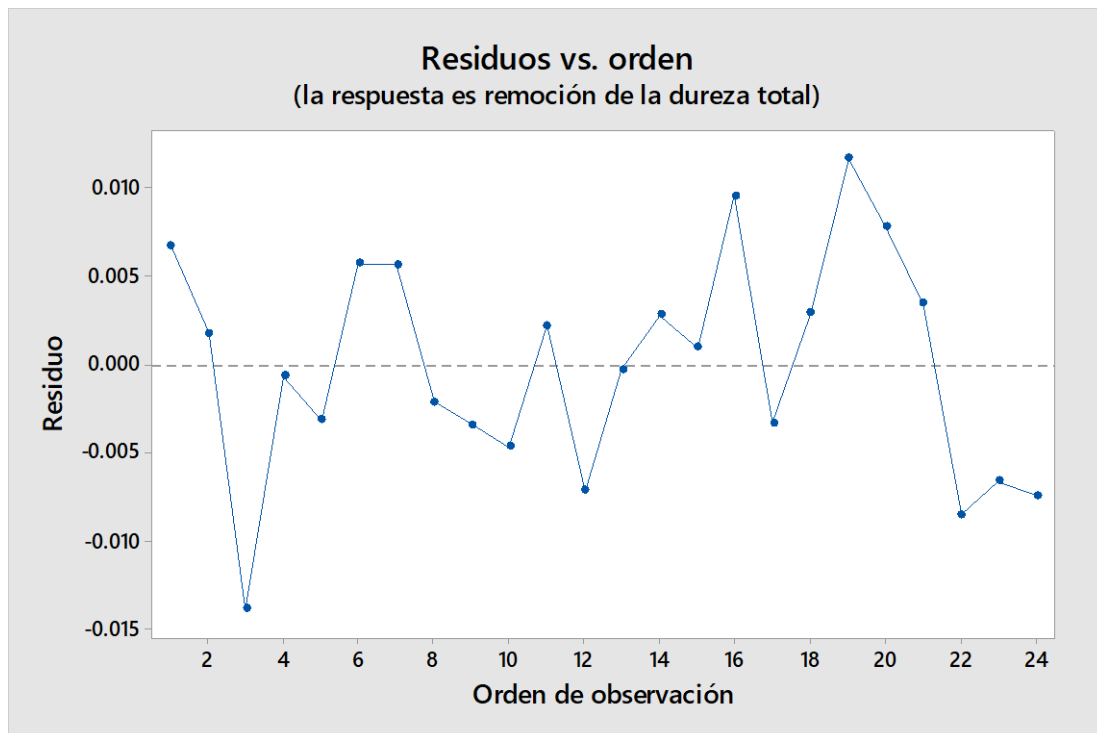


Figura 7. Prueba de independencia (Residuos vs. Orden).

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 7, se evidencia que los residuos son independientes ya que no muestran tendencias ni patrones en el orden cronológico. No hay evidencia de patrones ni correlación. Los puntos se ubican aleatoriamente alrededor de la línea central.

3.1.1.2 Diagrama de Pareto

Este diagrama nos mostrara el nivel de importancia de cada factor considerado dentro de los experimento, los cuales son el volumen (A), flujo (B) y voltaje (C) y asimismo su interacción entre dos (02) o tres (03). (Ver figura 8)

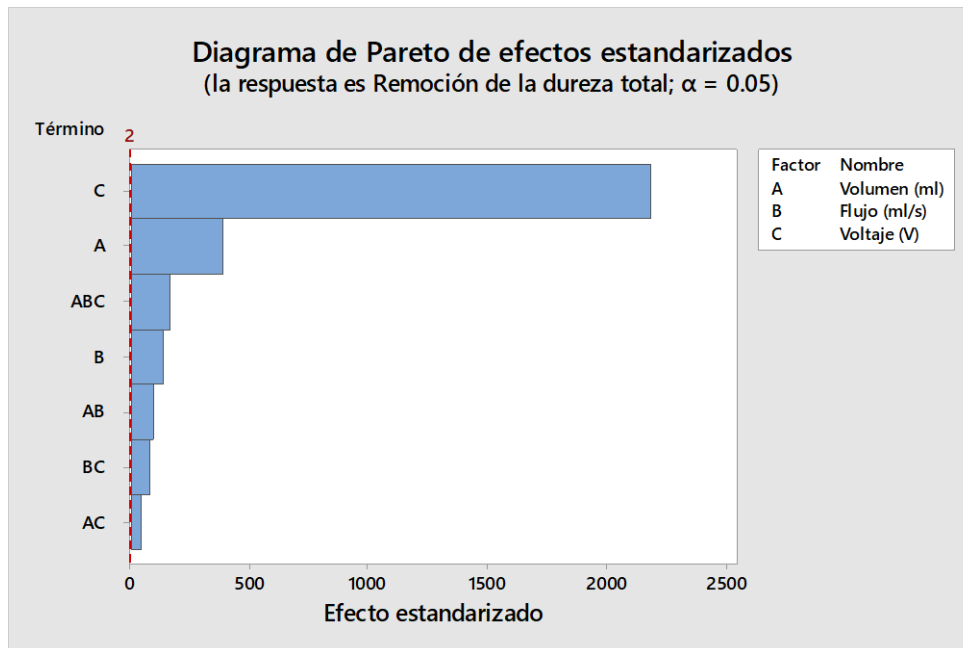


Figura 8. Diagrama de Pareto

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 8, nos señala que el voltaje (C) influye en mayor magnitud en el porcentaje de reducción de la dureza total del agua residual, seguido por el volumen (A) de tratamiento, seguido por la interacción del voltaje, flujo y volumen (ABC), seguido por el flujo (B), seguido por la interacción del flujo y volumen (AB), seguido por la interacción del voltaje y flujo (CB) y por ultimo por la interacción de voltaje y volumen (CA).

Los factores y las interacciones influyen positivamente en la variable respuesta (reducción de la dureza total) ya que sobrepasan el nivel de referencia de 2 que el mismo programa con relación al nivel de significancia lo genera.

3.1.1.3 Analisis de Varianza (ANOVA)

El analisis de varianza nos muestra el promedio de cada resultado de los 8 experimento con cierto voltaje (V), flujo (ml/s) y Volumen (ml) y su interacción entre las mismas. Asimismo nos señala que ningun experimento tiene el mismo tratamiento, ademas que cada factor influye significativamente y cuanto de porcentaje del total de los factores considerados influyen dentro del tratamiento. (Ver Tabla 10)

Tabla 10. Analisis de Varianza (Anova)

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	327.238	36.360	555387.70	0.000
Bloques	2	0.015	0.007	113.57	0.000
Lineal	3	324.194	108.065	1650664.65	0.000
Volumen (ml)	1	9.940	9.940	151837.79	0.000
Flujo (ml/s)	1	1.228	1.228	18762.97	0.000
Voltaje (V)	1	313.025	313.025	4781393.21	0.000
Interacciones de 2 términos	3	1.170	0.390	5957.42	0.000
Volumen (ml)*Flujo (ml/s)	1	0.583	0.583	8900.07	0.000
Volumen (ml)*Voltaje (V)	1	0.145	0.145	2217.74	0.000
Flujo (ml/s)*Voltaje (V)	1	0.442	0.442	6754.44	0.000
Interacciones de 3 términos	1	1.859	1.859	28395.97	0.000
Volumen (ml)*Flujo (ml/s)*Voltaje (V)	1	1.859	1.859	28395.97	0.000
Error	14	0.001	0.000		
Total	23	327.239			

Fuente: Elaboración propia.

Las hipótesis son:

H0: $\tau_1=\tau_2=\tau_3=\tau_4=\tau_5= \tau_6=\tau_7=\tau_8$, todas las medias (promedios) del voltaje, flujo y volumen son iguales.

H1: $\tau \neq 0$, por lo menos una media es diferente.

$\alpha=0.05$, nivel de significancia

En la tabla 10, el valor **p =0.000 < 0.05**. Se concluye que las medias de los tratamientos difieren, es decir, el voltaje, flujo y volumen afecta de manera **significativa** el porcentaje de reducción de la dureza total. Existe diferencia significativa entre tratamiento.

