

Universidad Nacional
Federico Villarreal

Vicerrectorado de
INVESTIGACIÓN

ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

**“EQUIPO DE ELECTROCOAGULACIÓN CON ELECTRODOS
MÓVILES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS DE POZO”**

TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO EN GESTIÓN AMBIENTAL

AUTOR:

MILLA FIGUEROA AMERICO CARLOS

ASESOR

Dr. CARRASCO VENEGAS LUIS AMÉRICO

JURADO

Mg. CASTAÑEDA PÉREZ LUZ GENARA

Dr. BOLÍVAR JIMÉNEZ JOSE LUÍS

Dr. MALPARTIDA CANTA ROMMEL

LIMA-PERÚ

2019

Agradecimiento

A Dios por concederme la vida y el regalo máspreciado mis hijos.

A la UNFV-EUPG por darme la oportunidad, a las autoridades de la EUPG – UNFV por su sapiencia gracias.

A los extraordinarios:

Jorge Milla Apolinario

Wilhem Cabrera Aguilar

Marta Ames Coca

Mario Maguiña Mendoza

Rommel Loli De Paz.

Por su valioso apoyo en la culminación del presente estudio

Dedicatoria

A Lucy y a mis hijos:

Carlos Enrique

Claudia Katherine

Renzo David

Con inmenso amor, a ustedes por
compartir mis momentos de
felicidad.

A Elena Benavides Flores, con
muchoa gratitud.

Dedicatoria

A mí querida madre Eladia Figuroa Caballero fuente inagotable de protección, amor, y cariño.

A mi padre Camilo Milla Gonzales, promotor de la educación superior ancashina, que a sus 93 años sigue dándonos lecciones de grandeza y esperanza de la vida.

Contenido

RESUMEN.....	12
ABSTRACT.....	13
INTRODUCCIÓN	14
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.1 Descripción del problema.....	15
1.2 Formulación del problema.....	17
1.2.1 Problema General.....	17
1.2.2 Problemas Específicos.....	17
1.3 Justificación e importancia de la investigación	18
1.3.1 Justificación teórica.....	18
1.3.2 Justificación práctica.....	18
1.3.3 Justificación económica	19
1.3.4 Justificación Social.....	19
1.4 Limitaciones de la investigación	19
1.5 Objetivos.....	20
1.5.1 Objetivo General	20
1.5.2 Objetivos específicos.....	20

II. MARCO TEÓRICO	21
2.1. Antecedentes	21
2.2.1 Antecedentes internacionales.....	21
2.2.2 Antecedentes nacionales.	30
2.2 Marco Conceptual.....	32
2.3 Aspectos de responsabilidad social y medio ambiental.....	54
III. MÉTODO.....	55
3.1 Tipo de investigación.....	55
3.2 Población y muestra.....	56
3.3 Hipótesis	57
3.4 Operacionalización de variables	57
3.5 Instrumentos	58
3.6 Procedimientos	59
3.7 Análisis de datos	94
IV. RESULTADOS.....	98
4.1 Contrastación de hipótesis	98
Contrastación de la Hipótesis General:	98
Contrastación de la Hipótesis específica N° 1	101
Contrastación de la Hipótesis específica N° 2:	103
Contrastación de la Hipótesis específica N° 3	106

Contrastación de la Hipótesis específica N°4	110
4.2 Análisis e interpretación	114
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	118
5.1 Discusión	118
5.2 Conclusiones	121
5.3 Recomendaciones.....	122
VI. REFERENCIAS.....	123
ANEXOS.....	128

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Clasificación de la dureza del agua por CaCO_3	53
Tabla 2	Electrodos, características y color de cables de conexión.....	75
Tabla 3	Arreglos de las variables independientes según Taguchi.....	89
Tabla 4	Ensayo 1: Pozo 1, Voltaje 3 voltios, Velocidad 40 rpm	94
Tabla 5	Ensayo 2: Pozo 1, Voltaje 6 voltios, Velocidad 90 rpm	94
Tabla 6	Ensayo 3: Pozo 1, Voltaje 9 voltios, Velocidad 140 rpm	94
Tabla 7	Ensayo 4: Pozo 2, Voltaje 3 voltios, Velocidad 90 rpm	95
Tabla 8	Ensayo 5: Pozo 2, Voltaje 6 voltios, Velocidad 140 rpm	95
Tabla 9	Ensayo 6: Pozo 2, Voltaje 9 voltios, Velocidad 40 rpm	95
Tabla 10	Ensayo 7: Pozo 3, Voltaje 3 voltios, Velocidad 140 rpm	96
Tabla 11	Ensayo 8: Pozo 3, Voltaje 6 voltios, Velocidad 40 rpm	96
Tabla 12	Ensayo 9: Pozo 3, Voltaje 9 voltios, Velocidad 90 rpm	96
Tabla 13	Matriz de registro de datos procesados antes y después de los ensayos	97
Tabla 14	Resumen de procesamiento de casos	99
Tabla 15	Pruebas de normalidad hipótesis general	99
Tabla 16	Prueba de homogeneidad de varianza	100
Tabla 17	Pruebas emparejadas	101
Tabla 18	Resumen de procesamiento de casos	104
Tabla 19	Pruebas de normalidad hipótesis específica 1	104
Tabla 20	Prueba de homogeneidad de varianza	105
Tabla 21	Estadística de muestras emparejadas	105

Tabla 22 Prueba de muestras emparejadas.....	106
Tabla 23 Resumen de procesamiento de casos	107
Tabla 24 Prueba de normalidad hipótesis específica 2	108
Tabla 25 Prueba de homogeneidad de varianza	108
Tabla 26 Estadísticas de muestra emparejadas	109
Tabla 27 Prueba de muestras emparejadas.....	109
Tabla 28 Resumen de procesamiento de casos	111
Tabla 29 Pruebas de normalidad	111
Tabla 30 Prueba de homogeneidad de varianza	112
Tabla 31 Prueba de muestras emparejadas.....	112
Tabla 32 Prueba de muestras emparejadas.....	113
Tabla 33 Descriptivos antes y después.....	114

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fuerzas de interacción sobre una partícula en suspensión.....	35
Figura 2. Mecanismos de coagulación de partículas coloidales.....	36
Figura 3. Naturaleza eléctrica y la formación de capas sobre un coloide.	37
Figura 4. Procesos electroquímicos en el electrocoagulador	42
Figura 5. Reactores de electrocoagulación convencionales.	45
Figura 6. Fases desarrolladas en la investigación.	59
Figura 7. Resumen de las actividades realizadas en cada fase de la investigación.....	60
Figura 8. Etapas para la construcción del equipo de electrocoagulación.....	61
Figura 9. Criterio para la selección de la geometría de los electrodos.....	62
Figura 10. Criterio para definir la geometría zigzag de los electrodos.	63
Figura 11. Etapas desarrolladas para el diseño y construcción de los electrodos.	64
Figura 12. Pasos para la construcción de los electrodos.	66
Figura 13. Vista de los electrodos.	68
Figura 14. Selección del tanque reactor tubular.	69
Figura 15. Líneas de flujo y zonas de estancamiento.....	70
Figura 16. Capacidad y dimensiones del tanque reactor.....	71
Figura 17. Etapas para la construcción del tanque reactor.....	72
Figura 18. Tanque reactor tubular	74
Figura 19. Porta carbón	77
Figura 20. Electrodos aislados con acople para eje del motor	79
Figura 21. Motor para el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles	80
Figura 22. Convertidor de corriente alterna (AC) a corriente continua (DC).	81

Figura 23. Diseño de la placa electrónica para el control de velocidad de giro del motor	82
Figura 24. Placa electrónica y regulador de velocidad instalada al motor	83
Figura 25. Fuente de poder de doble alimentación	84
Figura 26. Equipo de electrocoagulación con electrodos móviles.	86
Figura 27. Etapas para la selección de muestras de aguas de pozo.....	88
Figura 28. Etapas para la electrocoagulación de las aguas de pozo.	90
Figura 29. Procedimiento para la obtención de las muestras de agua para los ensayos	91
Figura 30. Funcionamiento del equipo de electrocoagulación – Etapa preliminar.....	93
Figura 31. Equipo de electrocoagulación con electrodos móviles – Etapa definitiva.....	93
Figura 32. Histograma para el tratamiento de aguas antes.....	115
Figura 33. Histograma para tratamiento de aguas después.	115
Figura 34. Gráfico q-q normal sin tendencia de media para tratamiento de aguas antes.	116
Figura 35. Gráfico q-q normal sin tendencia de media para tratamiento de agua después....	116
Figura 36. Tratamiento de aguas gráfica de cajas.	117

ANEXOS

Anexo 1 Matriz de Consistencia	128
Anexo 2 Vista satelital de la ubicación de los pozos 1 y 2	129
Anexo 3 Ubicación de los pozos 1 y 2 con curvas de nivel.....	130
Anexo 4 Medición de parámetros fisicoquímico de las aguas de pozo 3	131
Anexo 5 Toma de muestra de agua de pozo 1	131

RESUMEN

Identificación del contexto donde se realizó el estudio: Se observó previamente la situación de la población consumidora de aguas de pozo en los distritos de la provincia de Cañete y Lima Sur, tomando distintas muestras para aplicar el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles y comprobar la modificación de sus parámetros.

Solución al problema: Esta investigación comprende un desarrollo progresivo de diferentes etapas que inicia desde la recopilación bibliográfica y revisión de los antecedentes hasta el procesamiento de los datos obtenidos en la experimentación mediante la aplicación del equipo en las aguas de pozo recopiladas y sus resultados han generado la eficiencia del equipo producto de la investigación.

Procedimientos realizados: Se realizaron nueve ensayos con aguas de tres pozo, cada cinco, diez y quince minutos aplicando diferencias de potencial de tres, seis y nueve voltios a velocidades de cuarenta, noventa, y ciento cuarenta revoluciones por minuto (rpm), los resultados obtenidos se usaron para las pruebas de hipótesis.

Los instrumentos de medición empleados son, conductímetro (con lector de conductividad y sólidos totales disueltos (STD)), ph metro, cronómetro, y velocímetro digital.

Aspectos a resaltar: En esta investigación se diseñó y construyó un Equipo de Electrocoagulación con Electrodos Móviles, distinto a los existentes los que tienen electrodos estáticos con tanque trapezoidal. El equipo de carácter único en este género fue sometido a prueba de funcionamiento electrocoagulando aguas de pozo demostrando su eficiencia.

Resultados: Se comprueba la eficiencia del equipo en la modificación de la conductividad, el pH y los sólidos totales disueltos de las aguas de pozo.

Palabras Clave: electrocoagulación, electrodos móviles, aguas de pozo.

ABSTRACT

Identification of the context in which the study was conducted: The situation of the well-water consuming population in the districts of the Cañete and Lima Sur provinces was previously observed, taking different samples to apply the electrocoagulation equipment with mobile electrodes and check the modification of its parameters.

Solution to the problem: This research includes a progressive development of different stages that starts from the bibliographic compilation and review of the antecedents to the processing of the data obtained in the experimentation by applying the equipment in the collected well waters and its results have generated the effectiveness of the equipment product of the investigation.

Procedures: Nine runs were made with three well water, every five, ten and fifteen minutes applying potential differences of three, six and nine volts at speeds of forty, ninety, and one hundred forty revolutions per minute (rpm), the results obtained were used for hypothesis testing.

The measuring instruments used are, conductimeter (with conductivity reader and total dissolved solids (STD)), ph meter, chronometer, and digital speedometer.

Aspects to be highlighted: In this research an Electrocoagulation Equipment with Mobile Electrodes was designed and built, different from the existing ones with static electrodes. The team of unique character in this genre was subjected to an electrocoagulation operation test well water demonstrating its effectiveness.

Results: The effectiveness of the equipment is verified in the modification of the conductivity, the pH and the dissolved total solids of the well waters.

Keywords: Electrocoagulation, mobile electrodes, well water.

INTRODUCCIÓN

El problema es de vital importancia porque está relacionado con la falta de acceso a la tecnología en relación a la población que usa aguas de pozo, frente a ello esta investigación plantea el uso del equipo de electrocoagulación con electrodos móviles como una alternativa económica por ende de fácil acceso.

Los trabajos previos a esta investigación tienen el común denominador el concepto de electrocoagulación; pero con electrodos estáticos y con objetivos distintos tales como la reducción de materia fecal, eliminación de residuos de aguas de tintura en el tratamiento textil, remoción de aceites residuales, contaminantes presentes en el efluente líquido residual en suspensión coloidal, eliminación de flúor en agua subterránea, etc. Es decir, equipos distintos al de la presente investigación.

Las hipótesis planteadas en la presente investigación no tienen correspondencia con trabajos anteriores en tanto que estos difieren de la concepción de electrodos móviles, así como el objetivo al que están destinados todos los equipos que anteceden a esta investigación, siendo el equipo propuesto un concepto creativo.

Entre los objetivos de esta investigación se establece comprobar de la eficiencia del funcionamiento del equipo de electrocoagulación con electrodos móviles para el tratamiento de aguas de pozo, complementariamente se comprueba la eficiencia en la modificación de la conductividad, el pH y los sólidos totales disueltos de las aguas de pozo.

La implicancia teórica de la presente tesis es la concepción de los electrodos móviles en la modificación de los parámetros de las aguas de pozo y su implicancia practica es la facilidad de su aplicación a las aguas de pozo con ello también lo económico que resulta.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este capítulo se describe la problemática de la tecnología de tratamiento de aguas de pozo desde la experiencia y percepción propia del investigador, en base a ello se formula el problema, luego se justifica la investigación para concluir en plantear los objetivos que se persigue en esta investigación.

1.1 Descripción del problema

Un equipo de electrocoagulación es un dispositivo conformado de elementos entre ellos la cuba electrolítica, los electrodos, los que operan con inyección de corriente continua sobre los electrodos quienes por acción de esta corriente reaccionan produciéndose especies y iones que interactúan con los componentes del agua contenida.

La electrocoagulación es un proceso electroquímico donde las partículas suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, son desestabilizadas por acción de la corriente eléctrica inducida al medio acuoso a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, siendo el hierro y el aluminio los más utilizados. La corriente eléctrica proporciona la fuerza electroquímica que provoca una serie de reacciones químicas en los electrodos, cuyo resultado final es la estabilidad de las moléculas contaminantes. Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan o flotan, facilitando su remoción por algún método secundario. Los iones metálicos se liberan y dispersan en el medio líquido y tienden a formar óxidos metálicos que atraen eléctricamente a los contaminantes que han sido desestabilizados. (Morales C. , 2007)

En el mundo desarrollado como en los países europeos, asiáticos, y en Norteamérica los equipos de tratamiento de aguas son sofisticados sin reportar mayores problemas, sin embargo, en países no desarrollados como el África, los países pobres del Asia y de América no tiene mayor acceso a la tecnología, es decir no cuentan con equipos que les permitan dar tratamiento de sus aguas, siendo estos países los que más pozos poseen en la actualidad.

En América latina se han desarrollado múltiples equipos de mediana escala para el tratamiento de aguas en el intento de mitigar los efectos de las aguas contaminadas entre ellos por ejemplo en Ecuador, Bolivia, Colombia entre otros, sin ser este un esfuerzo directamente para el tratamiento de aguas de pozo.

En el Perú existen innumerables localidades fundamentalmente de la costa árida como por ejemplo Tumbes, Piura, Lambayeque, La libertad, Ancash, Lima, Ica, Moquegua, y Tacna que cuentan con aguas de pozo, la mayoría sin tratamiento tecnológico, solo con tratamiento básico de desinfección.

En Lima la situación del tratamiento de las aguas de pozo es más crítica en tanto estos están dispersos en muchos de sus distritos como Puente Piedra, Callao, Carabaylo, Ate, Carapongo, Pachacamac, Lurín, y la vasta zona de Cañete; en todos estos lugares pobladores de las zonas rurales se abastecen de aguas de pozo, sin el tratamiento debido. Esta situación no ha sido de mayor interés para las autoridades tampoco para el personal encargado de realizar el tratamiento de agua con equipos básico de desinfección empleando hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio sin la debida capacitación del personal. Es decir que las universidades y organismos del estado no se preocupan por el desarrollo tecnológico, como la importación de equipos de tratamiento de aguas de pozo, menos de incentivar la investigación de tecnologías para generar equipos propios en el país y así contar con equipos eficaces para resolver el problema del tratamiento de aguas de pozo.

La consecuencia de no resolver el problema es la exposición de la población usuaria de aguas de pozo para consumo a las enfermedades gastrointestinales y diarreicas con las consecuencias colaterales económicas.

El presente estudio intenta aportar, coadyuvar a mitigar de un lado la problemática social de la población, así como propender al desarrollo de la tecnología propia del país.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema General

PG: ¿La construcción de un equipo de electrocoagulación con electrodos móviles realiza eficientemente el tratamiento de las aguas de pozo?

1.2.2 Problemas Específicos

PE₁: ¿El diseño del equipo de electrocoagulación con electrodos móviles modifica eficientemente los parámetros fisicoquímicos de las aguas de pozo en comparación con el equipo de electrocoagulación convencional?

PE₂: ¿El equipo de electrocoagulación con electrodos móviles modifica eficientemente la conductividad de las aguas de pozo?

PE₃: ¿El equipo de electrocoagulación con electrodos móviles modifica eficientemente el pH de las aguas de pozo?

PE₄: ¿El equipo de electrocoagulación con electrodos móviles modifica eficientemente los sólidos totales disueltos de las aguas de pozo?

1.3 Justificación e importancia de la investigación

1.3.1 Justificación teórica

En Perú se han realizado trabajos de equipos de electrocoagulación fundamentalmente de aguas residuales empleando sistemas de electrocoagulación de tanque o cuba rectangular en el mejor de los casos con aireación y en su mayoría con electrodos estáticos. La investigación estará orientada a proponer un nuevo diseño y la construcción de un equipo de electrocoagulación con electrodos móviles y tanque tubular para ser sometido en la evaluación de aguas salobres de pozo.

1.3.2 Justificación práctica

Es necesario buscar nuevas tecnologías que permitan tratar las aguas de pozo y alcanzar los “Límites Máximos Permisibles” de los parámetros que definen la calidad del agua para consumo humano establecido en el “Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano” publicado mediante Decreto Supremo N° 031-2010-SA (MINSA, 2010)

Como alternativa en la solución de los problemas de calidad de agua para consumo humano surge la propuesta de construir un equipo de electrocoagulación con electrodos móviles para el tratamiento de las aguas, ya que es una tecnología poco o nada aplicada en el país, cuya ventaja es el no uso de floculantes/ coagulantes como el sulfato de aluminio, o los polielectrolitos polímeros sintéticos que eleva el costo del tratamiento. En tal sentido la presente investigación aplica la electrocoagulación como una tecnología de tratamiento de las aguas de pozos en los distritos de San Vicente de Cañete y Lurín, donde no se emplean coagulantes reduciéndose los impactos ambientales.