Tabla 11. *Resumen del Modelo (Anova)*

S	R-cuad.	R-cuad.(ajustado)	R-cuad.(pred)
0.0371370	99.99%	99.99%	99.98%

Fuente: Minitab 18

Se observa en la tabla 11, el R-2 ajustado es aproximadamente del 99.99% el cual es un valor adecuado de ajuste del modelo, donde nos indica que los factores el voltaje, flujo y volumen influyen en gran magnitud en la reducción de dureza total.

3.1.1.4 Efectos principales

El termino de efectos principales nos señala de que manera influye cada factor como el voltaje (mínimo y máximo), flujo (mínimo y máximo) y Volumen (mínimo y máximo) para la reducción de la dureza total. (Ver figura 9).

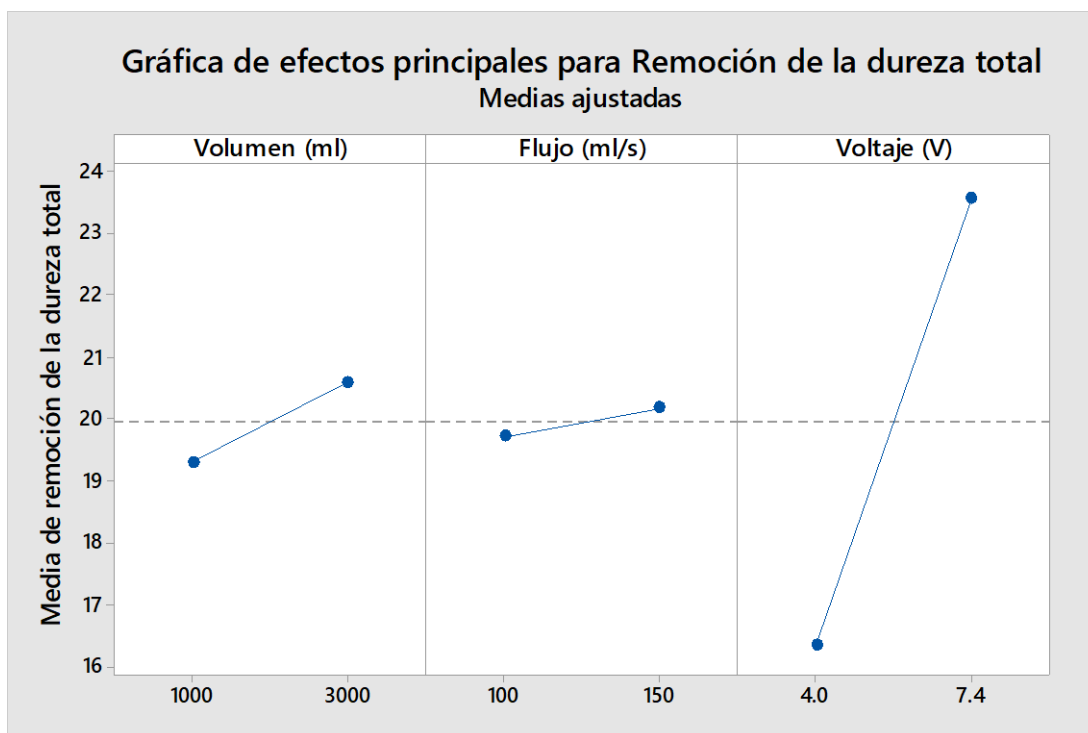


Figura 9. Efectos principales

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 9, el voltaje tiene un efecto más grande que el flujo y el volumen.

La reducción de dureza total aumenta a medida que aumenta el volumen y el flujo en cada tratamiento.

3.1.1.4 Interacción de Variables de Operación

Este termino de interacción nos señala de que manera la interacción de los factores considerados voltaje (V), flujo (ml/s) y volumen (ml) influyen en la reducción de la dureza total. (Ver figura 10)

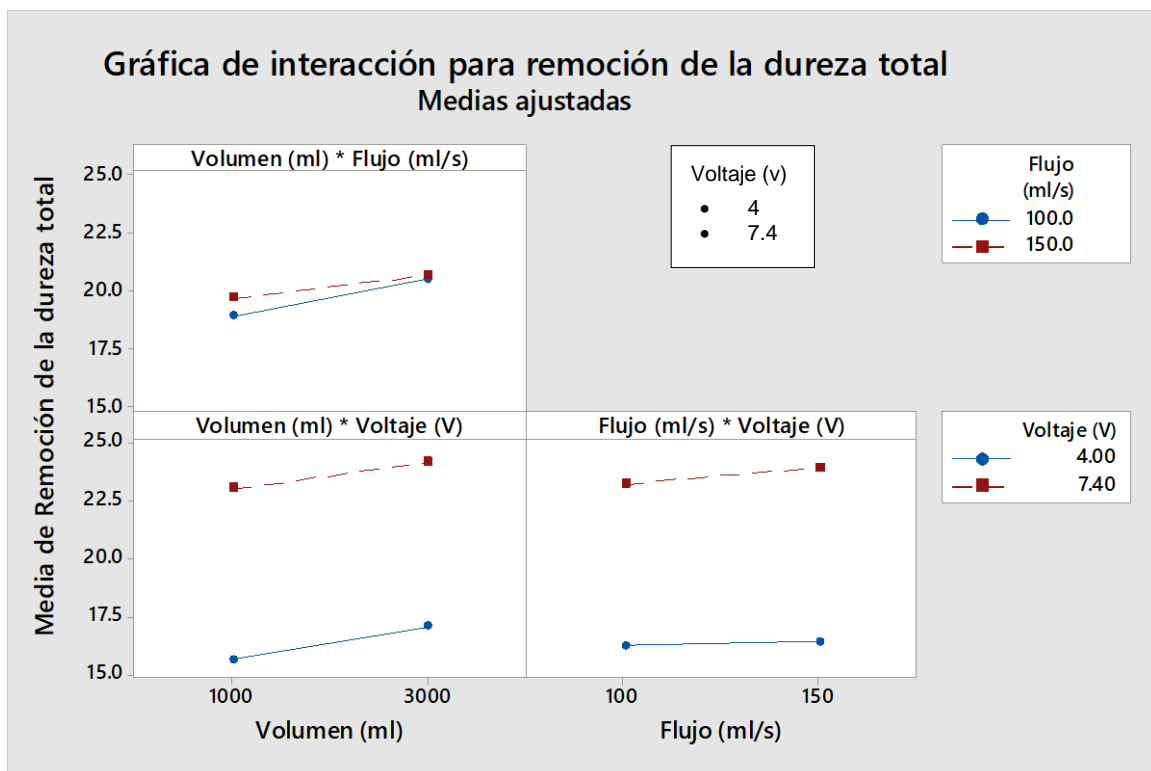


Figura 10. Interacción de factores.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 10, se evidencia que se obtiene una mejor reducción de la dureza total a medida que el voltaje y volumen tengan un nivel mas alto.

3.1.1.5 Contorno de reducción por la interacción de los factores

Este termino nos muestra la interacción de los factores (voltaje (V), flujo (ml/s) y volumen (ml)) en grupos de dos (02), junto a su reducción de la dureza total por colores de azul a verde de una tonalidad oscura a clara respectivamente (Ver grafico 11, 12 y 13).

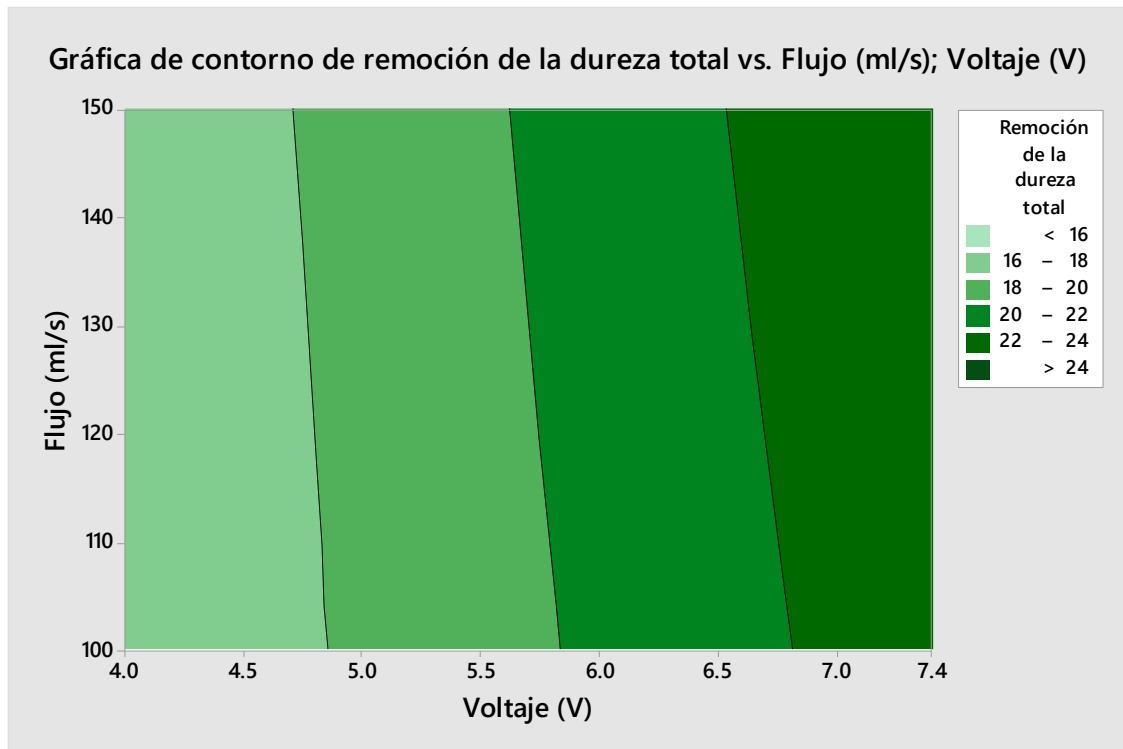


Figura 11. Contorno de dureza total vs. Flujo; Voltaje.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 11, señala que para obtener una reducción de la dureza total $> 24\%$ está a un voltaje mayor que 7 V y a un flujo mayor que 100 ml/s.

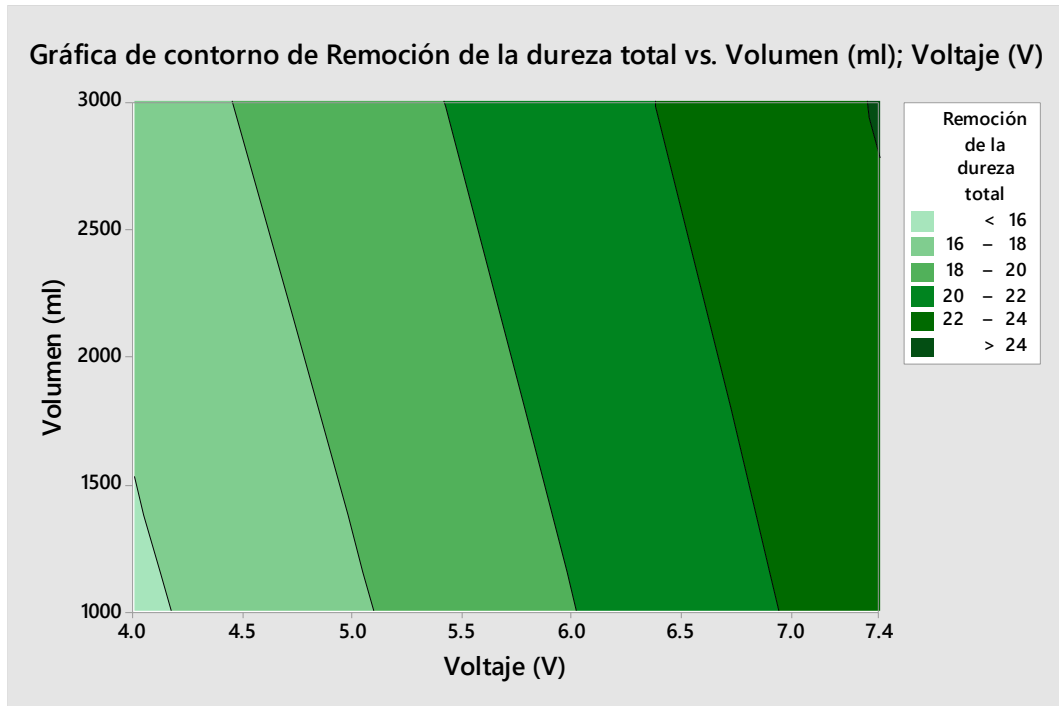


Figura 12. Contorno de dureza total vs. Volumen; Voltaje.
 Fuente: Elaboración propia.

En la figura 12, nos indica que para obtener una reducción de la dureza total $> 24\%$ está a un voltaje mayor que 7 V y a un volumen mayor que 3000 ml/s.

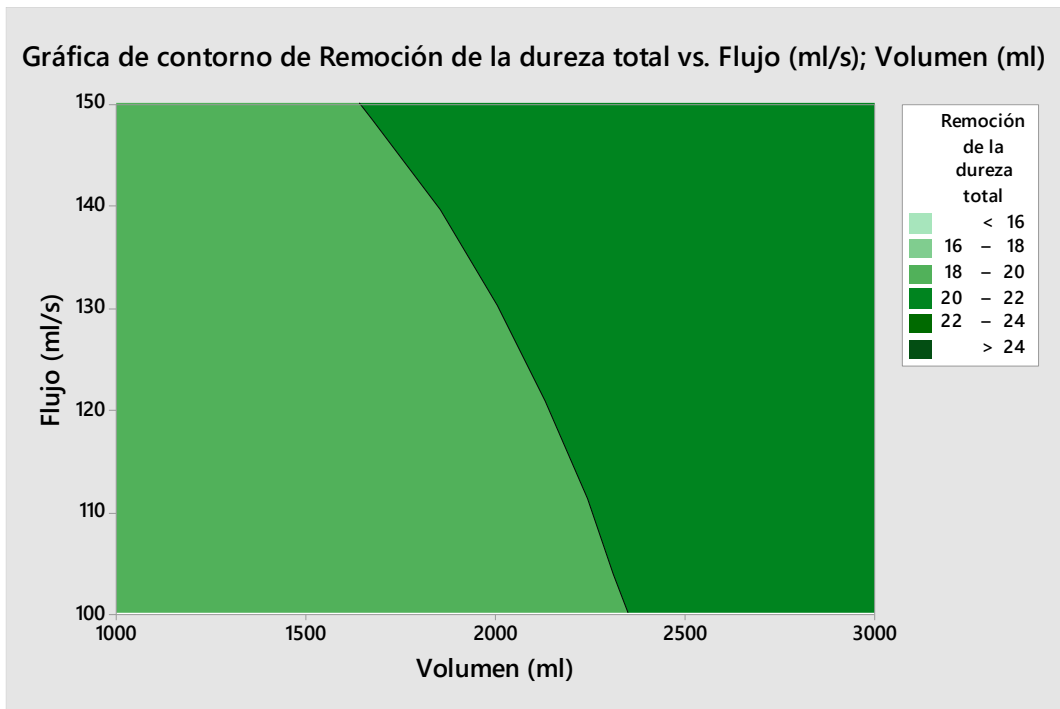


Figura 13. Contorno de dureza total vs. Flujo; Volumen.
 Fuente: Elaboración propia.

En la figura 13, indica que para obtener una reducción de la dureza total $> 24\%$ está a un volumen mayor que 2500 ml y a un flujo mayor que 100 ml/s.

3.1.2 Resultados del pH.

La tabla 4, muestra los resultados promedio obtenidos (postest) en los experimentos del modulo de electrocoagulación de los ocho (08) experimentos.