1.3.3 Justificación económica

Por lo planteado, la investigación busca demostrar la utilidad del equipo de electrocoagulación como sistema para la reducción de materiales sólidos suspendidos y disueltos en aguas de ensayo provenientes de los pozos a evaluar. Los resultados generarían ahorros de purificación de agua.

1.3.4 Justificación Social

Los impactos en la sociedad son múltiples en tanto se destine el tratamiento de agua de pozos que por lo general están en un entorno social de menores recursos.

1.4 Limitaciones de la investigación

La aplicación de la tecnología de electrocoagulación es una técnica ampliamente utilizado en el tratamiento de las aguas residuales provenientes de una amplia gama de industrias y aguas de pozo, cuya utilidad está siendo aprovechada en América del Norte, América del Sur y en algunos países de Europa. Esta tecnología tiene como ventaja pues reduce metales, sólidos coloidales y contaminantes inorgánicos solubles presentes en medios acuosos, donde la corriente eléctrica con los electrodos producen especies poliméricas altamente cargadas como los hidróxido de metal, por el cual se induce la precipitación de ciertos metales y sales, de manera que:

- Uno de los efectos limitantes en la EC es que el electrodo de sacrificio se consume por acción de la corriente eléctrica debido a su oxidación.
- Otro limitante de estos sistemas es el consumo de energía eléctrica.
- Se requieren aguas con mayor contenido de electrolitos, dado que la EC se manifiesta en mayor grado en aguas con mayor conductividad.
- Limitante teórica es la falta de información sobre este modelo de equipo con electrodos móviles y reactor tubular desarrollado.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

OG: Construir el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles para el tratamiento de aguas de pozo.

1.5.2 Objetivos específicos

OE₁: Contrastar el diseño del equipo de electrocoagulación con electrodos móviles para el tratamiento de aguas de pozos con el equipo de electrocoagulación convencional.

OE₂: Evaluar la eficiencia del equipo de electrocoagulación con electrodos móviles en la remoción de la conductividad de las aguas de pozo.

OE₃: Evaluar la eficiencia del equipo de electrocoagulación con electrodos móviles en la remoción del pH de las aguas de pozo.

OE₄: Evaluar la eficiencia del equipo de electrocoagulación con electrodos móviles en la remoción de los sólidos totales disueltos de las aguas de pozo.

II MARCO TEÓRICO

El marco teórico del presente estudio comprende los antecedentes de la investigación, los conceptos asociados a la investigación y el enfoque de la responsabilidad social que corresponda.

2.1. Antecedentes

2.2.1 Antecedentes internacionales.

En el estudio sobre la “Evaluación de la electrocoagulación en el tratamiento de agua potable”, se propuso evaluar las variables necesarias para el proceso de electrocoagulación en el tratamiento de aguas crudas, mediante el establecimiento de una celda electrolítica con diferentes configuraciones de ánodo- cátodo evaluando los porcentajes de remoción para así determinar la eficiencia del proceso. Se realizaron estudios a escala de laboratorio usando una celda electrolítica de capacidad de 1litro, con electrodos de hierro, aluminio y acero inoxidable donde se producen hidróxido de hierro e hidróxido de aluminio los cuales actúan como coagulantes. Se determinaron los porcentajes de remoción de color, turbidez y sólidos totales, para una configuración aluminio - acero inoxidable y para la segunda configuración hierro - acero inoxidable. Los resultados mostraron que las eficiencias en remoción de turbidez y color utilizando ánodo de aluminio fueron de un 40% a un 80% bajo las mejores condiciones de voltaje aplicado, separación entre los electrodos y tiempo de tratamiento. Sin embargo, los porcentajes con ánodo de hierro oscilan en un rango de 10% a 50% en las mejores condiciones del sistema estudiado. El análisis de varianza determinó que existe una diferencia significativa al modificar el metal anódico. Los resultados mostraron que hay una buena correlación entre los hidróxidos de metales formados en la coagulación electroquímica y la reducción de los dos principales contaminantes evaluados del agua cruda como lo son la turbidez y el color. (Perozo & Abreu, 2017).

En el trabajo “Diseño y construcción de un reactor de electrocoagulación para el estudio de tratamiento de agua residual de tintura y acabado textil” publicado por la Universidad Técnica del Norte en Ecuador. El objetivo fue proponer una alternativa más para disponer del agua con alto rendimiento comenzando por una disminución sustancial del consumo y empleo, evacuándola en las mejores condiciones, para ocasionar el menor impacto posible para el ambiente, y cumpliendo con los principios de sostenibilidad y las normas establecidas por la ley. Basado en los resultados y considerando las condiciones particulares del efluente de la empresa Industrial Textiles Tornasol, se concluye que: La cuba trapezoidal, el sistema de entrada del ELRAT (Efluente líquido residual a tratar), los separadores de electrodos, la tubería, deben ser hechos de material aislante de corriente, para evitar fuga de energía y accidentes. Los electrodos para la electrocoagulación del efluente, deben ser de hierro, pues la coagulación es más rápida. (Jaramillo, 2012).

En el trabajo titulado “Diseño y construcción del prototipo de un sistema de electrocoagulación de tratamiento de aguas residuales” se presentó como objetivo desarrollar un prototipo electrónico de pequeña escala para electrocoagulador, con el cual se podrán realizar pruebas que validen el uso de esta tecnología en aguas residuales de diferentes sectores industriales. Las conclusiones relevantes del estudio fueron:

- Se logró investigar exhaustivamente los procesos de coagulación y electrocoagulación, permitiendo comprobando que la electrocoagulación es un método emergente alternativo muy prometedor para el tratamiento de aguas residuales.
- Este procedimiento brinda un potencial grande para la remoción de diversos contaminantes introducidos en el agua.

- El desgaste de los electrodos del equipo está directamente relacionado con la corriente aplicada al sistema.
- Al utilizar la electrocoagulación se elimina el uso de productos químicos y los requerimientos de almacenamientos para los mismos.
- El equipo que se empleó para la ejecución de los tratamientos de las aguas residuales, corresponde a una celda electroquímica tipo Batch a escala de laboratorio con una configuración bifásica, este prototipo permitió evaluar la eficiencia del proceso de electrocoagulación empleando electrodos de hierro y aluminio, la distancia entre electrodos es de 2 cm., la capacidad del reactor es de 15 litros y el área específica de las placas es de 400 cm².
- Se eligió trabajar con un reactor tipo Batch ya que este trata un volumen fijo por ciclo, a diferencia de un tipo continuo que necesita un volumen de agua mucho mayor debido al flujo de líquido constante.
- La electrocoagulación es un proceso muy eficaz para eliminar los sólidos en suspensión y la turbidez de aguas residuales mediante el uso de electrodos de aluminio (Al) y hierro (Fe).
- El cambio de la polaridad en las placas evita desgastar los electrodos por una sola cara, esto lo hace eficiente ya que se oxidan de manera uniforme; lo que no ocurriría donde no se hubiese implementado esta herramienta.

El proyecto tiene un enfoque industrial, debido a esto los materiales utilizados para la parte de potencia son capaces de trabajar hasta los 40 amperios, pero el proyecto tan solo utilizó 25 amperios porque para este valor fue su diseño; el aumento de la potencia solo requiere pequeños cambios en el programa del microcontrolador. (Papaleo & Rodríguez, 2011).

En la tesis “Dynamic experimental study of a new electrocoagulation apparatus with settlement scheme for the removal process in oilfield”. Los autores desarrollaron un trabajo experimental dinámico de un nuevo aparato de electrocoagulación con esquema de asentamiento para el proceso de remoción en yacimiento petrolífero. En la explicación final exponen que la investigación está basada en el nuevo diseño de un aparato de flujo continuo, el sistema de tratamiento de electrocoagulación (EC) se aplica en emulsiones de aceite en agua (O/W) bajo las investigaciones de las características de calidad del agua del yacimiento petrolífero.

Este estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de los parámetros de operación como la densidad de corriente y el índice de flujo de tratamiento al medir el contenido de aceite y la turbidez. Se encontró que la eficiencia de eliminación mejora con una mayor densidad de corriente y un caudal más bajo. Con los parámetros operativos óptimos dados, se encontró que la eliminación de aceite y turbiedad fue de 90%, y 97%, respectivamente. El consumo de energía eléctrica y electrodo se calculó en 5.09 kWh / kg y 0.45 g / g. La extracción de aceite fue del 95%, aumentó en un 2% -3% en comparación con la situación que se lleva a cabo sin los tubos inclinados. Finalmente, se exploró el diámetro interno de los tubos inclinados y se encontró que el diámetro interior más racional es de 20 mm. En resumen, un nuevo tipo de aparato de electrocoagulación de flujo continuo resultó ser rentable y factible en este trabajo (Jiang, y otros, 2017).

En el XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental realizado en Cancún, México, presentaron el trabajo de investigación “Diseño de un equipo de electrocoagulación para la eliminación de flúor en agua subterránea”, (Piñon , Bautista, & Díaz , 2002) donde se plantearon como objetivo diseñar un equipo para la eliminación de flúor en las aguas de pozo de la ciudad de Chihuahua, ya que esta fuente de agua potable contiene 2.4 mg.

flúor/L, valor que excede el nivel máximo permitido por la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994) que es de 1.5 mg. de flúor/L.

La metodología empleada expresa que las pruebas de disminución de flúor se realizaron en una fuente de suministro de la ciudad de Chihuahua localizado en la mancha urbana. Partiendo de la concentración de flúor presente en el agua de 2.4 mg/L. El equipo de electrocoagulación formada de un tanque reactor donde se localizan las placas de aluminio, la fuente de poder que tiene una capacidad de 0-12 V y 0 - 500 Amperios, sedimentador de placas inclinadas y filtro prensa. Las placas de aluminio empleadas contienen cerca de 99.5% de aluminio y las dimensiones de cada placa es de 18 cm. x 30 cm. Con un total de 16 placas en el tanque reactor; con 2 cm. de separación entre placas.

Para determinar la concentración de flúor emplearon un medidor ISE/PH marca Orión Modelo 720 y un electrodo de ion selectivo marca Orión.

Durante el experimento se utilizaron diferentes densidades de corrientes con el objeto de observar el comportamiento de la disminución de la concentración del flúor, como: 2.51, 3.42, 4.1 y 5.78 mA/cm² con un potencial eléctrico de 6 a 8 V. Los resultados muestran que el dispositivo permitió reducir la concentración de flúor de 2.4 mg/L hasta una concentración de 0.07 mg/L. alcanzando una eficiencia de remoción de flúor de hasta 97% utilizando placas de aluminio como electrodos de sacrificio, mientras que los parámetros de conductividad, turbiedad, sulfatos, pH, aluminio, dureza total y alcalinidad total no tuvieron un aumento significativo, que pudiera afectar la calidad del agua, lo que indica que el proceso de electrocoagulación es un proceso confiable. Los autores concluyen que el sistema de electrocoagulación disminuye la concentración de flúor hasta un 97% para una intensidad de 5.78 A.

En la tesis “Diseño conceptual y construcción de un electrocoagulador controlado por LABVIEW” (Beltrán, 2015). Realizó un estudio a escala de laboratorio, dicho prototipo fue automatizado en las funciones de dosificación de químicos y aplicación de voltaje por medio del software LABVIEW, donde una interface electrónica transmite los datos desde un computador personal.

El diseño del reactor de electrocoagulación fue definido a partir de una serie de ensayos teniendo en cuenta las variables tiempo que tarda la reacción de electrocoagulación, tamaño del reactor y voltaje aplicado. El funcionamiento del electrocoagulador fue verificado con la remoción de cromo hexavalente contenido en muestras artificiales.

Entre las conclusiones: El diseño conceptual del electrocoagulador a nivel laboratorio se llevó a cabo por los siguientes requerimientos, optar por tres reactores de tamaños diferentes, ya que en la bibliografía se encontraban reactores con medidas grandes para industrias, medianos y pequeños a nivel laboratorio; otro requerimiento fue el material de los reactores para hacer las pruebas el escogido fue el plástico porque es común, y económico; el tercer requerimiento fue variar voltajes de 5, 10 y 15 voltios en cada reactor, el reactor escogido por su eficiencia al remover cromo hexavalente estaría listo para automatizar la función de aplicación de voltaje.

Se realizaron pruebas de aplicación de voltaje y corriente arrojada al variar el número de electrodos (4, 6 y 8 electrodos) para evaluar el comportamiento de la corriente al aumentar o disminuir el número de electrodos, se obtuvo resultados similares al aplicar 5 voltios y obtener una corriente de 1,2 A al usar 4 y 6 electrodos se podría encontrar una diferencia al realizar un análisis de reducción de cromo y el tiempo que se tarda el proceso de electrocoagulación en reducirlo; al usar 8 electrodos se obtuvo una corriente de 1,4 A al variar hasta 3,5 voltios.

En la investigación orientada hacia el “Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea” (Arango & Garcés, 2007, p 56-67) donde establecen como objetivos considerar algunos aspectos para el diseño de la celda, los electrodos, los materiales de este, la geometría y la disposición de los electrodos, considerando que estas variables son fundamentales para que la aplicación de la electrocoagulación tenga resultados óptimos. Además de determinar los parámetros eléctricos de la fuente de voltaje y estudiar el comportamiento de los diferentes parámetros involucrados en la remoción de contaminantes.

La metodología contempló el diseño y la construcción de la celda de electrocoagulación para tratar agua residual de una industria láctea, para lo cual tomó tres muestras de agua residual del tanque de homogenización; midieron los pH, la conductividad, DQO y el contenido de los aceites y grasas, cuyos parámetros iniciales fueron tabulados.

Sobre los resultados, determinaron que para distancias de separación entre electrodos menores a 10 mm. los tratamientos se hacen prolongados, debido a la presencia de lodos formados impidiendo la circulación del medio acuoso y la generación de turbulencias que favorecen la coagulación dando como resultado bajas remociones de DQO. Mientras que para distancias entre electrodos mayores a 10mm. no se presentaron cambios importantes en el proceso, en comparación con los resultados obtenidos a 10 mm.

Por otro lado, obtuvieron como resultado que la eficiencia en la remoción se incrementa con el aumento de la distancia entre electrodos, el aumento de densidad de corriente y el tiempo. También es que se pueden conseguir eficiencias altas en la remoción de DQO a densidades de corriente inferiores a los trabajados en los tratamientos, siempre que se disminuya el pH.

Finalmente concluyen que los tiempos del proceso de electrocoagulación, tanto de los resultados presentados, se puede ver que entre los 15 y los 20 minutos las pendientes de las curvas

tienen una tendencia a disminuir, lo cual sugiere que los tratamientos tienen su mayor efectividad en los primeros 15 minutos.

En la investigación “Diseño un Prototipo para el tratamiento de aguas residuales domésticas”, basado en electrocoagulación. (Robles & López, 2017) Entre sus objetivos propusieron diseñar y probar un prototipo para el tratamiento de aguas residuales domésticas, basado en la metodología de electrocoagulación. Para la medición de los parámetros fisicoquímicos del agua residual antes y después de realizado el proceso de electrocoagulación, fue necesario llevar a cabo una serie de pruebas las cuales se basaron en diferentes normativas colombianas y en los procedimientos propuestos por los fabricantes de los instrumentos de medición utilizados.

Las conclusiones más relevantes fueron: El tipo de corriente para lograr el proceso de electrocoagulación, es la corriente directa o continua. En el caso de la corriente alterna no se evidenciaron formaciones de flocs o cambios físicos en el agua tratada. De igual forma, la intensidad de corriente aplicada en el tratamiento requirió una determinada cantidad de tensión, lo cual permitió definir la intensidad de corriente como el parámetro a controlar y la tensión como el parámetro dependiente. La separación de electrodos estuvo controlada por la tensión eléctrica, puesto que para poder alcanzar las corrientes evaluadas con separaciones de electrodos mayores a 2.5 cm. se requerían tensiones mayores a los 90V. Dicha condición conllevó al ajuste de las distancias entre las celdas, y de esta forma se definió la densidad de corriente aplicada en el sistema.

La combinación de materiales de electrodos con mejores resultados fueron los de la combinación acero inoxidable-acero inoxidable, debido a que los flocs formados presentaban mayor tamaño y consistencia. Por el contrario, los electrodos de combinación cobre-hierro producían un efecto de galvanizado no deseado en el tratamiento del agua residual. Con la

experimentación realizada se obtuvieron eficiencias en el tratamiento del agua residual doméstica como en la urbana, como lo son: remoción de DQO (75-83%), DBO5 (89- 100%), sólidos totales disueltos (51-54%), turbidez (93-97%), color (82-95%), conductividad (51-52%), Coliformes (99.9%), al igual que el aumento del porcentaje de oxígeno disuelto (349 – 578%) con respecto al agua residual cruda. Destacando que la mejor eficiencia del tratamiento se presentó en el agua residual urbana.

Los resultados obtenidos en los análisis físico-químicos de las muestras de agua tratada se encuentran dentro de los rangos exigidos en la resolución 631 de 2015 para las descargas en cuerpos de agua como en redes de alcantarillado. De igual manera, los resultados obtenidos en las pruebas de pH, Coliformes, color y grasas se encuentran dentro del rango exigido para el uso en fines recreativos de contacto secundario y para la realización de tratamiento de potabilización.

En la tesis “Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua” (Aguilar, 2015) determinó que la conductividad es uno de los parámetros que influye en la eficiencia de la electrocoagulación, un incremento de esta genera un aumento en la densidad de corriente. También determinó que las variables de mayor incidencia fueron la intensidad de corriente, tiempo de retención, pH y espaciamiento entre las placas.

Además de lo planteado, en la metodología describe el dimensionamiento de la celda que opera a condiciones Batch, cuya capacidad es de 4,5 litros, de forma paralelepípedo rectangular (largo 15 cm. ancho de 20 cm. y altura de 20 cm.) empleando electrodos de aluminio y hierro cuadrados conectados a una fuente de corriente continua, trabajando inicialmente a potencial constante y para las pruebas definitivas variando el potencial y la intensidad de corriente. Para determinar el espaciamiento entre las placas de aluminio y fierro, se realizaron pruebas a diversos espaciamientos de 5mm., 10mm., y 20mm., obteniéndose mejores resultados en una distancia de

10 mm. Se utilizaron 10 placas metálicas como electrodos, 5 de aluminio y 5 de fierro, el aluminio como ánodo (electrodo de sacrificio) y el fierro como cátodo.

Los resultados abordados sobre la determinación de la eficiencia de la DQO y la turbiedad fueron: para ensayos a $\text{pH} = 7.12$, se mantuvo las condiciones iniciales del efluente con sus propias características, como el pH y la conductividad, el mejor resultado bajo condiciones de $\text{pH} = 7.1$, $I = 8 \text{ A}$, se obtiene una eficiencia del 89%. Se puede apreciar que la DQO disminuye de 3920 a 420 mg/l , lo cual es un buen indicativo en la disminución de los contaminantes en el efluente.

2.2.2 Antecedentes nacionales.

En la investigación titulada “Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales procedentes de una planta productora de sulfatos mediante el proceso electroquímico de electrocoagulación”, (Westres, 2013) presentó como objetivo estudiar la remoción de metales pesados de un efluente industrial procedente de una planta productora de sulfatos de Zinc y Magnesio mediante la técnica electroquímica de Electrocoagulación.

El investigador entre sus conclusiones más relevantes indica que: El pH de trabajo, tanto para el reactor de flujo continuo como para el reactor por lotes estuvo en un rango de 5 a 7 cuando se trabajó con electrodos de hierro, y en un rango de 8 a 10 cuando se trabajó con electrodos de aluminio. El aumento de pH es atribuido al consumo de iones H^+ para la formación de $\text{H}_2 (\text{g})$ sobre el cátodo y/o formación de radicales hidroxilos sobre el ánodo. En el apéndice 8 de dicha tesis se puede verificar que el pH de las muestras C_{25} , C_{26} , C_{27} , C_{28} estuvo alrededor de 9,8 que está ligeramente por encima del Límite Máximo Permitido (LMP) para descargas de efluentes que se efectúen a redes de alcantarillado que no cuenten con plantas de tratamiento de aguas servidas que se muestra en el apéndice 12. 5. Para poder hacer un pre tratamiento (acondicionamiento de pH)

al efluente antes de ingresar al reactor de EC es necesario añadir 85 gramos de soda caustica en escamas por cada litro de efluente.

El porcentaje de remoción tanto con electrodos de hierro como de aluminio fue mayor en el reactor de flujo continuo que en el reactor por lotes, debido a que había una mayor liberación de coagulante en efluente, y de una mejor distribución de los iones debido a la misma fuerza del flujo y también debido a los compresores de aire presentes en el reactor flujo de continuo. En la tabla 24 de dicha tesis los tratamientos que lograron disminuir la concentración de metales pesados por debajo de los LMP fueron: Cromo (Cr), hierro (Fe) y plomo (Pb).

Se logró disminuir el nivel de Turbidez desde 36 NTU (valor de la muestra ácida inicial) hasta 1,0 NTU, valor de la muestra C₂₅ (ver valor en el apéndice 8 de dicha tesis) que es un tratamiento de electrocoagulador con electrodos de aluminio en el reactor flujo continuo por un tiempo de 40 minutos. El total de metales pesados removidos por cada ensayo fue mayor en el reactor flujo continuo. Los tratamientos C₂₅ al C₂₈ lograron remover en promedio 96 gramos. El menor consumo de ánodo de sacrificio se dio con los electrodos de aluminio en el reactor flujo continuo, donde por cada gramo de ánodo que se consume se logró remover en promedio 22 gramos de metales pesados en total.

Los mejores tratamientos de todo el grupo de ensayos practicados son el C₂₅, C₂₆, C₂₇ y C₂₈ que fueron realizados en el reactor flujo continuo con electrodos de aluminio en un tiempo de 10, 20, 30 y 40 minutos respectivamente. Son los mejores tratamientos porque se logró remover mayor cantidad de metales pesados en total, porque se logró disminuir el nivel de turbidez a valores por debajo de los permisibles, y además porque se logró disminuir por debajo de los LMP para metales pesados como el Cromo, Hierro y Plomo.

2.2 Marco Conceptual

Electrodos

Se define electrodo como “Un elemento conductor de electricidad que cierra un circuito y entre cuyos extremos se establece una diferencia de potencial. Desde el punto de vista electroquímico es un elemento conductor de electricidad que establece el contacto eléctrico entre un circuito externo, conectado a otro(s) electrodo(s), y una solución electrolítica”. (Martínez & Hernández , 2005).

Electro es un material conductor para pasar una corriente eléctrica en una solución por adición de electrones o extrayendo electrones de iones en la solución. (Lee , 2005).

En el caso de la electrocoagulación con ánodos de sacrificio, la selección del material del electrodo va a depender de la naturaleza y afinidad que tenga el contaminante que se pretende remover con el coagulante producido, es decir, si se quiere remover material suspendido, el coagulante debe propiciar una desestabilización de los coloides para que estos se aglutinen y posteriormente sean separados por precipitación. En el caso de elementos disueltos se busca que el coagulante los adsorba o los retenga mediante algún mecanismo fisicoquímico. Cuando se trata de electrodos inertes como el acero inoxidable, el titanio, platino, níquel, grafito, etc., el mecanismo de remoción es debido a que se presenta una reducción electroquímica del agua en el cátodo incrementándose el pH propiciando la formación de sales básicas poco solubles e hidróxidos de metales polivalentes que precipitan. (Gorodovkyh , Kaplin , & Svishchenko , 1987).

La utilización de electrodos de aluminio tiende a ser minimizada con respecto a los de hierro, debido a los problemas de disposición de los lodos conteniendo ese metal y a la alta pasivación de los electrodos, Sin embargo, Mohammad & col, (2009), citado por (Holt, Barton, & Mitchell, 2005) en su revisión concluyen que, de acuerdo a los resultados experimentales de diversos

autores, los electrodos de aluminio (Al) son más eficientes que los de hierro (Fe) para la remoción de aceites. En el caso de metales pesados se puede remover de manera muy eficiente el arsénico (As) y el cadmio de aguas residuales. Para arsénico (As) la remoción es muy eficiente utilizando electrodos de Fe considerando mecanismos de adsorción de los hidróxidos de hierro – Fe(OH)_2 , Fe(OH)_3^- con las especies de arsénico.

Electrodos, denominación genérica a aquellos elementos que permiten el cierre del circuito eléctrico estos por lo general son de material metálico sin embargo también pueden emplearse electrodos de carbón debiendo tener muy en cuenta que parte del sistema está conformada por un medio electrolítico, de modo que los electrodos pudiendo ser positivo y/o negativo permiten el cierre del circuito.

Cátodo

Es un electrodo a través del cual la corriente eléctrica fluye de un dispositivo eléctrico polarizado. El cátodo por lo general es el electrodo con carga negativa, en la que se da la reacción de reducción, donde su estado de oxidación se reduce debido a que recibe electrones. (González, 2010).

El cátodo, es el electrodo en el que tiene lugar la reducción. (Vera, 2007).

Sobre el cátodo, Gonzáles como Vera concuerdan en establecer que el cátodo es un electrodo donde ocurre la reacción de reducción, es decir que, en este electrodo, por ejemplo, el agua (H_2O) sufre hidrolisis donde el hidrógeno con estado de oxidación +1 (H^+) pasa a un estado de oxidación cero (H_2^0), que es su estado termodinámico más estable del hidrógeno a condiciones estándar, ocurriendo la reducción del hidrógeno del agua con ganancia de electrones.

Ánodo

El ánodo es el polo positivo de un terminal conductor o un electrodo en un proceso electroquímico que toma electrones de los aniones en la solución y está conectado al terminal positivo de la fuente de corriente directa. (Lee , 2005).

El ánodo es el electrodo donde se pierden electrones, se produce la oxidación (Vera, 2007).

Respecto al ánodo los autores antes mencionados hacen un aporte diferenciado, sin embargo se debe agregar que el ánodo es el electrodo donde ocurre la semirreacción de oxidación proceso químico caracterizado por la pérdida de electrones, por lo tanto, se generan especies iónicas con estado de oxidación menor que en su estado inicial, así el aluminio de ser empleado como ánodo pasa de su estado de oxidación cero (Al^0) a un estado de oxidación +3 (Al^{+3}) observándose una pérdida de electrones el que caracteriza a esta semirreacción.

Coagulación

Se considera como la desestabilización de las partículas con carga eléctrica para conseguir que las fuerzas de atracción tipo Vander der Walls que existen entre dos partículas predominen sobre las de repulsión electrostática, logrando que estas se unan y formen sólidos de mayor tamaño. (Martínez F. , 2008).

La coagulación es un proceso químico complejo que implica la combinación de numerosos procesos sencillos. Comienza con la adición de un reactivo químico (normalmente sales de aluminio o hierro - catión polivalente) al medio acuoso con dispersión coloidal. Estas sales activan simultáneamente varios mecanismos de desestabilización coloidal, siendo los más importantes (figura 1 y figura 2) la compresión de la doble capa eléctrica (como consecuencia del aumento en la fuerza iónica del medio que provoca este nuevo reactivo) y la neutralización de la carga

superficial de las partículas coloidales (que está asociada a la adsorción de iones sobre la superficie de las partículas coloidales).

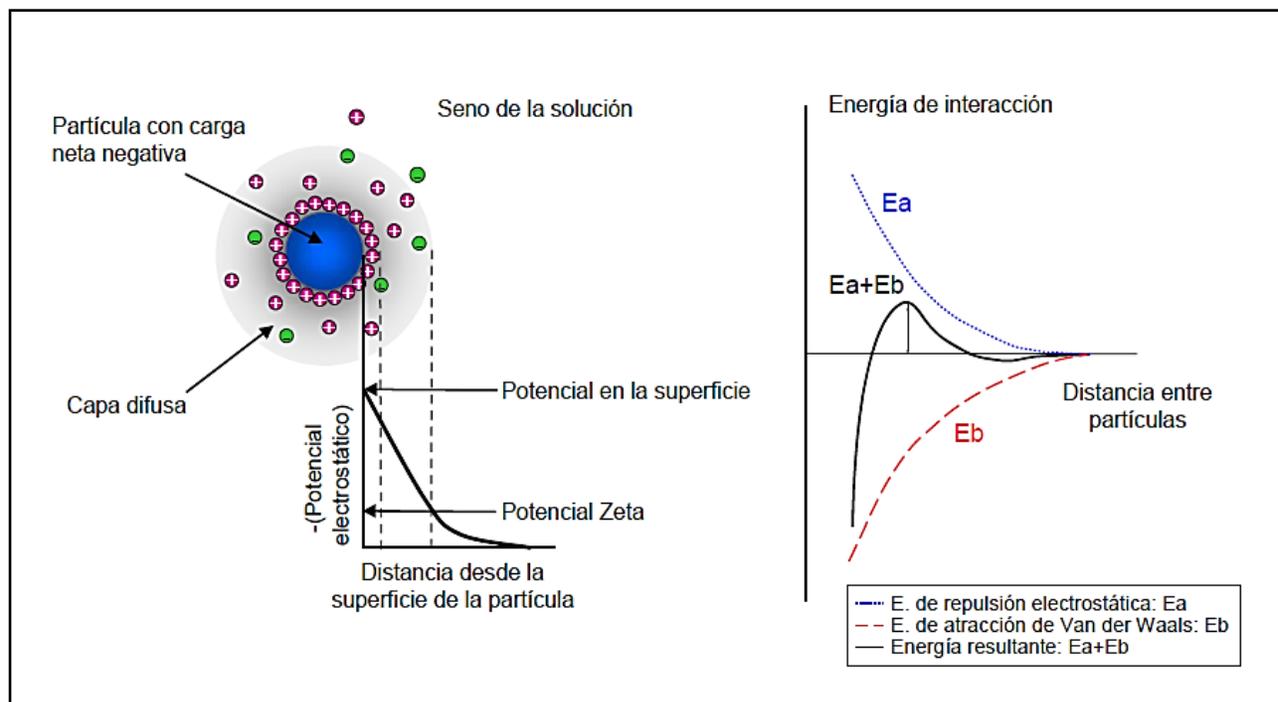


Figura 1. Fuerzas de interacción sobre una partícula en suspensión.

(Martínez F. , 2008).

Además de estos procesos, la adición de sales de aluminio o hierro puede dar lugar también a la formación de precipitados a partir de sus hidróxidos, que retienen en su interior a las partículas coloidales. La inmersión de los coloides dentro de un precipitado es un mecanismo muy efectivo de eliminación de la materia coloidal conocido como coagulación o floculación de barrido. Asimismo, la adsorción de grupos activos de un mismo agente coagulante sobre diferentes partículas coloidales permite la formación de enlaces tipo puente entre partículas. Este mecanismo puede ser conseguido por polímeros formados de forma natural tras la hidrólisis de sales de aluminio o hierro, pero su eficiencia aumenta notablemente si se añaden polímeros orgánicos especiales (iónicos o no) con una cadena de gran tamaño. (Martínez F. , 2008).

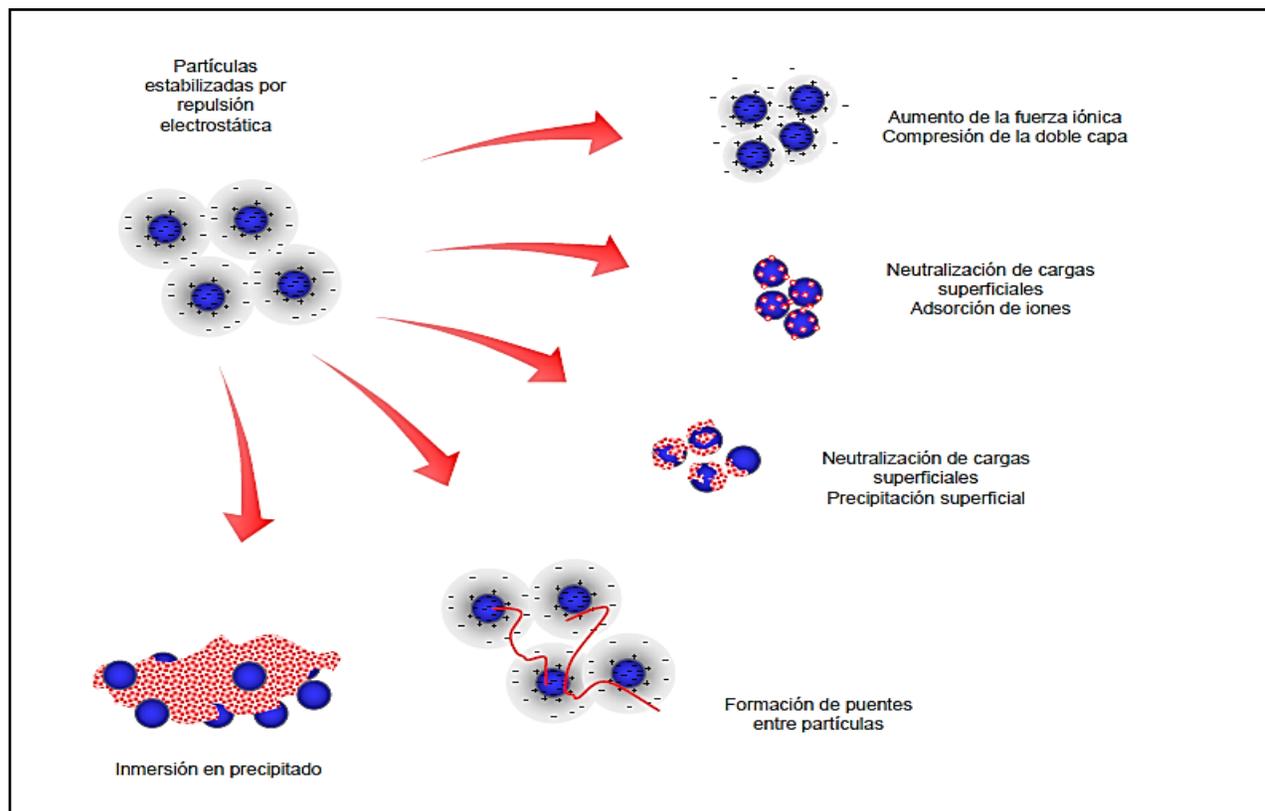


Figura 2. Mecanismos de coagulación de partículas coloidales.

En la figura se explica el proceso de la coagulación donde las fuerzas electrostáticas predominantes en los coloides son reducidas por acción de las fuerzas de Van der Waals. (Martínez F. , 2008).

Las partículas sólidas de dimensiones menores a dos micrómetros ($2\mu\text{m}$), contenidas en las aguas son denominados arcillas, y en ellas se encuentran los coloides cuyos tamaños oscilan entre los $0,2\mu\text{m}$ a $0,5\mu\text{m}$, de modo que no todas las arcillas son estrictamente coloides, cuya forma puede ser laminar sobre cuyas superficie externas son adsorbidos ciertos iones los que rodean a la partícula coloidal impartiendoles cierta carga al coloide, de manera que a cierta distancia es rodeada por otra capa de partículas de carga opuesta y así hasta que la fuerza electrostática se desvanece con la distancia.

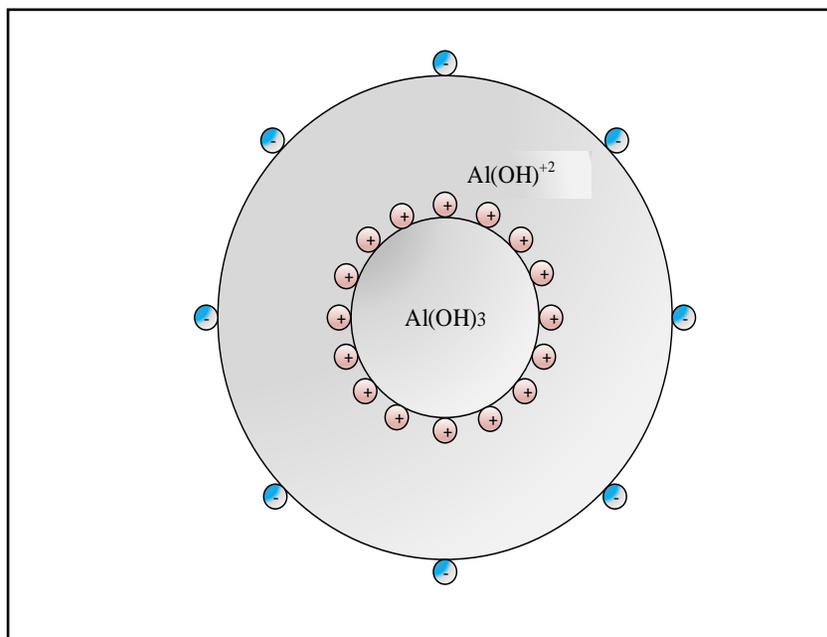


Figura 3. Naturaleza eléctrica y la formación de capas sobre un coloide.