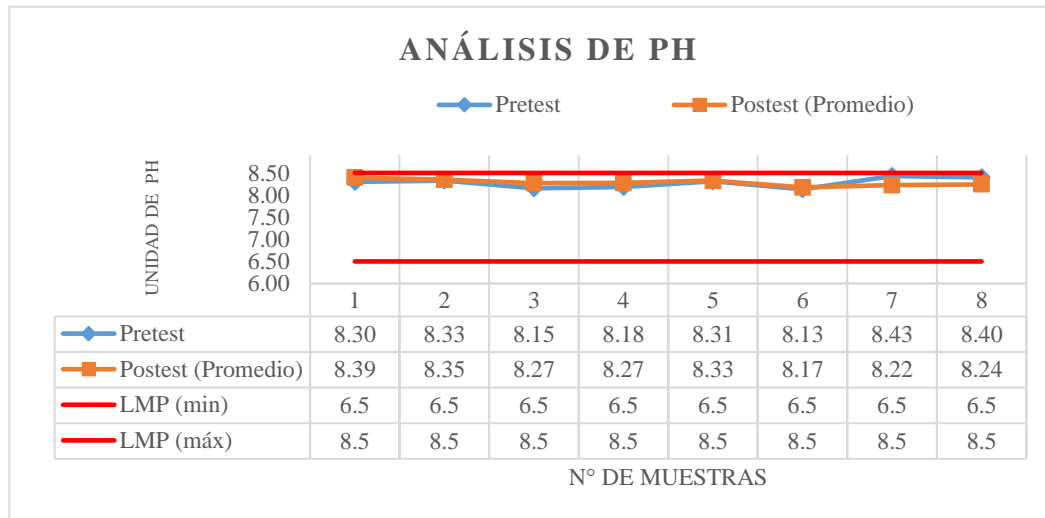


Figura 14. Variación del pH en el postest.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 14, muestra los resultados de la evaluación del pH para el pretest oscilan de 8.30 y 8.40 donde el valor promedio es 8.278 y para el postest cuyos valores oscilaron desde 8.17 y 8.39 teniendo un valor medio de 8.2813. Se observa que estan por debajo de los Limites Máximos Permisibles (LMP) de 6.5 a 8.5 de pH.

3.1.3 Resultados de la Conductividad Eléctrica (uS/cm).

La tabla 5, muestra los resultados promedio obtenidos (postest) en los experimentos del modulo de electrocoagulación de los ocho (08) experimentos.

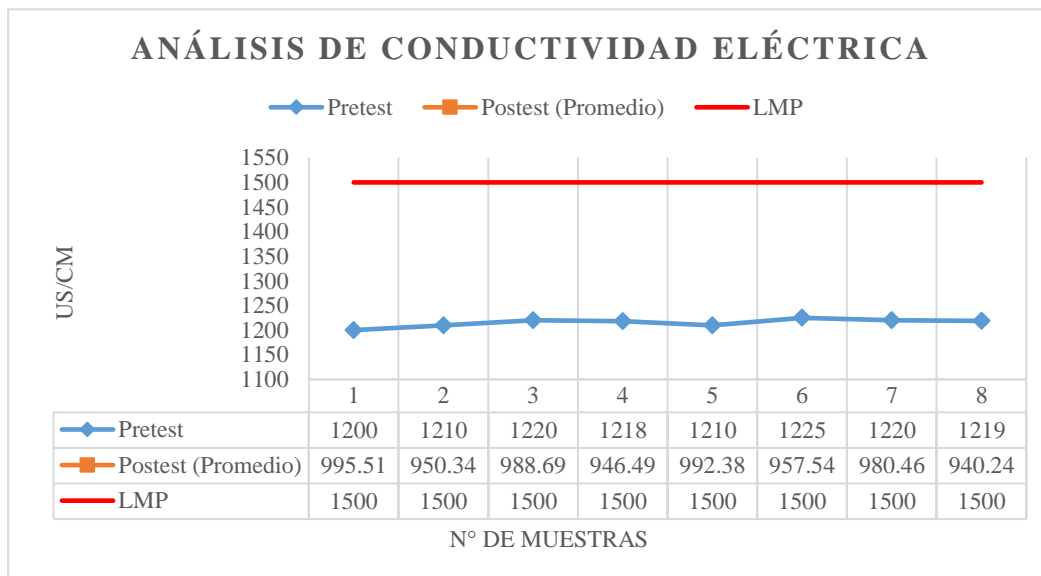


Figura 15. Variación de la Conductividad en el postest.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 15, muestra los resultados de la evaluación de la conductividad para el pretest oscila desde 1200 a 1225 con un valor promedio de 1215.25 y en el caso del postest los valores oscilarán desde 940.24 y 995.51 teniendo un valor medio de 968.96. Podemos observar que estan por debajo de los Limites Máximos Permisibles (LMP) de 1500 de conductividad.

3.1.4 Resultados de la dureza total(mgCaCo3).

La tabla 6, muestra los resultados promedio obtenidos (postest) en los experimentos del modulo de electrocoagulación de los ocho (08) experimentos.

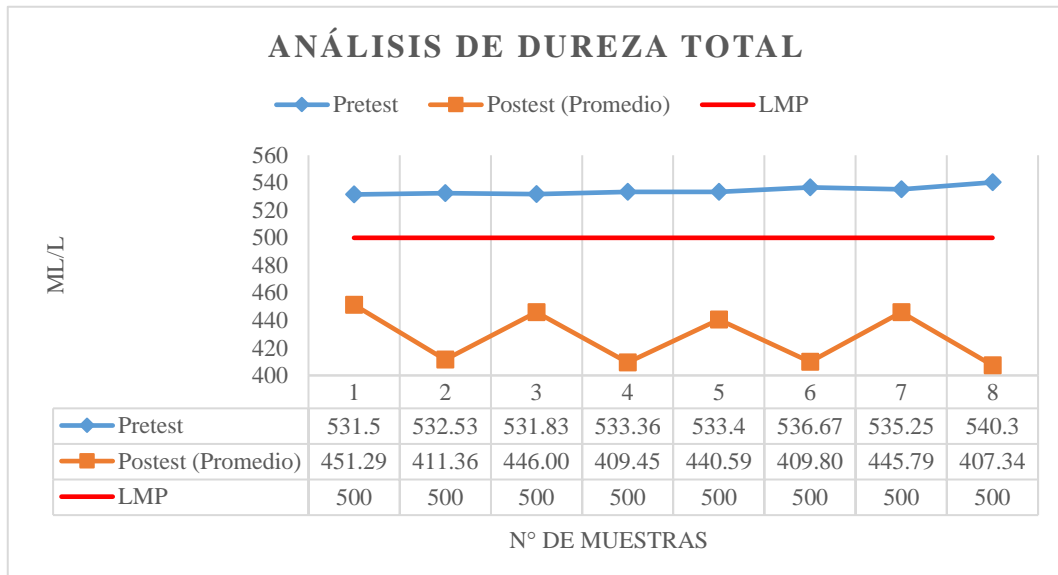


Figura 16. Variación de la Dureza Total en el postest.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 16, muestra los resultados de la evaluación de la dureza total para el pretest sus valores oscilan desde 531.50 a 540.30 con un valor promedio de 534.355 donde se observa un alto valor de concentración y en el postest cuyos valores oscilaron desde 409.45 y 451.29 teniendo un valor medio de 427.70. Podemos observar una variación notable en los valores; teniendo en cuenta que el pretest están por encima del LMP y en el postest valores por debajo (LMP) de 500 de Dureza Total.

3.1.5 Resultados de los Solidos Totales Disueltos (STD)

La tabla 7, muestra los resultados promedio obtenidos (postest) en los experimentos del modulo de electrocoagulación de los ocho (08) experimentos.

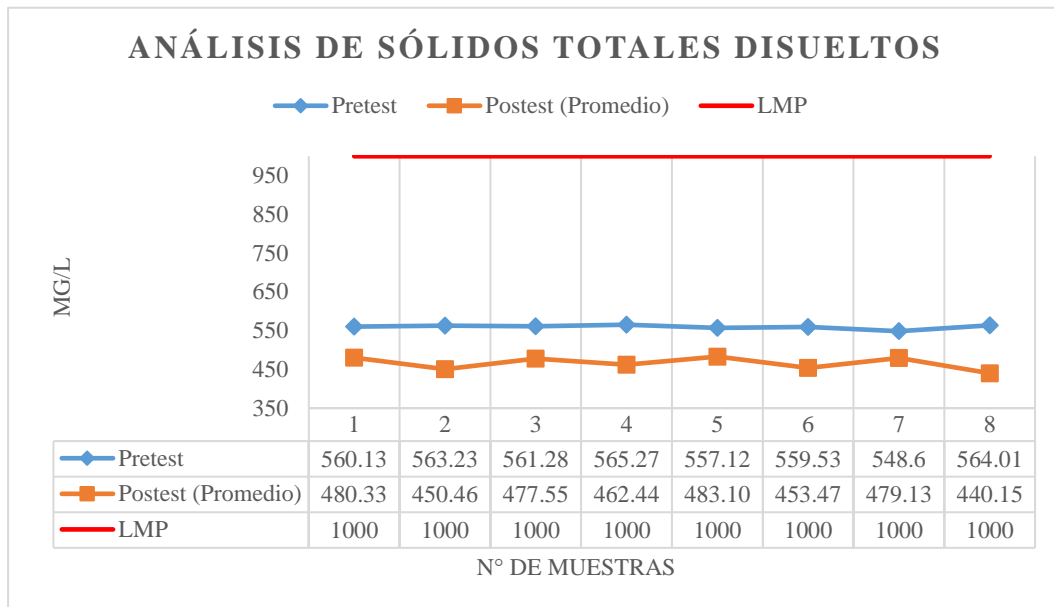


Figura 17. Variación de Solidos totales disueltos en el postest.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 17, muestra los resultados de la evaluación de los Solidos totales disueltos, en el pretest los valores oscilan desde 548.60 a 565.27 con un valor promedio de 559.90 y para el postest cuyos valores oscilarán desde 480.33 y 440.15 teniendo un valor medio de 465.83 Podemos observar que estan por debajo de los Limites Máximos Permisibles (LMP) de 1000 en Solidos Totales Disueltos.