Sobre el coloide aparece una primera capa eléctrica el que le impone la carga al coloide. Para este caso del aluminio se trata de un coloide electropositivos de hidróxido de aluminio $-\text{Al(OH)}_3$ – de modo que se rodea inmediatamente de una capa de partículas o iones negativos con la particularidad de base débil los que flocculan bajo la acción de los ácidos.

La coagulación es el proceso mediante el cual se neutralizan las cargas de los coloides presentes en el agua, por acción de las sustancias químicas denominadas coagulantes. Los coloides son partículas menores a dos micrómetros ($2\mu\text{m}$), son considerados no sedimentables en el agua y son responsables de la turbiedad del agua, lo coloides en su mayoría poseen carga negativa esto hace que se repelen y los coagulantes empleados neutralizan las fuerzas de repulsión para que los coloides puedan juntarse y formar flocs. Entre los flocculantes coagulantes más empleados tenemos a las sales de hierro y aluminio, por ejemplo el tricloruro de hierro (FeCl_3), el sulfato de aluminio - $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ - los que son empleados para solucionar problemas de turbidez de las aguas. Adicionalmente se emplean lo polielectrolitos, que son compuestos sintéticos a base de aminas.

Flóculo

Se conoce como flóculo al conjunto de partículas pequeñas aglutinadas en partículas más grandes y con mayor capacidad de sedimentación que se obtiene mediante tratamiento químico, físico o biológico. Compuesto insoluble que adsorbe materia coloidal y permite su fácil sedimentación. (Aguamarket, 2018).

Una vez que las cargas electrostáticas de los coloides hayan sido neutralizados o superados por las fuerzas de naturaleza intermolecular, los coloides de manera espontánea por tratarse de la misma naturaleza se van acercando y mucho de ellos van formando pequeños paquetes de mayor tamaño llamados floc, hasta que en algunos casos la fuerza gravitatoria ejerce influencia y se produce la sedimentación, mientras que otras debido al hidrógeno formado en el ánodo son llevados a la parte superior del sistema denominándose electroflotación.

Electrocoagulación

La electrocoagulación es un proceso electroquímico donde las partículas suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, son desestabilizadas por acción de la corriente eléctrica inducida al medio acuoso a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, siendo el hierro y el aluminio los más utilizados. La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca una serie de reacciones químicas, cuyo resultado final es la estabilidad de las moléculas contaminantes. Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan o flotan, facilitando su remoción por algún método secundario. Los iones metálicos se liberan y dispersan en el medio líquido y tienden a formar óxidos metálicos que atraen eléctricamente a los contaminantes que han sido desestabilizados.

La electrocoagulación es un proceso en el cual son desestabilizadas las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso,

induciendo corriente eléctrica al agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, siendo el hierro y el aluminio los más utilizados. (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

Se define electrocoagulación como un proceso electroquímico en el que, a partir de compuestos procedentes de la disolución de un ánodo, se agrupa la materia coloidal existente en el agua residual, posibilitando su separación del agua mediante técnicas convencionales de separación sólido-líquido (decantación, flotación). Normalmente, el material anódico empleado consiste en planchas de aluminio o de hierro. Al aplicar una diferencia de potencial a la celda, se consigue la generación de iones en disolución. (Martínez F. , 2008).

La electrocoagulación es un proceso que aplica los principios de coagulación- floculación en un reactor electrolítico el que es un recipiente dotado de una fuente de corriente y varios electrodos los que aportaran iones desestabilizadores de partículas coloidales que reemplazan las funciones de los compuestos químicos que se utilizan en el tratamiento convencional. (Morante, 2002).

El proceso de EC se lleva a cabo en tres etapas:

- Inicialmente se forma el coagulante por oxidación electrolítica del metal en el ánodo.
- Se desestabilizan los contaminantes y emulsiones.
- Finalmente, se producen flóculos por agrupación de partículas del contaminante o adsorción en el flóculo de compuestos químicos presentes en la solución.

La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca una serie de reacciones químicas, cuyo resultado final es la estabilidad de las moléculas contaminantes. Por lo general este estado estable produce partículas sólidas menos coloidales y menos emulsionadas o solubles. Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan o flotan, facilitando su remoción por algún método de separación secundario. Los iones metálicos

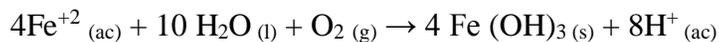
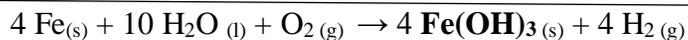
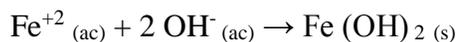
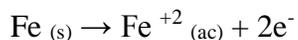
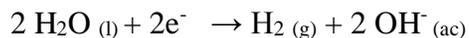
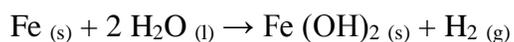
se liberan y dispersan en el medio líquido y tienden a formar óxidos metálicos que atraen eléctricamente a los contaminantes que han sido desestabilizados.

Entonces definimos electrocoagulación como una técnica de separación, basado en el principio de la coagulación por acción de los iones producidos en el ánodo de aluminio o de hierro (Al o Fe) por acción de la corriente eléctrica, de modo que estos iones neutralizan a los coloides presentes en la fase acuosa (aguas con turbiedad), produciendo flóculos favoreciendo la remoción de los coloides y la turbiedad de las aguas.

Mecanismos de la electrocoagulación

La remoción de algunos contaminantes presentes en el agua se debe a la electrolisis donde ocurren una serie de procesos físicos y químicos que condicionan la remoción de ciertos contaminantes presentes en el agua. Las etapas de procesos podemos expresarla de la manera siguiente: la energía eléctrica interactúa con los electrodos donde ocurren diversas reacciones produciéndose especies iónicas denominados cationes y aniones, los que poseen carga positiva y carga negativa. Así en el ánodo se producen iones metálicos consumiéndose el metal por lo que se le denomina electrodo de sacrificio mientras que el cátodo permanece intacto sin disolverse de modo que no se consume.

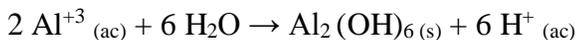
Los iones producidos, debido a su naturaleza eléctrica desestabilizan las cargas de ciertas partículas presentes en el agua. Cuando estas cargas se han neutralizado los sistemas que mantienen las partículas en suspensión desaparecen, originando la formación de agregados de los contaminantes e iniciando así el proceso de coagulación. Entre las reacciones más importantes destacan la hidrólisis, la electrólisis, reacciones de ionización y formación de radicales libres. Estas reacciones cambian las propiedades del sistema agua- contaminantes, que conlleva a la eliminación de la carga contaminante del agua. (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

Mecanismo 1:**Formación del hidróxido férrico****Reacciones en el ánodo:****Reacción en el cátodo:****Reacción global:****Mecanismo 2:****Formación del hidróxido ferroso****Reacciones en el ánodo:****Reacción en el cátodo:****Reacción global:**

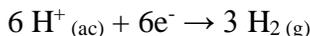
Una vez formado los hidróxidos de hierro – $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ -, los coloides se aglomeran, especialmente aquellos con carga negativa, y posteriormente otras partículas de contaminantes interactúan con estos aglomerados, siendo removidos por formación de complejos o atracciones electrostáticas.

Cuando el aluminio actúa como ánodo las reacciones son:

Reacciones en el ánodo:



Reacción en cátodo:



Reacción global:



Los iones Al^{+3} reaccionan con los oxidrilos (OH^-) formando algunas especies monoméricas como $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}_2(\text{OH})^{2+}$, y otras poliméricas, como el $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, que por procesos de precipitación forman el $\text{Al}(\text{OH})_{3(\text{s})}$, como se muestra en la reacción asociada al ánodo. El hidróxido de aluminio $\text{Al}(\text{OH})_{3(\text{s})}$ es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso, que expone una gran área superficial con propiedades adsorbentes y que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes. (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

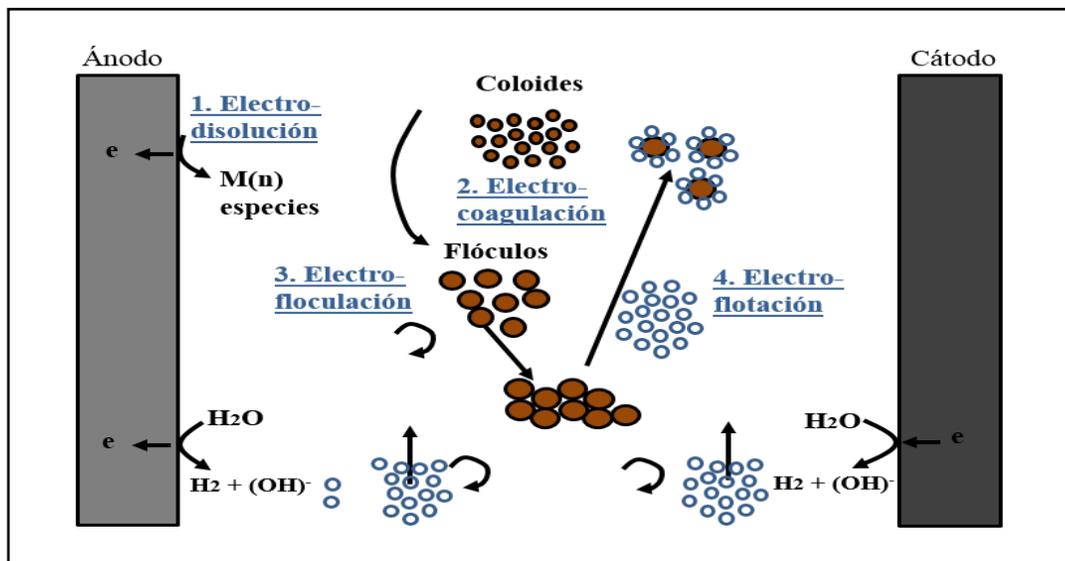


Figura 4. Procesos electroquímicos en el electrocoagulador

El efecto de la corriente eléctrica sobre los electrodos produce una serie de procesos electroquímicos denominados electrodisolución, electrocoagulación, electrofloculación, electro flotación y la electrodeposición. Adaptado de (Martínez F. , 2008).

Tanque reactor

El tanque reactor es un dispositivo que sirve de recipiente del agua a electrocoagular, este elemento del sistema es de vital importancia pues en su seno se produce la electrocoagulación. Debe ser fuerte y resistente a la abrasión y el rayado.

Equipo electrocoagulador

El electrocoagulador es un tanque de reacción en forma de celda con placas dispuestas paralelamente, el cual funciona con una fuente de corriente ajustada con un set point (referencia) por el usuario, al cual se le realiza un control para que mantenga el nivel de corriente aplicada sin importar la conductividad inicial ni las variaciones que presente a medida que avanza el proceso. Presenta los diseños de los circuitos, los diseños mecánicos y la aplicación micro controlada. El prototipo de sistema de electrocoagulación posibilita la realización de pruebas que maximicen la rentabilidad para la utilización en diversos sectores. (Tamayo, 1999).

El electrocoagulador es un dispositivo conformado de varios componentes los que permiten que se desarrolle la electrocoagulación, los componentes interactúan y sirven de apoyo para que la corriente eléctrica aplicada a los electros desarrolle bajo condiciones favorables la electrocoagulación. Entre los componentes del dispositivo tenemos a los electrodos, el tanque reactor, la fuente de poder el que suministra corriente eléctrica continua.

Los electrodos convencionalmente son de placa de forma rectangular o cuadrada, son colocados en posición fija, estáticos sin movimiento y la geometría del tanque reactor es de forma trapezoidal. En el presente estudio diseñamos y construimos un equipo de electrocoagulación que rompe el esquema convencional como se explicará más adelante.

Diseño – Construcción de electrocoagulador

Los reactores para la electrocoagulación pueden clasificarse en primera instancia como reactores tipo batch o reactores de sistema continuo. La selección de uno de estos tipos de reactor depende de las características del contaminante y de su concentración, así como de las cantidades de agua residual a tratar. Analizando el reactor tipo batch, encontramos que éste debe operar con un volumen determinado de agua residual para tratar en un ciclo. Tiene como desventaja que sus condiciones cambian con el tiempo, pero tiene también la ventaja de ser simple y de bajo costo para el tratamiento localizado de aguas. (Holt, Barton, & Mitchell, 2005).

Una segunda clasificación de los reactores está dada en función de la flotación. Una vez que el contaminante ha sufrido el proceso de coagulación existen dos formas de separarlo del medio acuoso, por flotación y sedimentación. Así pues, los reactores pueden diseñarse como reactores con sólo coagulación, o con coagulación y flotación. Son llamados reactores de sólo coagulación aquellos que no aprovechan la electrocoagulación para generar burbujas que separen los agregados (flóculos) del contaminante por flotación, mientras que los reactores en los que se aprovechan las burbujas generadas para realizar la flotación de los agregados del contaminante, reciben el nombre de reactores de coagulación y flotación.

La separación por sedimentación es la más común. La densidad de corriente empleada en el reactor determina la cantidad de burbujas generadas. Se ha podido observar de la experimentación que a bajas corrientes se producen bajas densidades de burbujas, obteniéndose un bajo impulso de las burbujas en el fluido hacia arriba que hace que predomine la sedimentación sobre la flotación. Situación contraria se presenta cuando se aumenta la corriente, pues la densidad de burbujas aumenta resultando en un aumento del flux de momentum hacia arriba, favoreciendo la flotación de las partículas contaminantes. (Holt, Barton, & Mitchell, 2005).

Los procesos convencionales que utilizan sólo coagulación pueden combinarse con otras tecnologías para lograr la separación del contaminante. Estas tecnologías pueden ser: flotación por aire disuelto, electro flotación, filtración y clarificación. Estas combinaciones de técnicas de separación con el proceso de electrocoagulación se pueden llevar a cabo integrando ambas tecnologías en el diseño del reactor o se pueden presentar en unidades separadas. Es importante señalar que la combinación de estas tecnologías y su diseño dependen en gran medida de las propiedades y características que tenga el agua residual a tratar y sus contaminantes. Es, además, importante considerar el uso del efluente. Se ha observado que cuando en el reactor se usan dos placas, una como ánodo y otra como cátodo, no se presenta una buena disolución de iones metálicos. Para mejorar esta disolución se debe aumentar el área superficial de los electrodos, lo cual se logra aumentando el número de placas, disponiéndolas en serie en forma paralela monopolar o bipolar como se muestra a continuación. (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

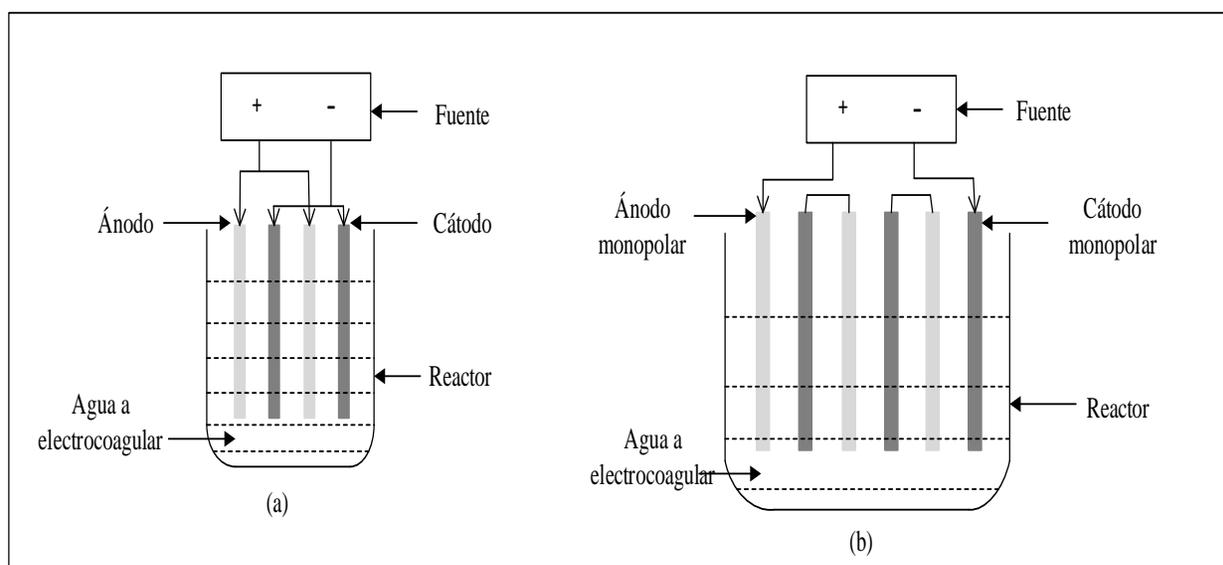


Figura 5. Reactores de electrocoagulación convencionales.

Entre los reactores tipo batch para electrocoagulación tenemos dos clases: (a) Reactor con electrodos monopolares conectados en paralelo. (b) Reactor con electrodos monopolares conectados en serie. (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

Como podemos ver los equipos de electrocoagulación convencionales se diseñan para que puedan operar bajo condiciones de flujo continuo o flujo Batch, siendo los de tipo Batch los que mayormente se construyen y emplean para los ensayos de la electrocoagulación, los que llevan electrodos de placas metálicas de forma rectangular, un tanque reactor de forma trapezoidal, la fuente de poder para el suministro de energía eléctrica continua entre otros.

Velocidad (giro)

Muchas de las veces tenemos dificultades para definir los términos “velocidad” y “rapidez” sin embargo en el lenguaje cotidiano a menudo estos conceptos son empleados indistintamente. Pero en física los conceptos son distintos, así la rapidez no es más que numero positivo, con unidades mientras que la velocidad se usa para indicar tanto la magnitud (valor numérico) de qué tan rápido se mueve un objeto como la dirección en la que se mueve es decir concibiéndola de naturaleza vectorial. (Giancoli, 2006).

La velocidad angular (Ω) cuya notación se expresa mediante la letra griega omega, se define en analogía con la velocidad lineal (de traslación). En lugar del desplazamiento lineal, se utiliza el desplazamiento angular. (Giancoli, 2006).

Por tanto, la velocidad angular promedio se determina mediante la expresión: $\Omega = \Delta\theta/\Delta t$,

Donde: $\Delta\theta$ es la variación del ángulo de giro del objeto realizado en un intervalo de tiempo Δt .