3.1.6 Resultados de la turbiedad (NTU)

La tabla 8, muestra los resultados promedio obtenidos (postest) en los experimentos del modulo de electrocoagulación de los ocho (08) experimentos.

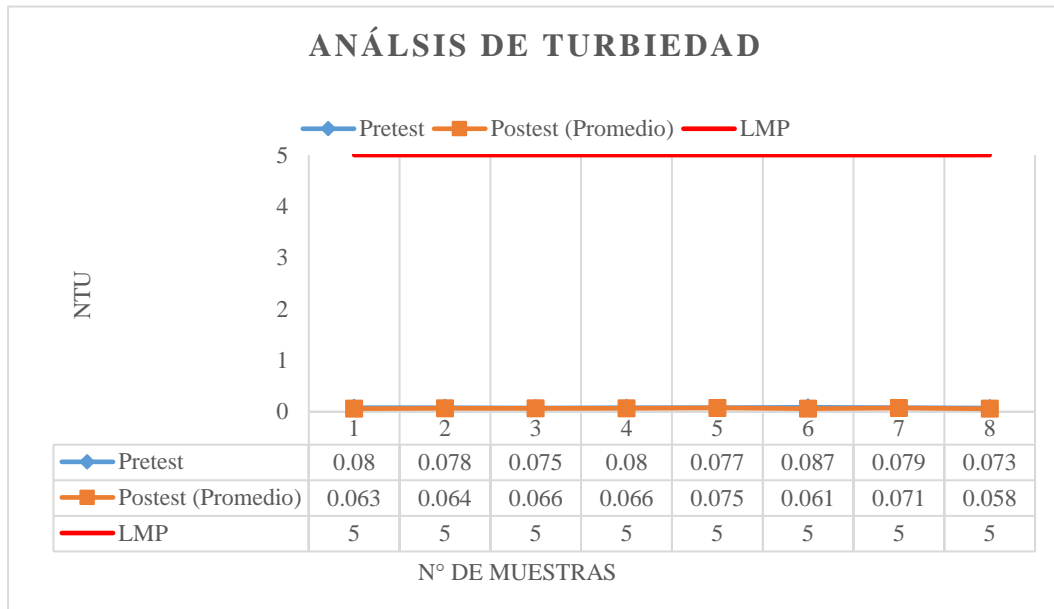


Figura 18. Variación de la Turbiedad en el postest.
Fuente: Elaboración propia.

La figura 18, muestra los resultados de la evaluación de la turbiedad, para el pretest sus valores oscilan desde 0.073 y 0.087 con un promedio de 0.079 y para el postest cuyos valores oscilaron desde 0.058 y 0.075 teniendo un valor medio de 0.066. Podemos observar que estan por debajo de los Limites Máximos Permisibles (LMP) de 5 de Turbiedad.

CAPITULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

La presente investigación muestra aspectos fundamentales en base a los objetivos planteados en el estudio. Además de determinar los parámetros de operación (Flujo Volumétrico, Potencial Eléctrico y Volumen) de un módulo de electrocoagulación para la reducción de la dureza total a partir de agua residual de osmosis inversa, asimismo se realizó el monitoreo del funcionamiento óptimo del equipo de electrocoagulación.

A partir de los resultados encontrados, aceptamos la hipótesis general que establece que con la evaluación de los parámetros de operación (flujo volumétrico, Potencial eléctrico y volumen) del módulo de electrocoagulación se reducirá la dureza total (altamente soluble) a partir de agua residual de osmosis inversa obtendremos la reducción.

Estos resultados, guardan relación con lo que sostiene (Aguilar Asco, 2015), (Quispe Quispe, 2015) y (Bermeo Garay M, 2017); quienes señalan que la electrocoagulación es un proceso efectivo en la remoción y disminución de contaminantes; similar opinión menciona (Soberanis Piña, M. et al., 2011), quien demuestra en su investigación que la electrocoagulación funciona adecuadamente como una tecnología alterna en el tratamiento de aguas residuales y agua potable, como es el caso del agua residual de ósmosis inversa.

Asimismo, en la tesis realizada por (Jaramillo Terán Enelio, 2012), indica que es necesario conocer los factores de agitación, caudal, pH, conductividad, DBO5 y DQO para una eficiente remoción. La cual permitió considerar en esta tesis una caracterización llamado pre tratamiento.

Cabe resaltar que la presente obtuvo las mismas reacciones químicas con los ánodos, como es el caso de (Victoria et. al., 2018), quien señala que los ánodos de magnesio pueden producir hidrogeno durante su polarización, esto es denominado efecto diferencial negativo y es particular del magnesio.

Asimismo, corroboramos que los resultados obtenidos en la gráfica de efectos principales para la reducción de la dureza total, guardan relación con lo que sostiene (Pérez Sicarios S. et al., 2011), quien señala que la influencia de la corriente eléctrica aplicada al electrodo determina la velocidad de reacción. Similar opinión mencionan Castillo Castro y Oliden Arturo (2017), quienes mencionan que la densidad de corriente influye positivamente en la disminución de la carga orgánica contaminante de residuos líquidos de pelambre por electrocoagulación

En lo que respecta a los parámetros que tuvieron mayor remoción; Malakootian M., & Yousefi N. (2009) obtuvo una eficiencia del 95,6% con un pH = 10.1, diferencia potencial de 20V y un intervalo de tiempo de 60 minutos. Similares resultado tuvieron Pooja, K., & Salkar, D. (2017), con un 90.6 % de eficiencia de una muestra de agua salobre con placas de Fe; y Malakootian, Mansoorian & Moosazadeh (2010), que tuvo una eficiencia de eliminación de Calcio de 98.2% y 97.4% para dureza. Sin embargo, nosotros obtuvimos una remoción 24.63% de dureza total (mgCaCo₃) bajo los siguientes parámetros óptimos: Flujo (150 mL/seg.), potencial eléctrico (7.4 V) y volumen (3000MI).

Por otro lado, en el artículo científico publicada por Helmy, E., Nassef E. & Hussein M. (2017); refieren que el porcentaje de eliminación de calcio y magnesio en agua es directamente proporcional al tiempo electrólisis por un periodo de 60 minutos. Similar resultado tuvo (Poma Javier y Quispe Sanca ,2016) así como (Cuba Tello, 2020) y (Coronel Huamán y Vila Vera, 2013) quienes mencionan que la variación de la densidad de corriente y el tiempo a nivel de laboratorio tiene influencia directa en la reducción de los contaminantes. Sin embargo, uno de los hallazgos que se evidencia en el diagrama de Pareto en la presente; es que el parámetro que tiene mayor incidencia en la reducción de dureza total es el voltaje.