Voltaje o diferencia de potencial

La energía necesaria para separar las cargas depende del voltaje, y de la cantidad de cargas movidas o transportadas. De manera que, de esta definición, se establece que 1 Joule es la energía necesaria para trasladar una carga de 1 Coulomb de un punto a otro punto.

El potencial entre estos dos puntos es conocido como voltaje, cuyo valor puede determinarse a partir de la ecuación $V = W / Q$ (Voltios). Dónde: W es la energía (Julios), Q es la carga (Coulomb) y el resultado es la Diferencia de Potencial. (Arce, J, 2018). El voltaje es la medida de la fuerza producida por esta diferencia en carga, la cual es capaz de mover los electrones a través del alambre desde el extremo con carga negativa hasta el extremo con carga positiva (Dominguez, 2017).

El voltaje es una magnitud física, es la responsable de impulsar a los electrones a través de un conductor. Es decir, es aquella que conduce con mayor o menor potencia la energía eléctrica (Bembibre, 2009).

Voltaje es lo mismo que diferencia de potencial entre dos puntos. El potencial eléctrico se define como la energía potencial por unidad de carga. La unidad del potencial eléctrico Joules/coulomb es la misma que la unidad de la diferencia de potencial, y 1 Joul/coulomb es igual a 1 volt., en honor de Alejandro Volta (1745-1827), quien inventó la batería eléctrica. El voltio se abrevia V , la diferencia de potencial, medida en volt., es conocido como voltaje (Giancoli, 2006).

Agua de pozo

Es el agua que se obtiene de un orificio perforado en la tierra, que explota de un manto acuífero el que puede estar formada de una capa de roca o arena subterránea que naturalmente contiene agua. (Villegas, 2013).

El agua subterránea es la que está presente en el subsuelo, entre las rocas porosas o fracturadas. Cuando se acumula y satura los lechos de rocas fracturadas relativamente porosas y el subsuelo e impregna una capa de terreno impermeable, se dice que el agua subterránea se encuentra en un acuífero. Las aguas superficiales de las precipitaciones pueden llegar por infiltración hasta la capa o manto freático, donde se encuentran las aguas subterráneas, en reposo o movimiento, los que se

encuentra a una profundidad por debajo del suelo y el lecho de roca fracturada es decir, el acuífero. (Rogan & Brady, 2009).

Un balance hídrico de las aguas de lluvia en el ambiente muestra que una parte del agua fluye por la superficie (denominado escorrentía), otra parte se evapora y el resto de agua se infiltra en el terreno, constituyendo ésta la fuente primaria del agua subterránea. Muchos factores influyen sobre estos flujos que se infiltran o se evaporen, como la pendiente, tipo de suelo, la intensidad de la lluvia, el tipo y cantidad de vegetación. Los pozos actúan como depósitos de agua donde el agua subterránea migra y se almacenan de agua de donde pueden extraerse a la superficie mediante bombeo. Los pozos han sido usados desde tiempos remotos y en la actualidad sigue siendo un método importante para obtener agua. (Tarbuck & Lutgens , 2018).

El agua de pozo es el agua subterránea o agua de la capa freática almacenada en un pozo subterráneo, el que se extrae por medios mecánicos o manuales para su almacenaje y uso con diversos fines, para consumo humano, para riego en la agricultura o uso en la ganadería. Las aguas de pozo son la principal fuente de abastecimiento de agua para consumo en las zonas rurales, en los centros poblados del país y el mundo.

Propiedades del agua

Conductividad

De modo general la conductividad eléctrica de un conductor se define como la inversa de su resistencia, de manera que es indiferente que nos refiramos ya sea a la conductividad o su resistencia para expresar su comportamiento al paso de la corriente eléctrica. (Babor & Ibarz, 1965).

La conductividad es la medida de la capacidad que tiene una solución acuosa para transportar electricidad. El valor de la conductividad, es función de las concentraciones de los iones disueltos, de su movilidad, de su valencia, de la temperatura y la viscosidad del medio acuoso. Es un parámetro que nos da una referencia el contenido total de constituyentes iónicos en el agua. La medida física determinada en el laboratorio es la resistencia expresada en ohmios. En el Sistema Internacional de Unidades el recíproco del ohmio es el siemens (S) y la unidad de medida de la conductividad se expresa en mili Siemens por metro (mS/m), siendo la equivalencia de $1\text{mS/m} = 10\text{ mmhos/cm}$. Sobre la salinidad del agua el autor sostiene que es adimensional, y que se concibió en un inicio como la determinación de la masa de sales disueltas en una solución, sin embargo, determinar la cantidad de sales por desecación, genera dificultades debido a que algunos componentes se pierden y la única manera real de determinar la salinidad real o absoluta del agua natural es realizando un análisis químico completo que resulta costoso, y cuya precisión a menudo no es satisfactoria. De manera que para determinar la salinidad del agua, se optó por determinarla de manera indirecta a través de métodos, entre ellos, la conductividad, el que presenta la mayor precisión, pero sólo responde a solutos iónicos. (Severiche, Castillo, & Acevedo, 2013).

Es de entender que la conducción es el transporte de materia (en forma de iones) y depende de las dimensiones y carga de los iones, velocidad de los iones, viscosidad del medio, y la temperatura estableciéndose que la conductividad se relaciona directamente con la temperatura (T) debido a que la viscosidad del medio disminuye.

La conductividad del agua es una propiedad fisicoquímica de naturaleza eléctrica que se concibe como la habilidad que tiene el agua para conducir electricidad. Obviamente que el agua pura no conduce electricidad. En la naturaleza predominan las aguas superficiales y subterráneas como el agua es considerado un solvente universal, contiene iones disueltos los que son los responsables

de la conductividad del agua. Estos iones son de naturaleza eléctrica los que pueden tener cargas positivas (cationes) y los iones con cargas negativas (aniones), los que transportan la corriente eléctrica a través de soluciones de agua. Como se mencionó los iones provienen principalmente de los ácidos y sales de la solución de fuente. Cuantos más iones contenga el agua mayor será la conductividad. En el agua y en fluidos iónicos puede generarse el movimiento de una red de iones cargados, por lo cual este proceso produce corriente eléctrica y se denomina conducción iónica.

Sólidos totales disueltos (STD)

Los sólidos totales disueltos, son los sólidos que permanecen después de realizar la filtración y evaporación a sequedad de una muestra bajo condiciones específicas. Para determinar los sólidos totales disueltos (STD), se debe obtener el incremento de peso de una cápsula tarada, luego de evaporar una alícuota de la muestra de agua previamente filtrada y que posteriormente es secada a peso constante a 180°C, a esta temperatura el agua de cristalización prácticamente está ausente. De modo que el contenido de sólidos disueltos puede obtenerse de la diferencia entre los sólidos totales y los sólidos suspendidos totales. (Severiche, Castillo, & Acevedo, 2013).

Los sólidos totales disueltos (STD) vienen a ser el conjunto de los compuestos sólidos en forma de sales, metales, minerales, iones como los cationes o aniones los que se encuentran disueltos en el agua. Los sólidos en suspensión son partículas o compuestos que no se disuelven ni sedimentan.

Potencial de hidrogeno (pH)

El pH es una propiedad fisicoquímica, es un parámetro una unidad de concentración de iones hidronio presentes en el agua. El pH cambia con la temperatura de modo que es función de la temperatura. (Severiche, Castillo, & Acevedo, 2013).

Sobre el desarrollo histórico del concepto de pH, donde recopilan históricamente la inclusión del concepto de pH concluyendo que Sören Sørensen por la necesidad de determinar la incidencia de la acidez sobre el funcionamiento de las enzimas de la fermentación en 1909 fue quien propuso el concepto de pH como respuesta a la necesidad de una medida clara y precisa de la acidez en la producción de cerveza. (Alméciga & Muñoz, 2013).

Potencial de Hidrogeno (pH), de modo indirecto expresa la concentración de iones hidronio (H^+ , o H_3O^+) presente en un medio acuoso donde la concentración de dichos iones son muy pero muy pequeñas, y matemáticamente el pH se determina tomando log a la concentración de los iones hidronio en el medio, es decir $pH = -\text{Log} [H^+]$, donde $[H^+]$ es la concentración expresada en mol/l, así en el agua pura o neutra la concentración de dichos iones (H^+) es de 10^{-7} Mol/l. de manera que el pH solo se determina para soluciones acuosas donde la presencia de estos iones (H^+ , o H_3O^+) es bajísima, como ejemplo determinemos el pH del ácido nítrico 2 molar (2 M), aplicando la ecuación $pH = -\text{Log} [2 \text{ mol/l}] = -0,30$ se obtiene un valor negativo no previsto, fuera del rango de pH, de modo que se considera cero, muy ácido, mientras que el pH del ácido nítrico 0.2M es 0,69 es decir se tuvo que diluir 10 veces para que pueda alcanzar dicho pH. Esta propiedad es importante en el proceso de la electrocoagulación puesto que dependiendo del pH algunos metales electrocoagulan en mayor o menor cuantía encontrándose que el pH recomendado se encuentra entre 5 a 9. Mientras que el pH de las aguas de pozo en las zonas evaluadas en el presente estudio varía entre 7,2 a 7,9.

El pH de las aguas influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido. Este factor puede incidir en el consumo del electrodo de sacrificio (Chen, 2004).

Color del agua

El color en el agua puede estar asociado a sustancias en solución (color verdadero) o a sustancias en suspensión (color aparente). El primero es el que se obtiene a partir de mediciones sobre muestras filtradas por membranas de 0,45 μm ; mientras que el segundo proviene de las mediciones directas sobre muestras sin filtrar. (Deloya , 2006).

El término color se define como la capacidad de absorber ciertas radiaciones del espectro visible. La presencia de color en las aguas residuales es debida principalmente a la existencia de materia orgánica proveniente de los suelos vegetales, como es el caso de los ácidos húmicos que proporcionan un color amarillento; el hierro que aporta colores rojizos y el manganeso que le proporciona tonalidades negras. (Pérez, León, & Delgadillo, 2013).

Dureza del agua

Se define dureza total del agua como la sumatoria de las concentraciones de iones calcio (Ca^{2+}) e iones magnesio (Mg^{2+}) donde el calcio está expresado como carbonato de calcio en mg/L. (Severiche, Castillo, & Acevedo, 2013).

La dureza del agua viene representa por la suma de la cantidad de iones calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) en el agua, los iones calcio y magnesio en el agua provienen de la disolución de las rocas y minerales en contacto con el agua en su condición de solvente universal, esta concentración se expresa en mg. de carbonato de calcio (CaCO_3)/L.

Clasificación de dureza de agua

Según Rodríguez (2009), las aguas pueden clasificarse en cinco tipos de agua los que se indican en la tabla siguiente:

Tabla 1
Clasificación de la dureza del agua por CaCO₃

TIPO DE AGUA	DUREZA (mg. CaCO ₃ /l)
Blanda	0 - 60
Moderadamente dura	61 - 120
Dura	121 - 180
Muy dura	> 180

Fuente: (Rodríguez, 2009).

Turbiedad de agua:

La Turbidez o Turbiedad del Agua es la propiedad óptica que permite que la luz sea dispersada o absorbida; está causada por el material en suspensión y la unidad de medida es la Unidad Nefelométrica de Turbidez (NTU).

Ya que la turbiedad de agua se considera como la presencia de materiales sólidos u opacos que dicho liquido transparente de por sí, mantiene en suspensión [...]. Para que la turbiedad aparezca es necesario que las partículas en suspensión sean a la vez de un cierto tamaño y suficientemente numerosas. Las impurezas en suspensión en el agua pueden ser de origen mineral: arcilla, sílice, carbono de calcio, azufre, hidróxido férrico, etc. O de origen orgánico: materiales animales o vegetales finalmente divididos, microscópicos: plancton, etc. (Alcantar De Soto, 1999).

De manera que la turbiedad de agua se define como el grado de opacidad producido en el agua por la materia particulada en suspensión. Debido a que los materiales que provocan la turbiedad son los responsables del color, la concentración de las sustancias determina la transparencia del agua, puesto que limita el paso de la luz a través de ella. La turbiedad originada por materiales externos al ecosistema se denomina alóctona y producida dentro del mismo cuerpo (por productividad primaria, por ejemplo) se denomina autóctona.

Turbiedad de agua: Es el parámetro que mide que tanto es absorbida o dispersada la luz por la materia suspendida (sedimentable y coloidal) del agua. La turbiedad no es un análisis cuantitativo de los sólidos suspendidos. En aguas superficiales, se deben en gran parte a la presencia de arcilla y otros minerales, cuyos tamaños son del orden de 0.2 a 5 μm , es decir, incluyen sólidos de escala superior a la de los verdaderos coloides. (Roldán, 2003).

2.3 Aspectos de responsabilidad social y medio ambiental

La presente investigación tiene inherente la responsabilidad social en términos del medio ambiente en tanto que el objetivo es demostrar que el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles es eficaz en la reducción de los sólidos totales disueltos en las aguas de pozo por lo tanto esta aplicación forma parte de la responsabilidad social y medio ambiental, así como la generación de escasa cantidad de sólidos sedimentados en comparación a la aplicación convencional de floculantes coagulantes donde se generan mayores cantidades de sedimentos.

III MÉTODO

En este capítulo se desarrollan y describen aspectos sobre el tipo de investigación, la población y la muestra, las hipótesis, la operacionalización de las hipótesis, los instrumentos, procedimientos y análisis de datos.

3.1 Tipo de investigación

Es una investigación Científica-Tecnológica que correlaciona los datos extraídos experimentalmente a fin de demostrar la eficiencia del equipo construido.

Teniendo en cuenta la finalidad que persigue la investigación es aplicada, porque el estudio busca conocer para hacer, actuar, construir y modificar, le preocupa la aplicación inmediata sobre una realidad concreta (Valderrama, 2014).

Es decir se aplicarán procesos rigurosamente controlados en base a teorías científicamente validados, los mismos que forman parte de la fundamentación científica en la construcción del marco teórico del estudio de la variable.

Por su naturaleza el presente trabajo de investigación es de enfoque cuantitativo, ya que sus resultados son cuantificables (datos numéricos) y susceptibles de medición para lo cual utiliza pruebas estadísticas y su análisis se fundamenta en aspectos observables. (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

Diseño de investigación

Se empleó un diseño experimental, longitudinal, porque en el desarrollo de la investigación se realizó de manera intencional manipulación de las variables durante las pruebas de laboratorio las mismas que fueron sometidas a un riguroso control de las variables intervinientes.

El diseño experimental se caracteriza por un alto grado de control de las variables y porque efectúa asignación aleatoria de los sujetos a los grupos (experimental y control) muestrales que participan en la investigación. Asimismo, se realizaron pruebas en diferentes tiempos, caracterizándolo como longitudinal.

De acuerdo con Salkind (1998) citado por Bernal, para que en una investigación un diseño sea un experimento verdadero, se requiere que haya una manipulación intencional de una o más variables independientes, que se realice asignación aleatoria de los sujetos participantes en la investigación a cada uno de los grupos (experimental y de control), y que se ejerza un riguroso control sobre las variables objeto de medición y sobre las variables extrañas que puedan tener algún impacto en los resultados del experimento (Bernal, 2010).

3.2 Población y muestra

Población

La población es “como el conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones” (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

En el presente estudio la población estuvo conformada por 20 pozos de agua ubicadas en diferentes lugares de Lima y Lima Sur.

Muestra

Se seleccionó tres pozos con aguas de mayor conductividad eléctrica, de las que se extrajo veinticuatro litros de muestra de cada uno de los pozos para representar la muestra de estudio con un total de nueve muestras de ocho litros cada una.

3.3 Hipótesis

Hipótesis General

“El equipo de electrocoagulación construido con electrodos móviles realiza eficientemente el tratamiento de las aguas de pozo”.

Hipótesis específica

HE₁: “El diseño del equipo de electrocoagulación con electrodos móviles para el tratamiento de las aguas de pozo supera ventajosamente al de diseño convencional”.

HE₂: “El equipo de electrocoagulación con electrodos móviles realiza la remoción eficiente de la conductividad de las aguas de pozo”.

HE₃: “El equipo de electrocoagulación con electrodos móviles realiza la remoción eficiente del pH de las aguas de pozo”.

HE₄: “El equipo de electrocoagulación con electrodos móviles realiza la remoción eficiente de los sólidos totales disueltos de las aguas de pozo”.

3.4 Operacionalización de variables

Definición conceptual

Equipo de electrocoagulación con electrodos móviles para el tratamiento de aguas de pozo.

Los reactores electroquímicos (ER) son dispositivos en los que se llevan a cabo procesos electroquímicos. Varios tipos de ER encuentran aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales, especialmente en el tratamiento de aguas residuales de la industria de la galvanoplastia. Esto se explica por el hecho de que las aguas residuales de la industria de la galvanoplastia son un buen electrolito porque contienen varios iones metálicos. (Shestakova & Sillanpaa, 2017).

Definición operacional

La eficiencia de la construcción del equipo de electrocoagulación con electrodos móviles para el tratamiento de aguas de pozo se evaluó realizando nueve ensayos, cada ensayo con una duración de 120 minutos, con voltajes aplicados de 3, 6 y 9 voltios, y velocidades de giro de 40, 90 y 140 rpm., el criterio empleado para la determinación de dichas velocidades fue considerar como tercera velocidad la velocidad máxima de giro del motor que es 140 rpm., y las otras dos velocidades se obtuvieron considerando la relación próxima de 1/3 de la velocidad máxima (50 rpm.) y 2/3 de la velocidad máxima (90 rpm.), resultando las tres velocidades de trabajo de 40, 90 y 140 rpm.

Los indicadores para el tratamiento de aguas de pozo fueron los parámetros de conductividad eléctrica (k) expresado en miliSiemes, el potencial de hidrogeno (pH) adimensional y los sólidos totales disueltos (STD) en mg. de sólidos /litro de agua.

3.5 Instrumentos

Multiparámetro: Mide la conductividad (k) y los sólidos totales disueltos (STD)

pH metro: Mide el pH

Cronómetro: Mide el tiempo

Velocímetro digital: Reporta la velocidad de giro en rpm.

Display de led digital: Marca el voltaje y amperaje

3.6 Procedimientos

Para lograr los objetivos de la presente investigación, se establecieron tres (3) fases o etapas, con sus respectivas tareas y procedimientos, así la primera fase está referida íntegramente a la construcción del equipo de electrocoagulación con electrodos móviles, la segunda fase comprende la selección de pozos de agua, la toma de muestra y transporte de las aguas de pozo para su tratamiento, mientras que la tercera fase comprende todo lo referente a los ensayos experimentales de electrocoagulación de las aguas de pozo con el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles construido.

FASES DESARROLLADAS EN LA INVESTIGACIÓN



1ra FASE: Construcción del equipo de electrocoagulación con electrodos móviles.



2da FASE: Selección de las aguas de pozo.



3ra FASE: Pruebas de electrocoagulación de las aguas de pozo.

Figura 6. Fases desarrolladas en la investigación.

En la figura se muestran las tres fases o etapas desarrolladas para el logro de los objetivos de la investigación. Constituyendo la Primera fase la principal etapa del trabajo de investigación.

Actividades realizadas en cada fase o etapa de la investigación

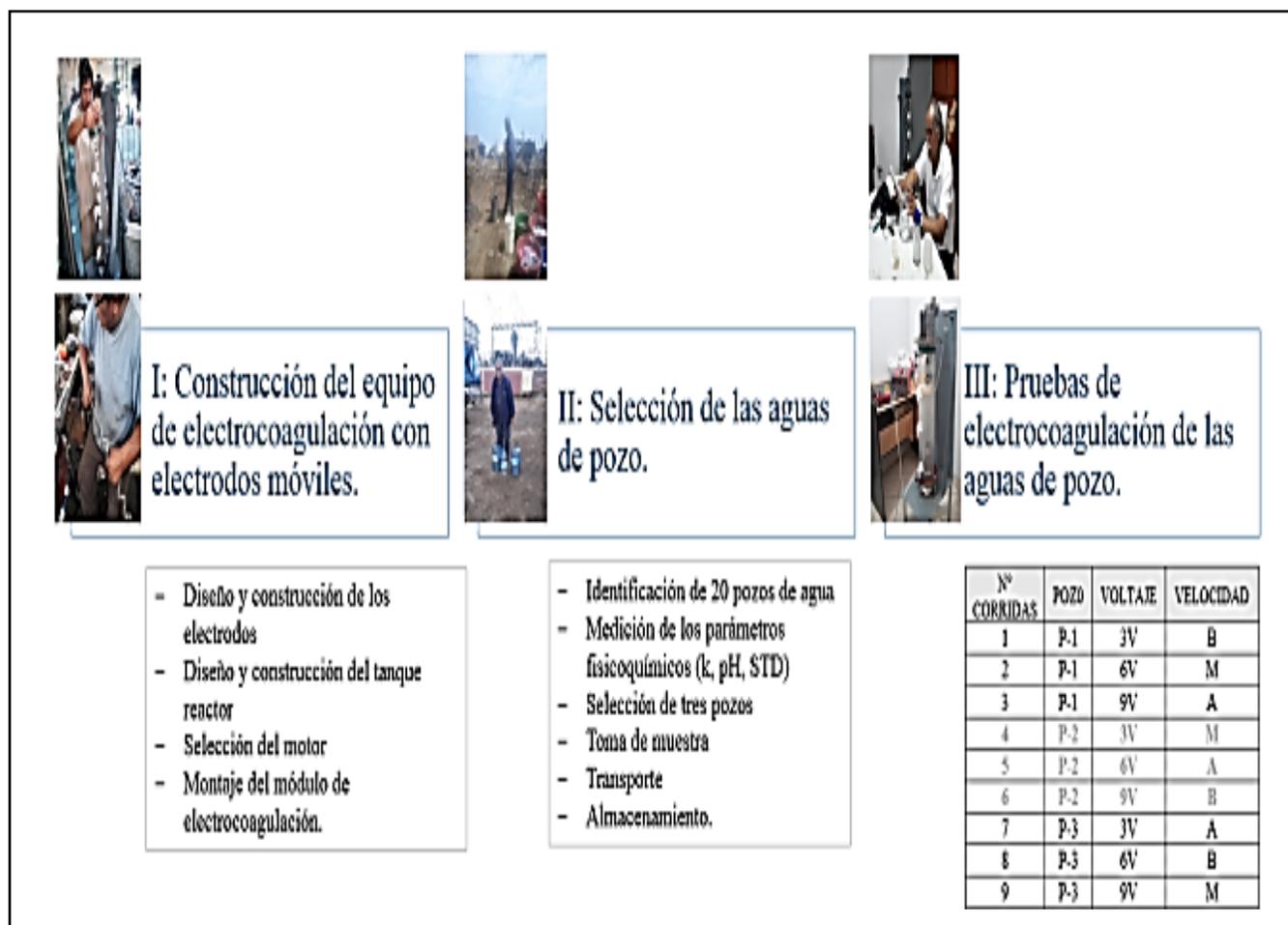


Figura 7. Resumen de las actividades realizadas en cada fase de la investigación

Debajo de cada fase se indican las principales actividades desarrolladas para su culminación.

1ra FASE: Construcción del equipo de electrocoagulación con electrodos móviles:

En esta fase fue necesario desarrollar siete (7) principales etapas indicadas a continuación:

Etapas 1: La construcción de los electrodos de forma longitudinal en zigzag.

Etapas 2: La construcción del tanque reactor tubular.

Etapas 3: La ubicación de los puntos de contacto para la conexión de los polos positivo (+) y negativo (-) de la fuente de poder con los electrodos del equipo de electrocoagulación.

Etapas 4: Aislamiento entre electrodos, y aislamiento entre los electrodos y el motor.

Etapa 5: Selección del motor.

Etapa 6: Diseño y preparación de la tarjeta electrónica para controlar y seleccionar las velocidades de giro del eje del motor (Selector de velocidad).

Etapa 7: Selección de componentes complementarios. En esta etapa se especifican algunos componentes adicionales para el correcto funcionamiento del Módulo de electrocoagulación construido, se tuvo que definir las características de la fuente de poder que alimenta corriente a los electrodos del equipo de electrocoagulación. Otro elemento importante del módulo construido es el transformador de corriente alterna en corriente continua, dispositivo que fue necesario conectar al motor para su funcionamiento, con este elemento el motor se conecta directamente a la línea de corriente de 220V. Las etapas antes mencionadas en su conjunto se muestran en la figura siguiente:

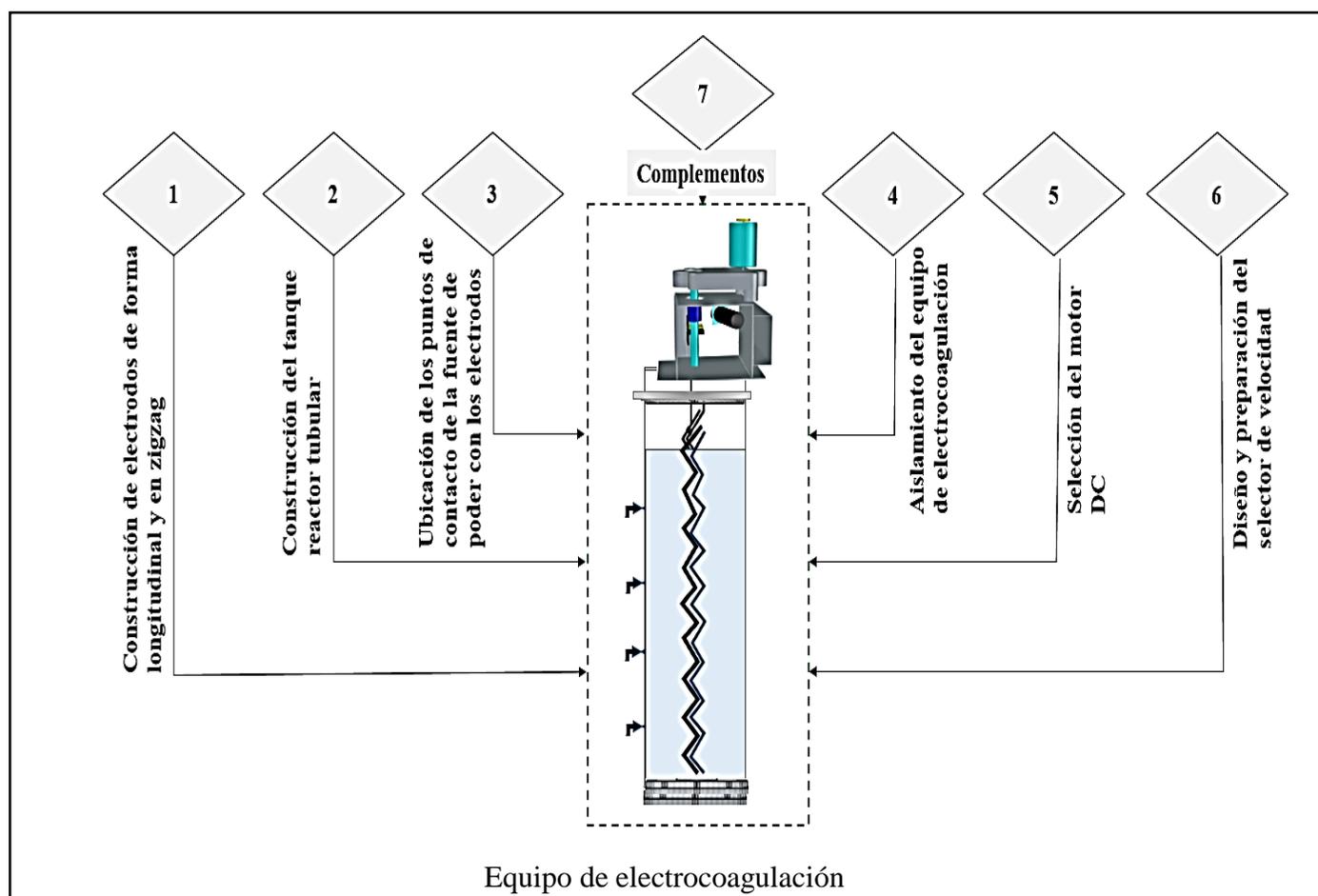


Figura 8. Etapas para la construcción del equipo de electrocoagulación

El equipo fue construido desarrollándose 6 principales etapas y una etapa complementaria que incluye los accesorios para el funcionamiento del módulo.

Etapa 1: Diseño y construcción de los electrodos

Criterios de diseño

Sobre la geometría longitudinal de los electrodos

Lo primero que se tuvo que definir fue la geometría de los electrodos, el que debería ser diferente a los electrodos convencionales empleados, además debería girar.

Si los electrodos fueran de geometría convencional es decir de placas rectangulares (Fig. 7a), el motor tendría que superar un gran torque debido a que tendría que remover ocho litros de agua y vencer el peso de los electrodos. La placa de área A (Fig. 7a), en contacto con el agua, por su geometría requiere gran fuerza para agitar la masa de agua en contacto. Si los electrodos fueran de platinas de forma longitudinal (Fig. 7 b) el inconveniente antes mencionado se reduciría y el motor sería de menor potencia y trabajaría con mayor seguridad sin riesgos de recalentar. Constituyendo este hecho el criterio fundamental para que los electrodos sean diseñados y construidos de forma longitudinal (Fig. 7 b) y no de placas rectangulares (Fig. 7 a).

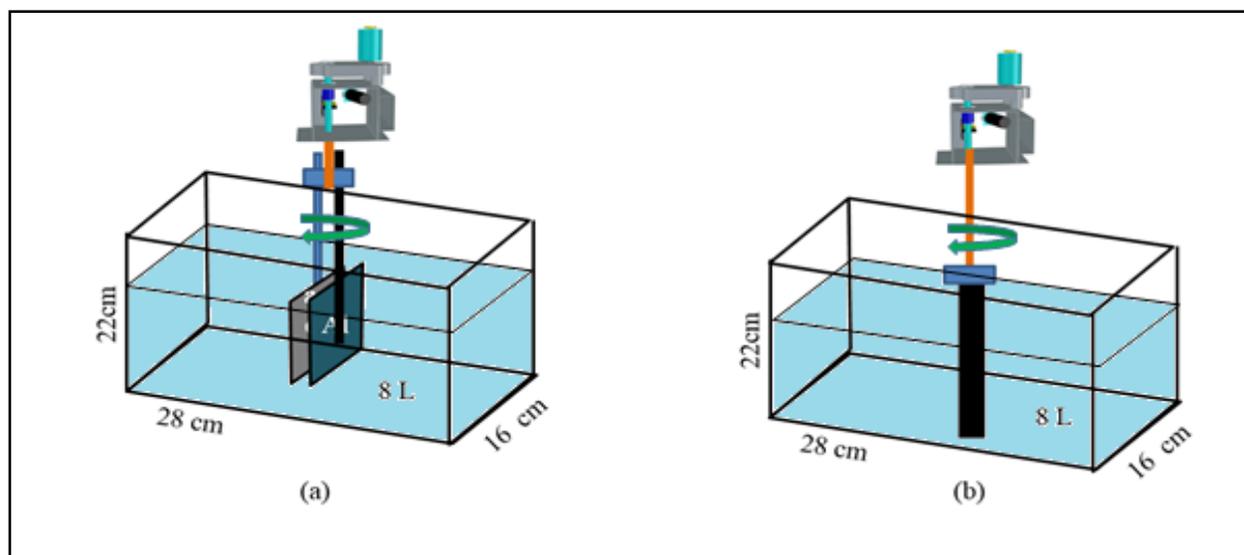


Figura 9. Criterio para la selección de la geometría de los electrodos.

Para girar los electrodos de placa (a) el motor requiere vencer mayor torque que en el caso de los electrodos de forma longitudinal (b).

Diseño de los electrodos en forma zigzag

Criterio

El principal criterio considerado para el diseño de los electrodos en forma de zigzag fue el área de transferencia donde ocurre la generación de especies químicas para la posterior electrocoagulación. Así, los electrodos de forma longitudinal (Fig. b) deberían tener igual área que los electrodos de placas (Fig. a), de modo que para ganar área y que los electrodos de forma longitudinal estén dentro del tanque reactor (y no salir del reactor) se tuvo que doblar los electrodos longitudinales dando lugar a que estos sean diseñados y construidos en forma de zigzag (Fig. c). Entendiéndose como zigzag a la platina longitudinal que en su desarrollo forma ángulos.

En ingeniería los flujos de masa, flujo calórico, caudal, son directamente proporcionales al área de transferencia, o al área de flujo, de manera que el criterio fue tener mayor área de contacto para una misma longitud “L” es decir en el arreglo (Fig. b) los electrodos son de longitud “L”, en el arreglo (Fig. c) la longitud también es “L” pero las áreas de contacto con el agua son diferentes, observándose mayor área de los electrodos en la (Fig. c) que en el arreglo (Fig. b) sin doblar. Siendo este el criterio por el cual los electrodos fueron construidos en forma de zigzag (Fig. c).

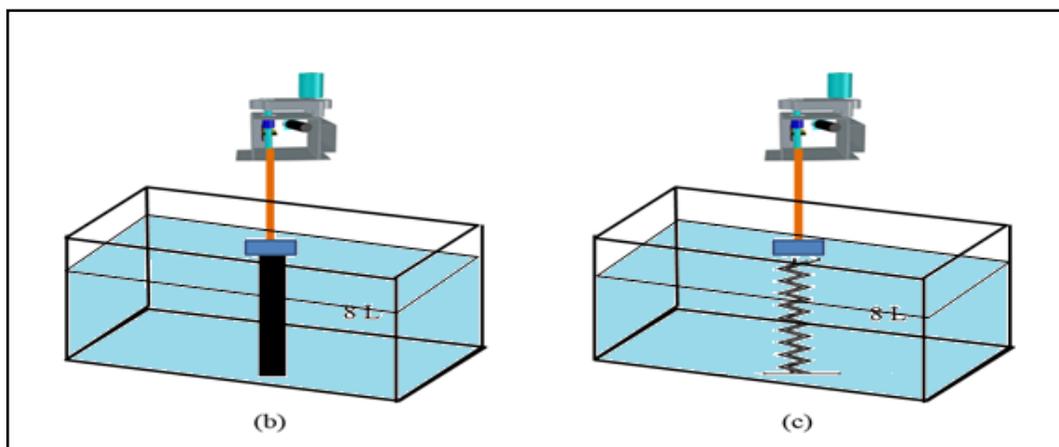


Figura 10. Criterio para definir la geometría zigzag de los electrodos.

b) Modelo de electrodos longitudinal. c) Modelo de electrodo en forma de zigzag.

Construcción de los electrodos

Los electrodos fueron construidos siguiendo una serie de etapas y para su operatividad y correcto alineamiento se establecieron seguir las etapas que se indican:

ETAPAS PARA LA CONSTRUCCION DE LOS ELECTRODOS

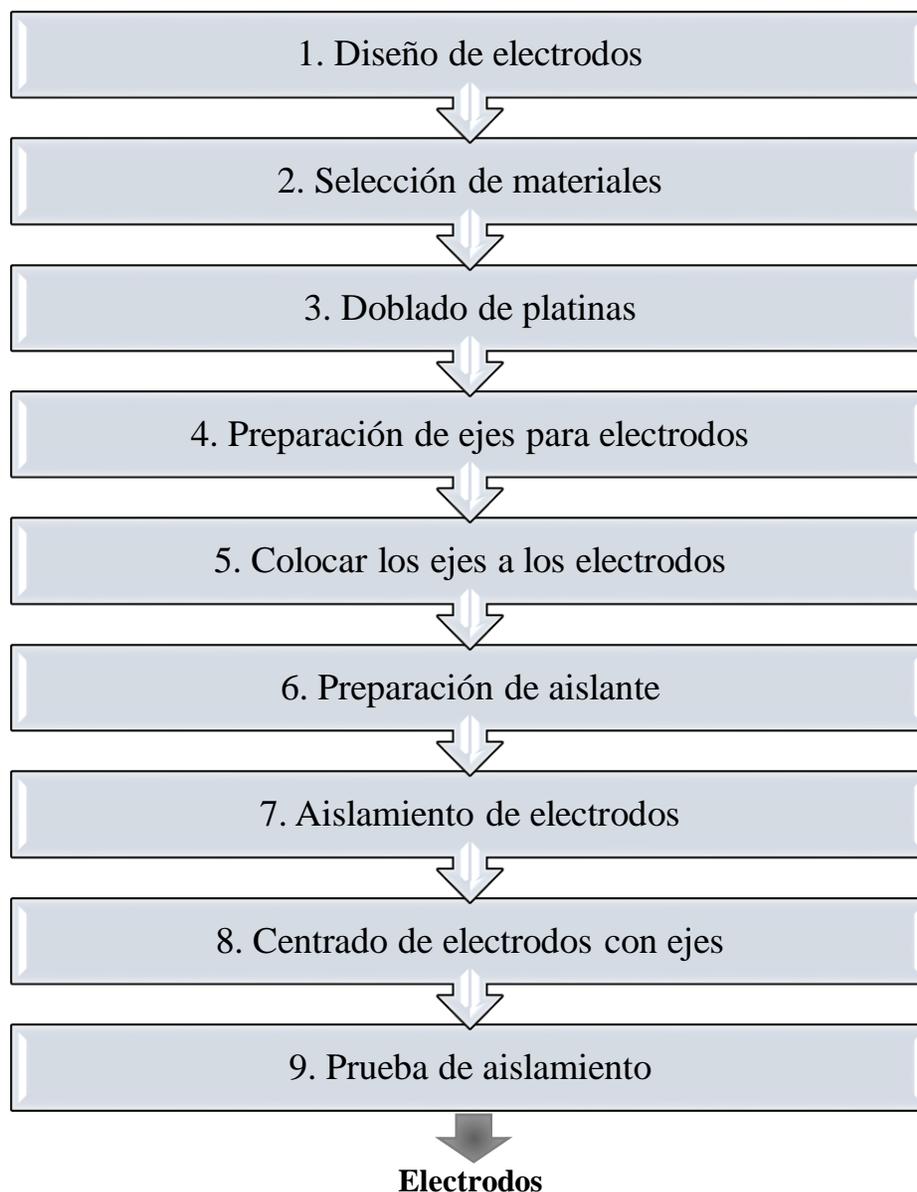


Figura 11. Etapas desarrolladas para el diseño y construcción de los electrodos.