4.2 Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos durante la Evaluación de parámetros de operación de un equipo de electrocoagulación para la reducción de la dureza total a partir de agua residual de osmosis inversa y considerando los antecedentes respecto a la reducción de contaminantes por medio de electrodos, se estableció las siguientes conclusiones:

1. Se seleccionó los siguientes parámetros de operación (Flujo Volumétrico, Potencial Eléctrico y Volumen) del equipo de electrocoagulación para la reducción de la dureza total, obteniéndose los parámetros óptimos (voltaje de 7,4 V; flujo de 150 ml/s y un volumen de 3000 ml), así obtener un porcentaje de reducción del 24,62 %.
2. Se caracterizó el parámetro físico químico (pH, Conductividad, Sólidos Totales Disueltos, NTU y Dureza Total) de agua residual de osmosis inversa. En las que se determinó mayor concentración de dureza total como promedio (534.35 mg CaCO₃ L-1), la misma que se encuentra por encima del valor máximo (500 mg CaCO₃ L-1) según el DS. 031-MINSA-SA. El pH con un valor de 8.28, conductividad 1215.25 uS/cm., Sólidos totales disueltos 559.73 STD y Turbiedad de 0.078, estos como promedio de todas las muestras obtenidas.
3. Se evaluó los parámetros de operación óptimos (flujo volumétrico 150 ml/s, Potencial eléctrico 7.4 V y volumen de 3000 ml del equipo de electrocoagulación, donde se logró alcanzar una mayor reducción de la dureza total.
4. Se evaluó los parámetros físico químicos (pH, conductividad, sólidos totales disueltos y NTU) después del tratamiento del equipo de electrocoagulación cuyos valores promedio son pH de 8.39, conductividad 968.92 uS/cm., dureza total 427.72 mg CaCO₃ L-1, Sólidos totales disueltos 466.08 STD y Turbiedad 0.0064 NTU, donde se logró reducir la dureza total de 534.35 a 427.72 mg CaCO₃ L-1, considerándose por debajo del Límites máximos permisibles según el DS-031-2010-MINSA.

REFERENCIAS

- Aguilar Asco. (2015). *Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Academias y organizaciones científicas miembros del Interamerican Network of Academies of Sciences (IANAS, 2019) Calidad del Agua en las Américas, Riesgos y Oportunidades.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2016) Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales.
- Arboleda Camacho, J. y Herrera López, P. (2015). *Evaluación de un proceso de Electrocoagulación en un Reactor tipo batch para la Remoción de Cromo Hexavalente (Cr+6) con electrodos de Aluminio – Aluminio y de Hierro – Aluminio en condiciones de Laboratorio*. Universidad Santo Tomás, Bogotá; Colombia.
- Aristizábal Castrillón, A. y Bermúdez Agudelo, M. (2007). *Estudio de la Factibilidad de un Sistema de Electrocoagulación para Tratamientos de Aguas procedentes de Lavanderías Industriales con fines de Reuso* (Título de pregrado). Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.
- Bermeo Garay. (2017). *Remoción eficiente de colorante refractario azul MNO reactivo en combinación con vinil sulfónico en aguas residuales mediante técnicas de electrocoagulación y adsorción* (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Castillo Castro, C. y Oliden Arturo, B. (2017). *Influencia de la distancia entre electrodos y densidad de corriente en la disminución de carga contaminante de residuos líquidos de pelambre por electrocoagulación* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú.

Condori Pantoja. (2018). *Evaluación de la tratabilidad del efluente generado por un laboratorio metalúrgico aplicando la electrocoagulación* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

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

Corporación Autónoma Regional de Los Valles del Sinu y del San Jorge. (2012). *Toma de Muestras* (5). Recuperado de [https://www.cvs.gov.co/jupgrade/images/stories/docs/varios/MA-LAB-
CVS_02_Portafolio_de_Servicios_V3.pdf](https://www.cvs.gov.co/jupgrade/images/stories/docs/varios/MA-LAB-
CVS_02_Portafolio_de_Servicios_V3.pdf)

Coronel Huamán, K y Vila Vera, G (2013). *Remoción de contaminantes de las aguas residuales urbanas del colector parra del riego por el método de electrocoagulación mediante paneles fotovoltaicos, a nivel de laboratorio* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.

Castells Xavier, E. (2012). *Generalidades, Conceptos y Origen de los Residuos*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.

Donneys Victoria et al. (2018). Electrocoagulación de soluciones de índigo carmín empleando ánodos de magnesio y de aleación AZ31. *DYNA*, 85(206), 528-567.

Elementos básicos de un diagrama de Pareto. (s.f.); (2018). Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/quality-tools/supporting-topics/pareto-chart-basics/#what-is-a-pareto-chart>

Electrocoagulation. *International Research Publication House*, 10(1), 309-313.

Fernández Cirelli, Alicia. (2012). El agua: un recurso esencial. *Química viva*, 11(3), 147-170.

- Ferreira Ascencio, Jorge. (2014). *Tratamiento y Disposición final de Agua Residual con alto contenido de Cloruros proveniente del Proceso de Producción de Petróleo Crudo, del Campo Santa Lucia de Petróleos del Norte s.a.* (Título de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- G. de Benitez y G. Pece. (2010). Análisis de la Varianza en Experimentos Factoriales. *Universidad Nacional de Santiago del Estero, 1(21), 1-47.*
- Grafica de residuales incluidas en Minitab.* (s.f); (2018). Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/supporting-topics/residuals-and-residual-plots/residual-plots-in-minitab/>
- Gráficas de contorno y gráficas de superficie 3D, s.f.; (2018). Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/using-fitted-models/supporting-topics/graphs/contour-plots-and-3d-surface-plots/>.
- Guohua Chen (2003). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Elsevier, 38(2004), 11-41*
- Gráficas de probabilidad normal y la "prueba del lápiz grueso".* (s.f); (2018). Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/normal-probability-plots-and-the-fat-pencil-test/>
- Helmy, E., Nassef E. & Hussein M. (2017). Study on the Removal of Water Hardness by Electrocoagulation Technique. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences, 12 (1), 1-17.*
- Hernández Sampiere, R., Fernández Collado, C. y Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación.* Santa fe, México: McGraw W-HILL/INTERAMERICADA EDITORES, S.A. DE C.V.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2004). *Calidad de agua. Muestreo.*

Parte 3: Directrices para la preservación de las muestras.

Jaramillo Terán, Enelio. (2012). *Diseño y construcción de un reactor de electrocoagulación para el estudio de tratamiento de agua residual de pintura y acabado textil* (Tesis de Pregrado). Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador.

Lidia de Vargas. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida*. Lima, Perú: Organización Panamericana de la Salud.

Marón Ocampo, A. y Osés Pérez, M. (2013). *Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales con el Proceso de Lodos Activados*. Morelos, México: Comisión Estatal del Agua de Jalisco.

Malakootian M., & Yousefi N. (2009). The efficiency of electrocoagulation process using aluminum electrodes in removal of hardness from water. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 6(2), 131-136.

Métodos y fórmulas para el análisis de varianza en ANOVA de un solo factor. (s.f.); (2018).

Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/how-to/one-way-anova/methods-and-formulas/analysis-of-variance/#degrees-of-freedom-df>

Malakootian M., Mansoorian H., & Moosazadeh M. (2010). Performance evaluation of electrocoagulation process using iron-rod electrodes for removing hardness from drinking water. *Desalination*, 255(1-3), 67–71.

Municipalidad Distrital de Casma (2012). *Estudio Hidrogeológico de Agua Subterránea-Perforación de Pozo Tubular Sector Mojeque, Valle San Rafael*.

Ojeda Armaignac, Elaine. (2010). Estudio del Proceso de Electrocoagulación de la Vinaza empleando Electroodos de Hierro. *Tecnología Química*. 30(1), 21-30.

Pérez Fernández, D. y Santos Souza, M. (2017). *Optimización de Parámetros de Operación en Procesos de Ultrafiltración para la eliminación de Materia Orgánica en la Regeneración de Aguas de proceso de una industria Papelera* (Tesis de Maestría). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

Pinzón Gamboa, Erick. (2010). *Propuesta Técnica a Escala Piloto para la Remoción de Color de Origen Textil, por medio de Electrocoagulación para favorecer el proceso de Potabilización de agua, en una planta de tratamiento de aguas* (Título de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Pooja, K., & Salkar, D. (2017). Review of Studies on Hardness Removal by Electrocoagulation. *International Research Publication House*, 10(1), 309-313.

Piña, M., Martín, A., González, C., Prieto, F., Guevara, A., y Espinoza, G. (2011). Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. *Revista Mexicana de Ingeniería*, 10(2), 257-271.

Pérez, S., Morales, J., Navarro, F., Hernández, O. (2011). Evaluación del proceso de Electrocoagulación para la remoción de la turbidez del agua de río, agua residual y agua de estanque. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(1), 79-91.

Poma Javier, Johana y Quispe Sanca, Pamela. (2016). *Remoción de contaminantes de agua residuales urbanas por el método de electrocoagulación* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.