Materiales

Platinas de acero: de tipo comercial, cuyas dimensiones son:

- Ancho: 1 pulgada.
- Espesor: 3 mm.
- Longitud sin doblar: 1 m.
- Longitud doblada en forma de zigzag: 60 cm.

Platinas de aluminio: dulce de alta pureza, cuyas dimensiones son:

- Ancho: 1 pulgada.
- Espesor: 5 mm.
- Longitud sin doblar: 1 m.
- Longitud doblada en forma de zigzag: 60 cm.

Ejes de acero: con las siguientes dimensiones:

- Longitud 25 cm.
- Diámetro 8 mm.

1. Preparación de las platinas

Se emplearon platinas de acero y de aluminio según las medidas indicadas siendo ambos de 1m de longitud y 1” de ancho, variando en el espesor, así el de acero con un espesor de 3 mm. Mientras que el de aluminio es de 5 mm. de espesor, más grueso para aumentar su durabilidad porque el aluminio se consume, es el electrodo de sacrificio.

2. Preparación del molde para doblar las platinas de acero y aluminio. Se construyó un molde tomando como base un ángulo metálico de 60° al cual se le soldó dos placas laterales uno a cada lado con la finalidad de dotarle estabilidad y facilitar el doblado.

3. Determinación de las dimensiones, de la longitud de doblado, del ángulo de doblado.

Sobre las platinas se marcaron los trazos para el doblado.

4. Doblado de las platinas. Con ayuda de una prensa eléctrica se procedió al doblado de las platinas de acero siguiendo las marcas señaladas.

Para el aluminio se trabajó con un ángulo de doblado de 60° buscando generar la forma de zigzag. Para el acero el ángulo de doblado está determinado o regulado por el ángulo de doblado del aluminio, siendo doblado también a 60° de doblado.

Importante:

Resulta importante acotar que para tener mayor área convendría doblar más es decir tener más pasos en el zigzag y para esto los ángulos deberían ser menores, sin embargo debido al espesor del aluminio existe un ángulo límite, así para el aluminio de 5 mm. de espesor el ángulo menor límite es de 60° , para ángulos menores, se raja y rompe, obvio que podemos doblar a mayor ángulo pero tendríamos menos área porque habrían menos pasos doblados en el zigzag.

Se probó doblar platinas de aluminio de 3 mm. Obvio a 60° no se rompe, bajamos el ángulo y obtuvimos más pasos por unidad de longitud. Pero el electrodo de aluminio de 3 mm. de espesor se consume en casi la mitad del tiempo que el electrodo de 5 mm.



Figura 12. Pasos para la construcción de los electrodos.

a) Platinas de acero y aluminio b) Marcado sobre las platinas c) dobladas

6. Los electrodos de aluminio y acero preparados deben mantenerse lo más próximo entre ellos y ser consistentes, debiendo tener presente que deben estar aislados para lo cual se ha incorporado 3 puntos de unión y entre estas deben colocarse una placa aislante.
7. Aislar los electrodos para evitar corto circuito “corto”, dichos electrodos deben aislarse en los 3 puntos marcados colocándose entre ellas separadores de bakelita o teflón de 5 mm. de espesor. Estos separadores evitan que las platinas hagan contacto y se produzca corto circuito.
8. Remachar los electrodos y el aislante en los 3 puntos marcados o también se puede colocar pernos aislados para el ajuste.
9. Verificar la consistencia y solidez de los electrodos juntos, probar que estén aislados (que no haga corto).
10. Preparar dos ejes de acero, y soldarlos en el electrodo de acero uno en la parte superior y el otro en la parte inferior. El eje superior del electrodo de acero cumple dos funciones:
 - El de acoplarse con el eje del motor y
 - Ala vez hacer contacto con el polo negativo de la fuente de poder.El eje inferior del electrodo de acero se apoya sobre la base del reactor y brinda estabilidad a los electrodos cuando giran.
11. A fin de evitar corto circuito entre el eje superior del electrodo de acero y el eje del motor se aisló la zona de acople entre el eje del electrodo de acero y el eje del motor.

El aislamiento se logra colocando un pequeño separador de bakelita entre los extremos del eje superior del electrodo de acero y el eje del motor.
12. Alinear los ejes de los electrodos con en el eje del motor y la parte central del reactor.

13. Sujetar el eje del electrodo de acero con el eje del motor.

Esto se consigue colocando un acople entre ambos ejes, el acople posee dimensiones acordes al espacio, el que es preparado en un torno.

14. Para que los electrodos no caigan, o para que no se separen del eje del motor, se insertado un acople el que posee un pasador metálico, también al eje del motor y al eje del electrodo superior del electrodo han sido perforados para que el pasador pase a través de ellos asegurando su estabilidad.

15. Reforzar la base del reactor donde se apoya el eje inferior del electrodo.

Esto se consigue colocando una placa de bakelita con media perforación central donde se introduce el eje del electrodo y así mantener alineado los electrodos con el eje del motor para evitar dañar a los rodajes y a las chumaceras del motor. La bakelita debe ser pegada a la base con adherente de alta tensión. (300 Kg/cm²).

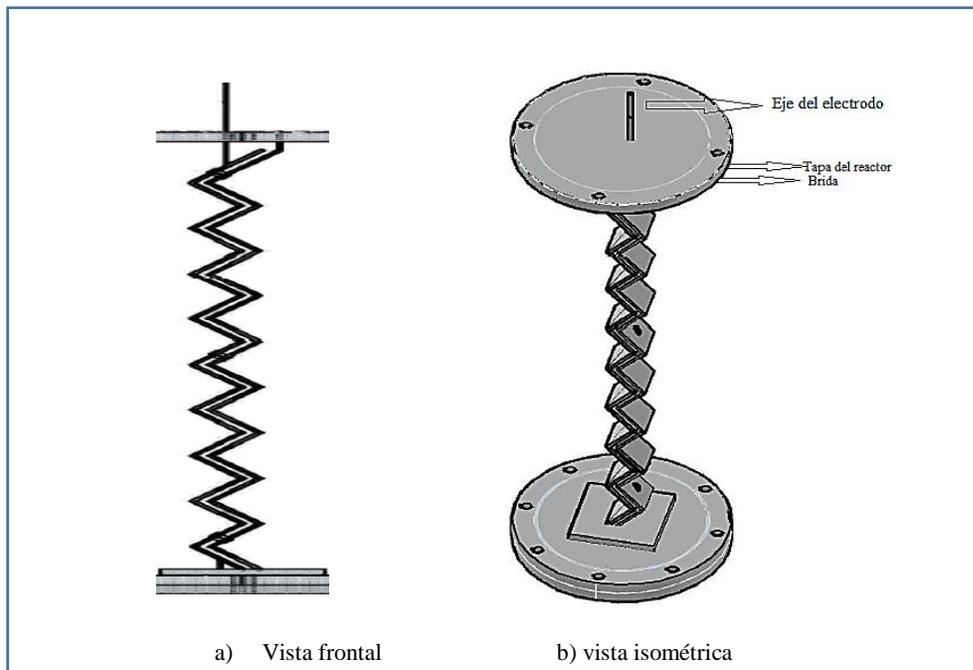


Figura 13. Vista de los electrodos.

Etapa 2: Construcción del tanque reactor tubular

Criterio de diseño tubular.

Primero se tuvo que definir la geometría del tanque reactor, para esto la pregunta fue, de utilizar un reactor convencional tipo cubeta de forma paralelepípedo (c) ¿Qué inconvenientes se presentarían debido al giro de los electrodos? y la respuesta nos llevó a decidir por la geometría buscada. Al girar los electrodos en (c) se genera un flujo circular de agua alrededor del eje de los electrodos, sin embargo, al alejarse del eje, cerca de los vértices el flujo de agua presenta zonas de estancamiento en los vértices, de manera que las partículas presentes en dichas zonas se retardarían en electrocoagular, siendo esta el principal criterio para definir la geometría tubular (d) y no de geometría paralelepípedo.

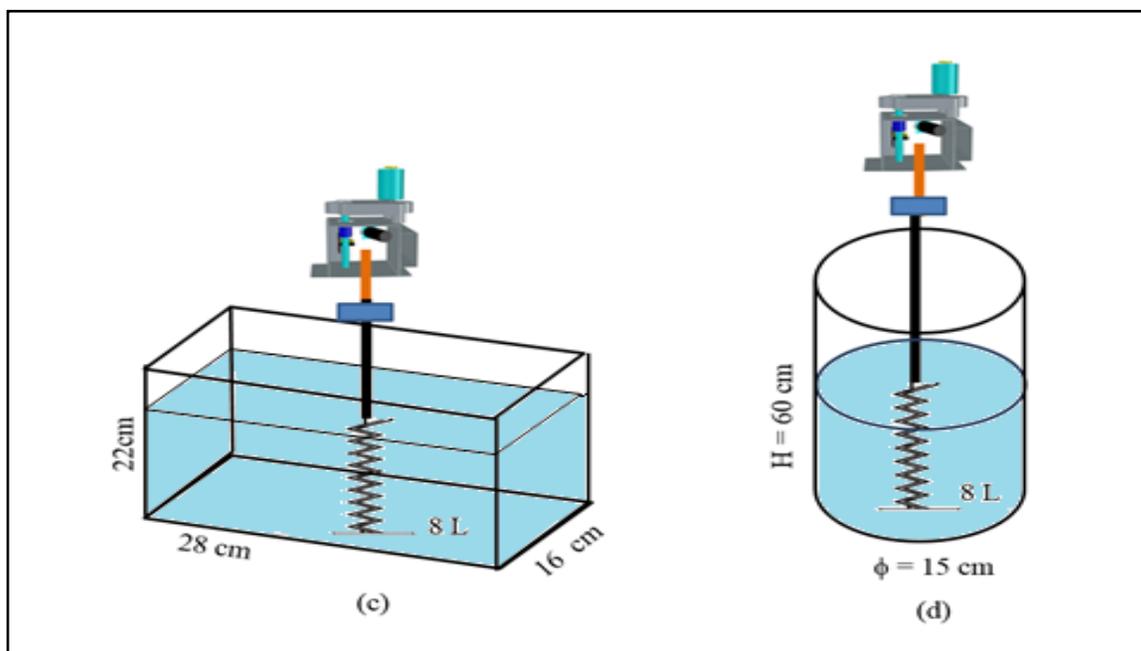
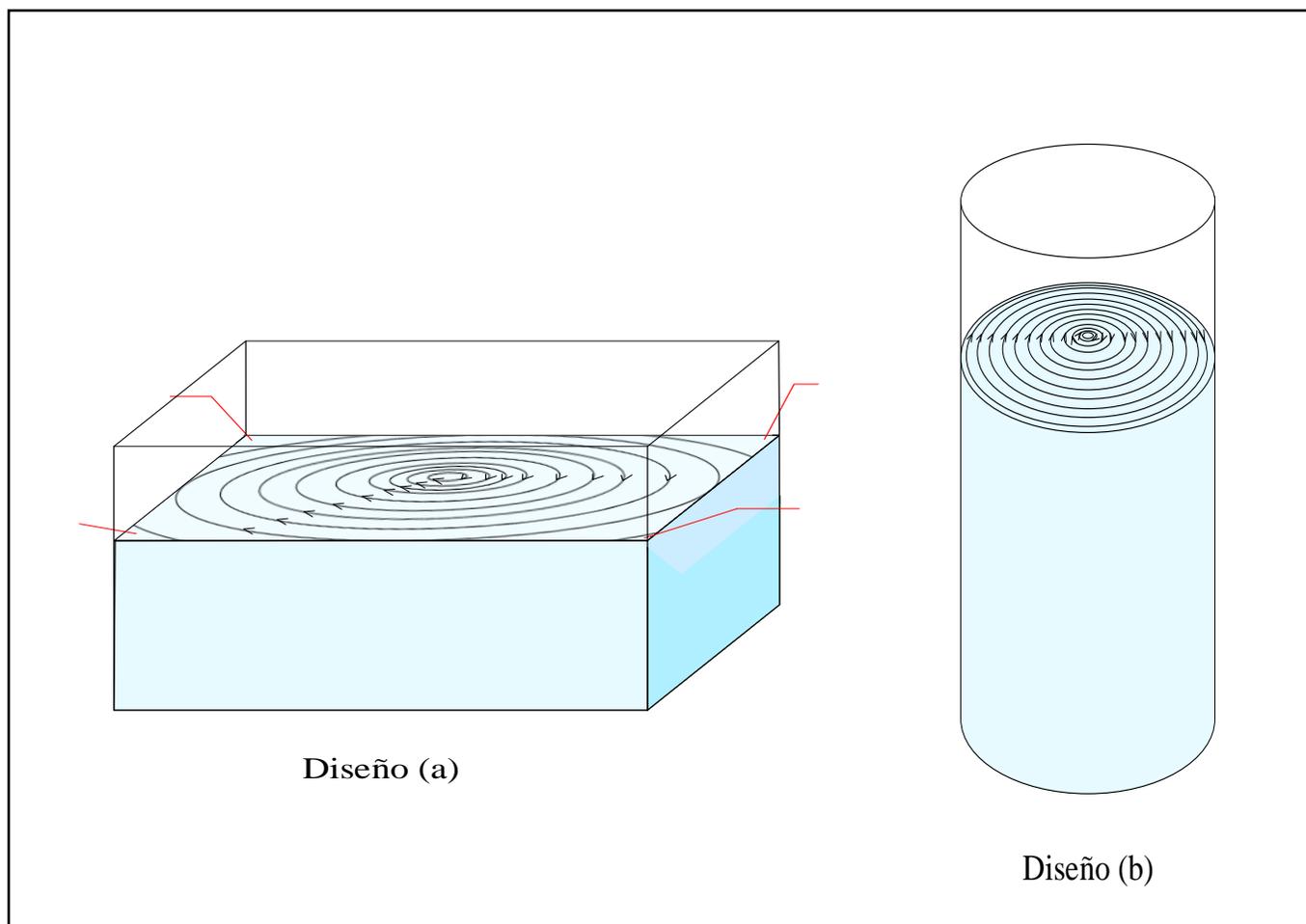


Figura 14. Selección del tanque reactor tubular.

c) Tanque convencional en sus aristas se generan zonas de agua estancada. d) Electrocoagulador de tanque tubular no se presenta zonas de estancamiento.



Diseño (a)

Diseño (b)

Figura 15. Líneas de flujo y zonas de estancamiento.

Los electrodos móviles durante su movimiento generan un flujo de agua circular. Si consideramos que el flujo es laminar podemos estimar que las líneas de flujo generado en los diseños (a) y (b) difieren por lo siguiente: en el diseño (a) modelo convencional en los vértices del recipiente aparecen zonas estancadas, mientras que en el diseño (b) tipo tubular construido no existen tales zonas de estancamiento.

Selección del material del tanque reactor

Criterio.

El principal criterio considerado para la elección del material del tanque reactor fue considerar la naturaleza fisicoquímica de las aguas a tratar. Debido a que con frecuencia las aguas residuales tratadas por electrocoagulación son disoluciones electrolíticas de naturaleza corrosiva, resulta

importante que el tanque, las tapas y bridas se construyan con materiales resistentes a la corrosión, es decir de material acrílico.

El otro criterio considerado es el de seguridad, es decir que el material no sea conductor de la electricidad por el contrario debe ofrecer resistencia al paso de la electricidad, siendo ésta el otro criterio empleado para la selección de material acrílico.

Selección de la capacidad del tanque reactor:

Para la determinación de la capacidad del tanque reactor se consideró razonable el volumen empleado en la investigación de efluentes de una empresa de recubrimiento, donde emplearon diez litros (10 lt.) de agua, para su tratamiento por electrocoagulación evaluando los parámetros de Cr, Cr⁺⁶, Ni, Pb y Zn (Morales N. , 2010). Referencia tomada para definir un tanque reactor de 10 litros de capacidad. Teniendo el volumen se determinaron la altura y diámetro del tanque reactor.

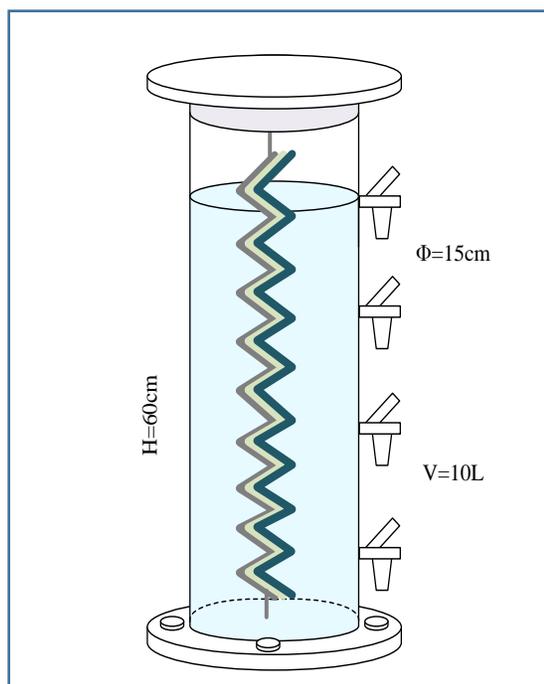


Figura 16. Capacidad y dimensiones del tanque reactor.