¿Qué es ANOVA? (s.f.); (2018). Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/supporting-topics/basics/what-is-anova/>

¿Qué es una gráfica de efectos principales? (s.f.); (2018). Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/supporting-topics/basics/what-is-a-main-effects-plot/>

- Quispe Quispe, (2015). Electrocoagulación en la remoción de mercurio de las aguas residuales en el centro poblado la rinconada - Puno (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Reyes Ávila, D. y Mercado Martínez, I. (2003). Estudio de Tratabilidad por Electrocoagulación de los Lixiviados del Relleno Sanitario La Esmeralda (Titulo de pregrado). Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Restrepo Mejía, Ana., Arango Ruiz, Álvaro y Garcés Giraldo Luis. (2006). La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producción + Limpia*, 1(2), 58-77.
- Roccio Yauri, Luis. (2015). *Remoción de Contaminantes de Aguas Residuales Urbanas del Colector de agua de Las Vírgenes por Electrocoagulación, a nivel de laboratorio, utilizando como fuente energética un Panel Fotovoltaico* (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.
- Síqueiros Tarazón, Alejandra. (2004). *Aplicación de la Metodología de Superficie de Respuesta para el Mejoramiento de la Calidad del Aceite de Soya* (Titulo de pregrado). Universidad de Sonora, México.
- Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL, 2000). *Tratamiento de agua Coagulación y Floculación*.
- Torres Ruiz, Juan. (2016). *Montaje de Planta de Tratamiento por osmosis inversa en Minería – Yanacocha* (Titulo de pregrado). Universidad Nacional del Callao, Perú.

ANEXOS

ANEXO 1: Matriz de consistencia.

Problema General:	Objetivo general:	Hipótesis general:	Parámetros de Operación del equipo de electrocoagulación (Independiente= x)			
¿Cuáles serán los parámetros de operación de un equipo de electrocoagulación para la reducción de la dureza total a partir de agua residual de osmosis inversa?	Evaluar los parámetros de operación del equipo de electrocoagulación para la reducción de la dureza total a partir del agua residual de osmosis inversa.	Con la evaluación de los parámetros de operación del equipo de electrocoagulación mas adecuados se reducirá la dureza total (altamente soluble) a partir de agua residual cumpliendo con la norma DS-031-2010-MINSA.	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición	Niveles o rangos
			Potencial eléctrico (X1)	Voltaje	V.	4 V. - 7,4 V.
			Flujo Volumétrico (X2)	Caudal	mL/s.	100 mL/s. - 150 mL/s.
			Volumen del agua residual (X3)	Mililitros	mL	1000 mL - 3000 mL
Problema Específico 01	Objetivos específico 01	Hipótesis específica 01	Agua Residual de osmosis inversa (Dependiente= y)			
¿Cuáles serán las características físico químicas del agua residual a partir de agua residual de osmosis inversa?	Caracterizar los parámetro físico químicos (Ph, conductividad, sólidos totales disueltos, NTU y dureza total) del agua residual proveniente de osmosis inversa.	Al caracterizar los parámetros físico químicos a partir del agua residual de osmosis inversa, se espera conocer la composición química (Dureza Total, Solidos Totales Disueltos, pH, NTU y Conductividad).	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición	Niveles o rangos (D.S. 031-2010-MINSA)
			Parámetros físico químicos	Ph	Unidad de pH	6,5 - 8,5
				Turbiedad	NTU	5
				Conductividad	µS/cm	1500
				Solidos Totales Disueltos	mgL-1	1000
				Dureza Total	mg CaCO3-1	500
Porcentaje de reducción						
Problema Específico 02	Objetivos específico 02	Hipótesis específica 02	Porcentaje de Remoción	$\frac{(Valor\ inicial - Valor\ final)}{Valor\ inicial} \times 100$	%	0-100
¿Cuáles serán los parámetros y niveles mas adecuados del equipo de electrocoagulación (Flujo Volumétrico, Potencial eléctrico y conductividad)?	Evaluar los parámetros y niveles mas adecuados de experimentación del equipo de electrocoagulación (flujo volumétrico, Potencial eléctrico y conductividad).	Al evaluar los parámetros y niveles de experimentación (Potencial eléctrico, flujo volumétrico y volumen) del equipo de electrocoagulación se logrará alcanzar altos valores de porcentaje de separación de sales.				
Problema Específico 03	Problema Específico 03	Hipótesis Específico 03				
¿Cuáles serán las características físico químicas (PH, conductividad, sólidos totales disueltos, Dureza Total y NTU) del agua del agua residual después del tratamiento mediante el equipo de electrocoagulación?	Evaluar los parámetros físico químicos (pH, conductividad, sólidos totales disueltos y NTU) de las corrientes de concentrado y diluidas procedentes del módulo de electrocoagulación	Al caracterizar los parámetros físico químicos (pH, conductividad, sólidos totales disueltos, dureza total y NTU) de las corrientes de concentrado y diluido, se logrará conocer la concentración.				

Figura 19. Matriz de consistencia.

Fuente: Elaboración Propia.

ANEXO 2: Materiales

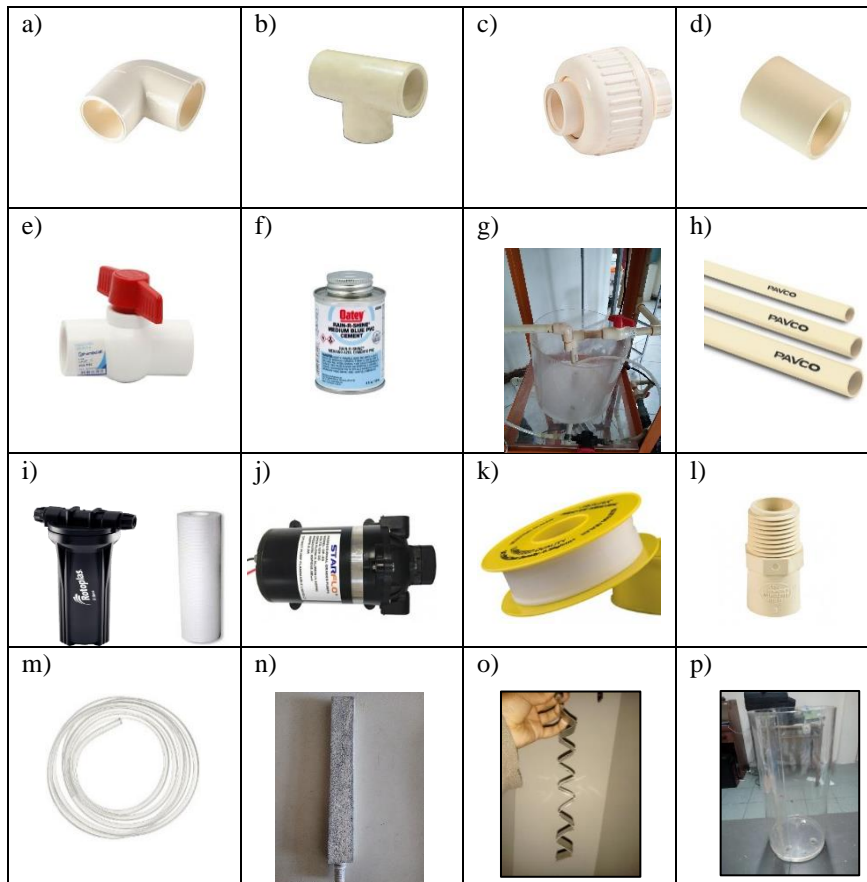


Figura 20. Materiales de construcción del equipo.

Fuente: Elaboración propia.

- | | |
|---|--|
| a) Codo PAVCO de ½ | n) Barras de Magnesio. (4 unidades) |
| b) Tubo PAVCO en T de ½ | o) Zigzag de acero inoxidable. (1 unidad). |
| c) Válvula universal PAVCO ½ | p) Celda acrílica (4.42 litros) |
| d) Unión PAVCO ½ | |
| e) Válvula de bola PAVCO ½ | |
| f) Pegamento de PVC. | |
| g) Tanque de almacenamiento de agua (5litros) | |
| h) Tubería de PAVCO ½ | |
| i) Filtro y porta filtro (1 micra) | |
| j) Bomba de agua 100 PSI. | |
| k) Teflon. | |
| l) Bushing PAVCO ½ | |
| m) Manguera de ½ | |

ANEXO 3: Instrumentos



Figura 21. Instrumentos utilizados para la medición de los parámetros Físico Químicos.
Fuente: Elaboración propia.

- a) Turbimímetro.
- b) Sólidos totales disueltos.
- c) pH-metro.
- d) Conductímetro (MARTINI INSTRUMENT)
- e) Medidor de dureza total (HANNA)

ANEXO 4: Diagrama de Procesos

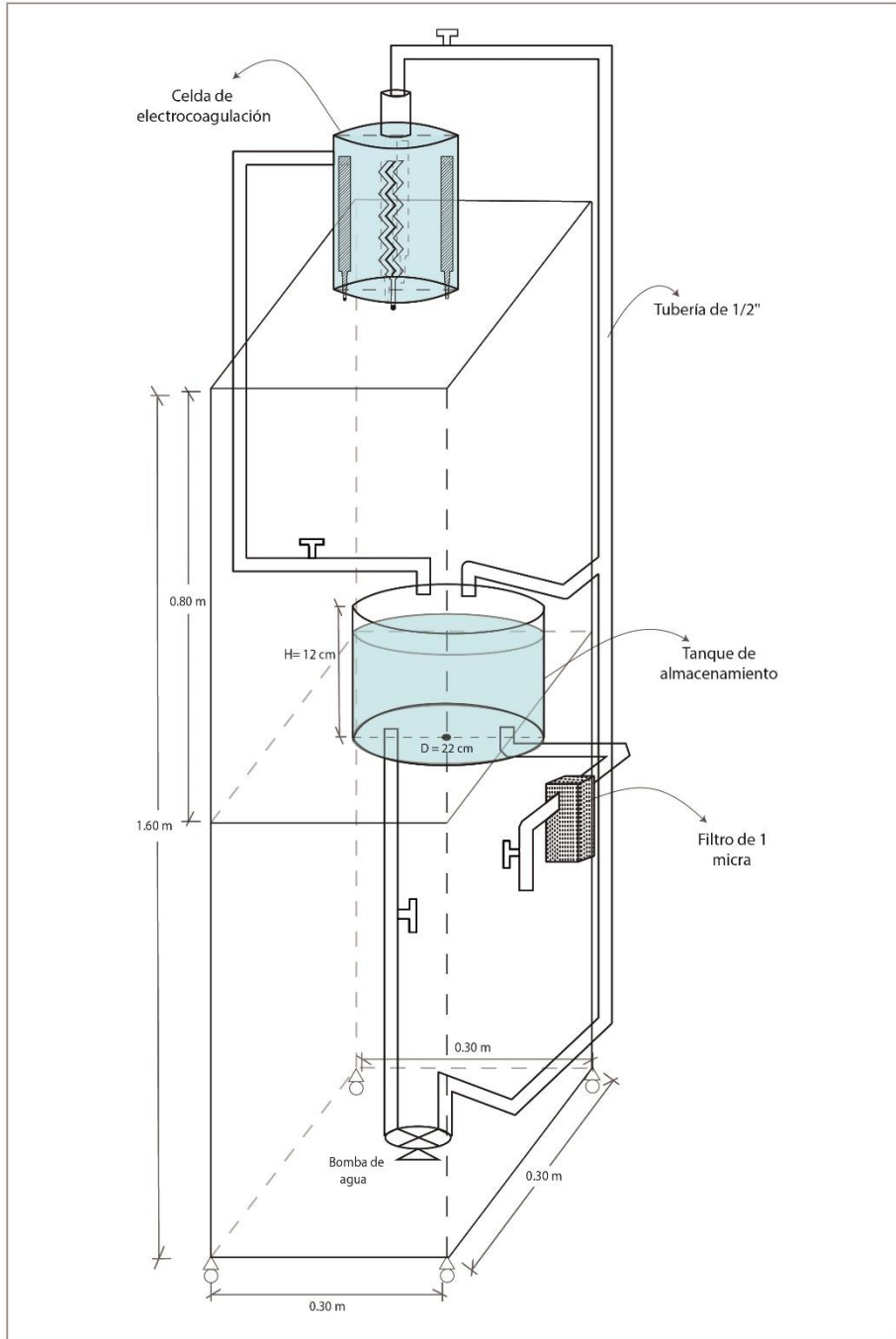


Figura 22. Plano del equipo de electrocoagulación.
Fuente: Elaboración propia.

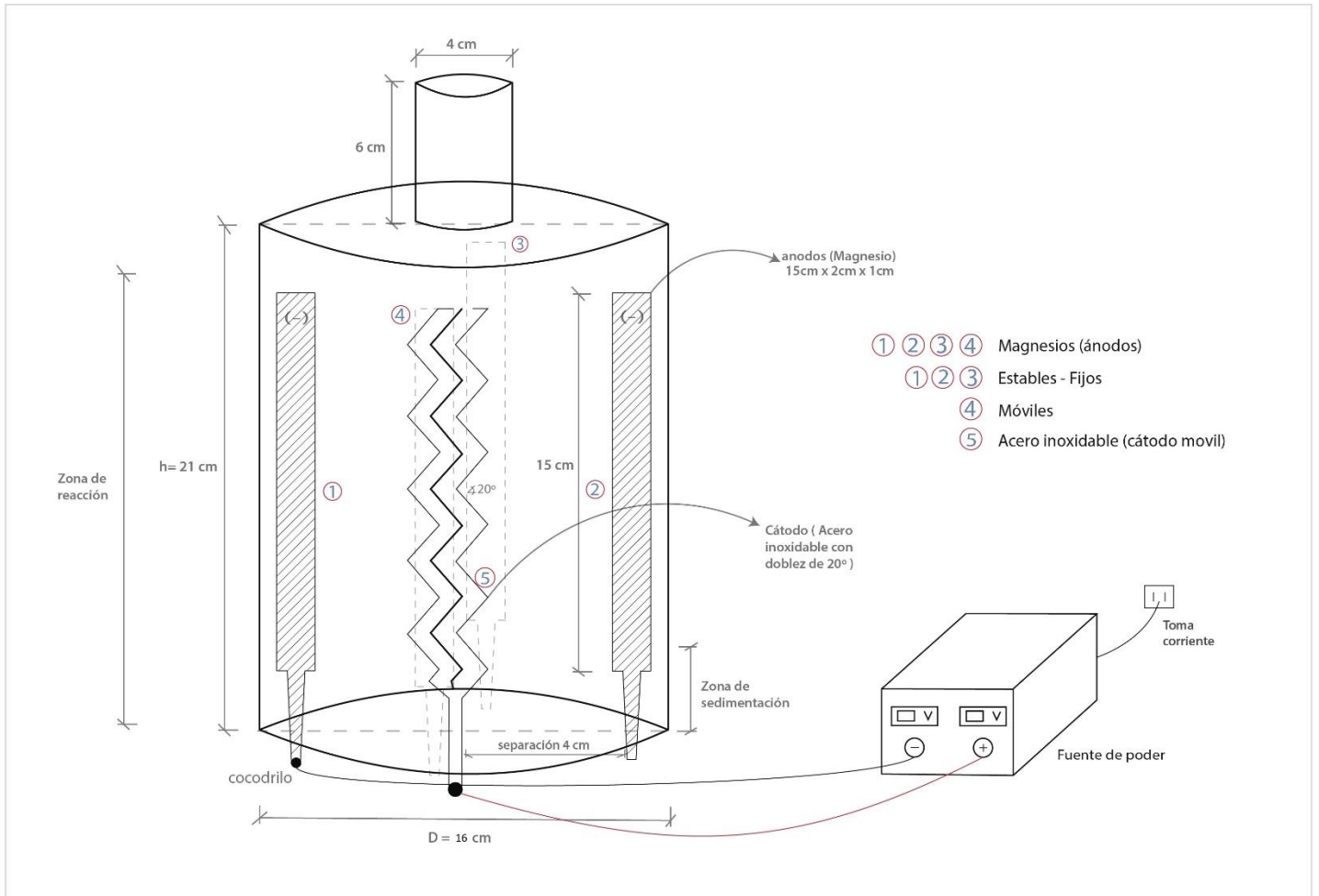


Figura 23. Módulo digital de la celda de electrocoagulación.
 Fuente: Elaboración propia.



Figura 24. Módulo y Estructura de Electrocoagulación.
Fuente: Elaboración propia.