Se diseñó y construyó un tanque reactor de 15 cm. de diámetro, 60 cm. de longitud, de 10 litros de capacidad. Al que se le ha incorporado cuatro llaves para la toma de muestras.

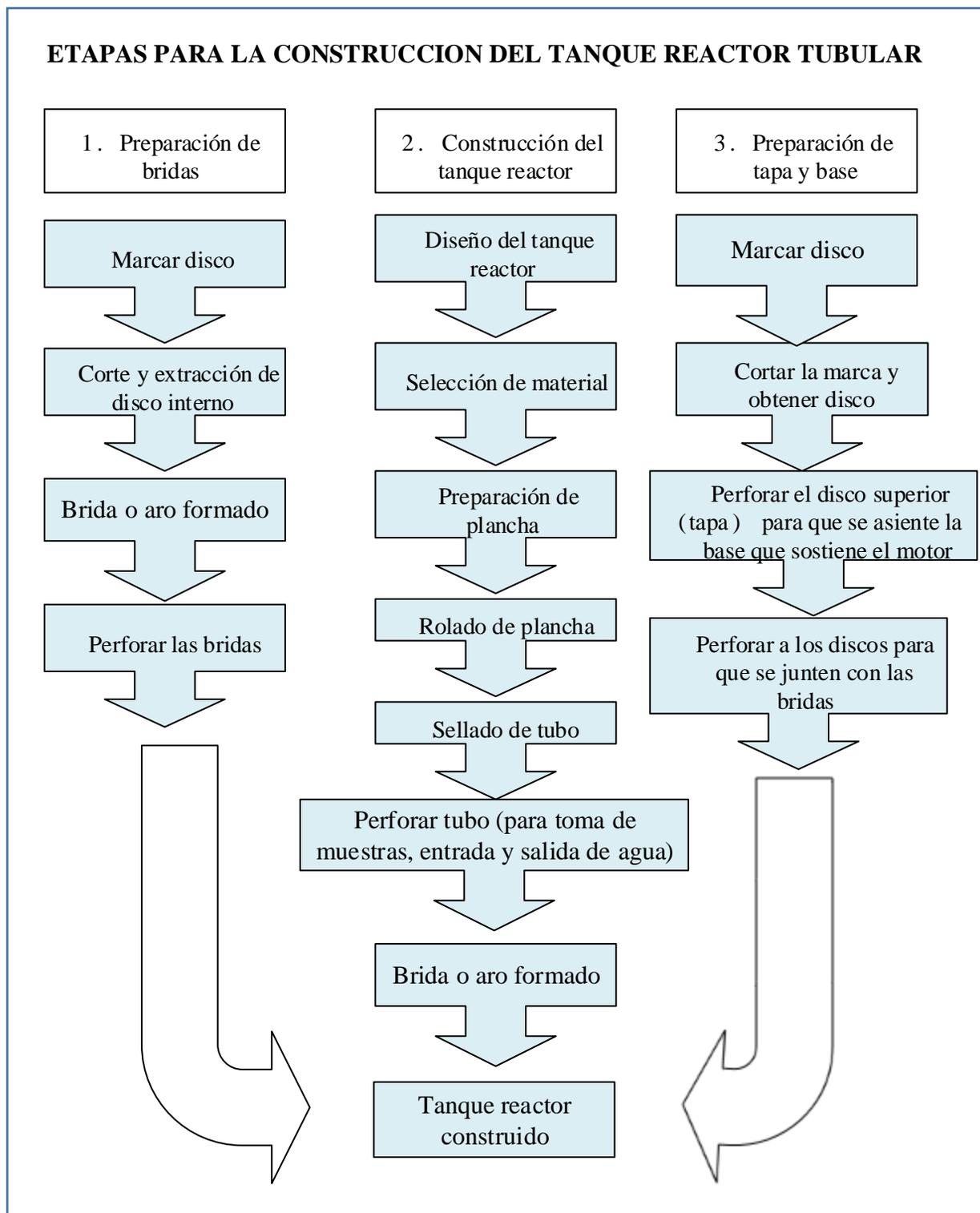


Figura 17. Etapas para la construcción del tanque reactor

Componentes del tanque reactor tubular construido

Un tubo de acrílico de 60 cm. De longitud, 20 cm. De diámetro externo y 5 mm. De espesor. Dos discos de acrílico de 5 mm. de espesor y 25 cm. De diámetro (Uno para la tapa superior y otro para la tapa inferior.). Dos bridas de acrílico de 5 mm. De espesor de 25 cm. de diámetro externo y 20 cm. de diámetro interno (uno para ajuste de la tapa superior y otro para ajuste de la tapa inferior). Una empaquetadura de teflón de 20 cm. de diámetro y 10 mm. de espesor. Cuatro llaves de plástico (caño).

Construcción:

Para la construcción del tanque reactor seguir el procedimiento mostradas en la figura anterior.

1. Preparar una plancha de acrílico de 20x60 cm. de 5 mm. de espesor.
2. Rolar la plancha hasta obtener un tubo de 20 cm. de diámetro.
3. Unir la junta (costura) del tubo, colocar silicona sobre la costura y sellar la junta con una platina de acrílico de extremo a extremo empleando formol para juntar y disolver el acrílico.
4. Perforar cuatro orificios a lo largo del tubo con una separación de 12 cm.
5. Perforar la base del recipiente con un orificio de 1/2 pulg. A través de este orificio se descargará el líquido del recipiente.
6. Instalar un sistema de drenaje de agua a través del orificio de la base.

Para esto se ha instalado un tubo con control de descarga siendo necesario nipes, uniones, acoples, codos y llaves de globo de 1/2 pulg. de diámetro.
7. Colocar una de las bridas en la parte inferior del recipiente, esta brida debe tener ocho perforaciones, cuatro para sostener al equipo sobre la mesa y cuatro para reforzar la unión entre la brida y la base del recipiente.

Colocar la otra brida en la parte superior del recipiente, con cuatro orificios los que a través de esta se ajusta y acopla a la tapa del recipiente. Las bridas se sellan al recipiente con una solución de formol el que disuelve al acrílico.

- Colocar la tapa y base de acrílico al recipiente. La tapa de 5 mm. de espesor, debe tener cuatro perforaciones los que deben coincidir con los orificios de la brida superior.

La base es un disco de 5 mm. de espesor, con ocho perforaciones los que deben coincidir con los orificios de la brida inferior y los orificios de la mesa para su ajuste del equipo.

- Colocar pernos con tuercas de ajuste tipo mariposa para sujetar los extremos del recipiente de modo que estos permitan que la tapa y la base queden fijos al recipiente.
- Colocar en cada uno de los cuatro orificios laterales del recipiente una llave de plástico para la toma de muestras durante el ensayo.
- Estas llaves deben estar bien selladas y no presentar pérdidas o fuga de líquido.

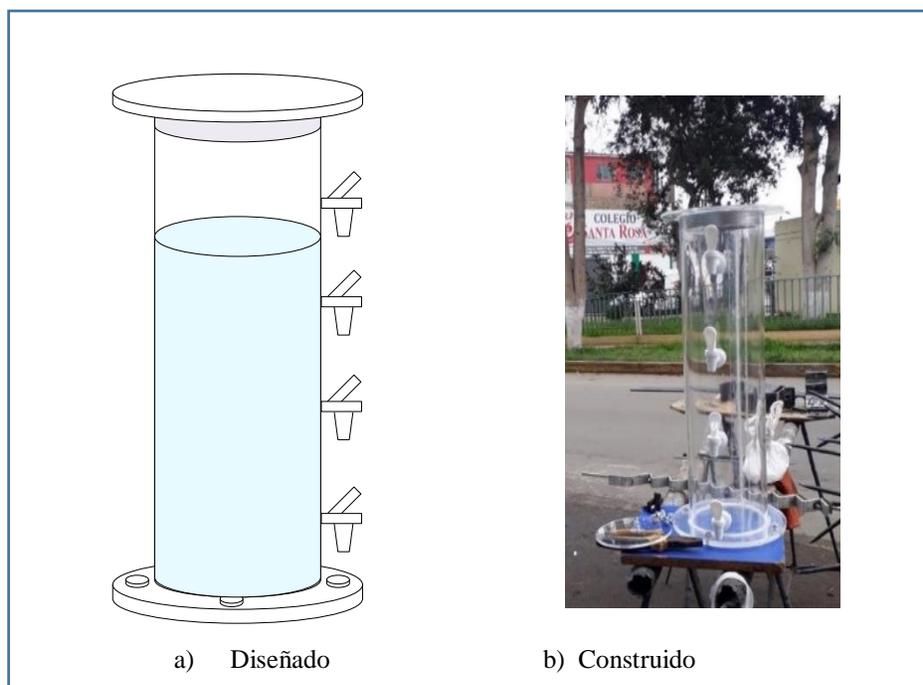


Figura 18. Tanque reactor tubular

Conexiones

Debido a que se realizan conexiones eléctricas de la fuente de poder a los electrodos, del transformador a la placa de velocidad entre otros y se emplean términos que podrían confundir al lector, como electrodos, polos, cables de conexión, color del cable de conexión, cátodo, ánodo, etc. Para lo cual se ha elaborado la siguiente tabla para su entendimiento y comprensión.

Tabla 2

Electrodos, características y color de los cables de conexión

CLASES DE ELECTRODO	CARACTERISTICAS			
	Es el electrodo que se conecta al:	Es el electrodo donde ocurre la semi reacción de:	Es el electrodo donde ocurre la:	Se conecta con cable de color:
CATODO →	Polo (-) de la fuente	Reducción	Ganancia de electrones	Negro
ANODO →	Polo (+) de la fuente	Oxidación	Pérdida de electrones	Rojo

Instructivo para el uso de la tabla 2:

Primero, en la columna inicial se elige el tipo de electrodo que se desea conocer sus características y el color de cable que se debe emplear para su respectiva conexión ya sea a la fuente, al motor o a la placa electrónica que controla la velocidad de giro.

Segundo, en las siguientes columnas de la derecha leer las características y color de cable antes mencionadas.

Por ejemplo si en la primera columna eligió cátodo, entonces de la segunda columna se establece que dicho cátodo se conecta al polo negativo de la fuente, de la tercera columna en dicho electrodo ocurre la semirreacción de reducción, con una ganancia de electrones y para las conexiones respectivas del cátodo se debe emplear un cable de color negro.

Etapa 3: Ubicación de los puntos de contactos entre los electrodos con los polos positivo (+) y polo negativo (-) de la fuente de poder

No fue fácil ubicar los puntos de contacto de la fuente de corriente continua con los electrodos debido a que los electrodos giran, resultando tedioso la conexión del polo positivo (+) y polo negativo (-) de la corriente proveniente de la fuente de poder a los electrodos.

Para este fin se desarrolló un sistema único de contacto entre los polos de la fuente de poder y los electrodos, el que se describe:

1. Contacto del polo negativo (-) de la fuente de poder al cátodo del electrodo (PC_1):

El cátodo posee dos ejes uno superior y otro inferior, el inferior sirve de apoyo a la base y el superior sirve de acople al eje del motor, además ahí se decidió colocar el punto de contacto entre el cátodo y el polo negativo (-) de la fuente de poder (PC_1), mediante un cable de color negro.

Como el eje gira y la conexión no tiene que ser fija es decir debe permitir el contacto y el giro del eje, para este propósito en el extremo final del polo negativo cable negro se instala un porta carbón el que contiene una pastilla de carbón quien hace contacto con el eje. El porta carbón se instala en una posición fija el que le dará estabilidad y contacto permanente mientras el eje gira (Figura 12).

La dureza del carbón asegura su tiempo de vida útil, de modo que la duración del punto de contacto está asegurada, el eje del cátodo no se gasta por fricción, consumiéndose el carbón el que es de fácil reemplazo.

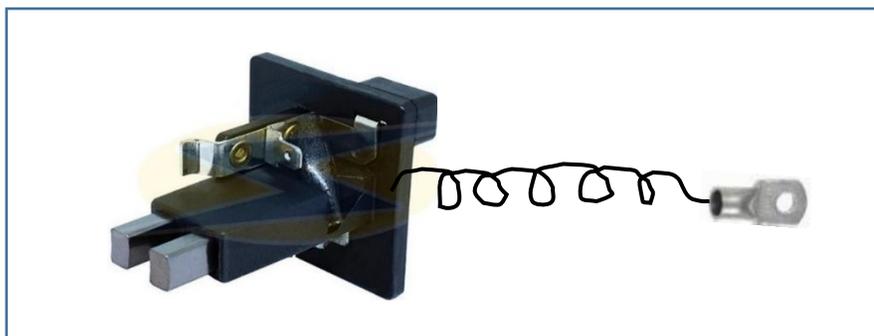


Figura 19. Porta carbón

Dispositivos que permite establecer el contacto eléctrico entre la fuente de poder y los electrodos (cátodo y ánodo), de modo que el equipo construido contiene dos porta carbonos.

2. Contacto del polo positivo (+) de la fuente de poder al ánodo del electrodo (PC₂):

Este caso es más complicado ubicar y colocar el punto de contacto porque el electrodo (+) o ánodo no gira sobre su eje, no tiene eje, está sujeta al electrodo y su giro genera un espacio cilíndrico.

Para este propósito se alargó el extremo superior del electrodo (+), y se le dotó de una geometría especial para que dicho extremo gire desarrollando un círculo de lo más próximo a la pared del tanque reactor.

Seguidamente se preparó una platina metálica de acero circular y se roló hasta conseguir un aro de diámetro externo igual al diámetro interno del tanque reactor el que se instaló y sujetó al tanque reactor mediante un perno pasante de ajuste.

El extremo exterior del perno pasante en contacto con el aro de acero sirve de punto de contacto (PC₂) donde se conecta el polo positivo (+) de la fuente de poder, mediante un cable de color rojo.

En el extremo superior alargado del electrodo (+) se instala y sujeta un porta carbón y dentro del porta carbón se coloca la pastilla de carbón. Dicho carbón gira haciendo contacto permanente con el aro. El aro recibe corriente (+) de la fuente de corriente continua mediante conexión de un cable rojo. El carbón reduce el consumo del aro por fricción asegurando su duración.

Etapa 4: Aislamiento entre los electrodos y aislamiento entre los electrodos y el motor.

1. Aislamiento de los electrodos

Se debe tener mucho cuidado con aislar los electrodos, para evitar corto circuitos en el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles, ya que estos se mantienen como una unidad compacta que giran y están separados a una distancia de 5mm. Para lograr dicho aislamiento se ha realizado lo siguiente:

1. Se ubican tres puntos proporcionales a lo largo de los electrodos, se perforan las tres marcas.
2. Se coloca una placa perforada muy pequeña de bakelita o teflón de 5 mm. de espesor en cada punto. Esta le dará la distancia de separación entre los electrodos.
3. Se remachan los electrodos en los tres puntos para lo cual los remaches han sido previamente aislados.

(También podemos aislar mediante pernos de sujeción para lo cual en lugar de remachar se pasa una manguerita de plástico por los orificios y luego se pasan los pernos, quedando aislado. Las tuercas permiten realizar el ajuste necesario de electrodos).

De esta manera se aíslan los electrodos.

2. Aislamiento de los electrodos con el eje del motor

Debido a que el eje del motor debe conectarse al eje de los electrodos para transmitir el giro, es necesario aislar el posible contacto entre ambos ejes para su protección, puesto que ambos ejes trabajan con diferentes voltajes, así el motor trabaja con corriente continua de 24 voltios, y los electrodos trabajan también con corriente continua de la fuente de poder pero a diferentes voltajes de ensayo establecido (3V, 6V, y 9V). Por esta razón es necesario aislar el contacto entre ambos ejes del motor con el eje de los electrodos. De lo contrario se generaría sobre tensión en el motor y quedaría afectado. Para tal fin se ha construido un acople de metal a partir de una barra metálica cilíndrica el cual ha sido perforado por los extremos según el diámetro de los ejes tanto del motor como el eje de los electrodos, la parte interior del acople se ha aislado lateralmente. El eje del motor se sujeta al acople mediante un pasador y el eje de los electrodos se sujetan con una abrazadera. Para asegurar aislamiento entre las puntas de los ejes se ha plastificado selladores y colocado un separador de teflón. De esta manera se logra un adecuado aislamiento entre los electrodos y el eje del motor.

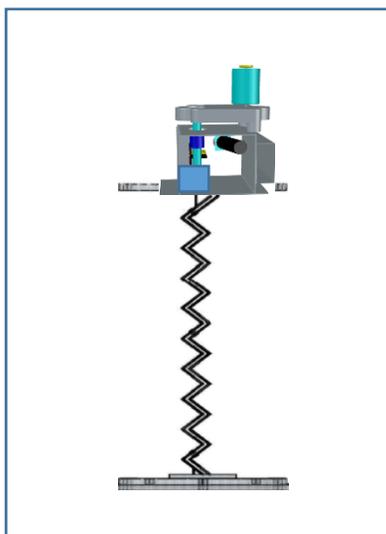


Figura 20. Electrodo aislado con acople para eje del motor

Etapa 5: Selección del motor para el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles

Paso 1. Criterio de selección:

El primer criterio fue el de seguridad. Así el motor genera el giro de los electrodos y debido a que trabajamos con agua es conveniente que sea un motor de corriente continua y no de corriente alterna. El segundo criterio importante para la selección del motor es la potencia, puesto que debe tener la fuerza suficiente para hacer girar los 600 gramos de electrodos y vencer la inercia de los 8 kilogramos de agua contenido en el reactor. Un tercer criterio considerado fue el tiempo de operación del equipo, siendo necesario contar con un motor que trabaje un mínimo de 48 horas continuas sin recalentar de lo contrario se quema y podría ocasionar incendio y frustrar los ensayos, que es lo menos deseado. Así probamos con varios motores, hasta lograr uno óptimo que garantice nuestras expectativas cuyas especificaciones son:

Motor de corriente continua (DC)

Marca: ASAHI SEIKO CO. LID.

Fuente: 24 volts.

Potencia: 150 watts.

Velocidad de giro nominal: 140 rpm.



Figura 21. Motor para el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles

Según lo especificado por el fabricante el motor debe trabajar con una fuente de 24 voltios de tensión. Sin embargo se conecta a la fuente de corriente alterna de 220 voltios, para lo cual previamente se ha incorporado un transformador o convertidor de corriente alterna en corriente continua (transformador AC \rightarrow DC), paso que se describe a continuación.

Paso 2. Selección del convertidor de AC a AD:

Se instalado un convertidor de corriente alterna en corriente continua (transformador AC a AD) tipo canastilla de 15 Amperios para una mayor seguridad de operación del motor. El transformador tiene dos zonas de corriente, una de entrada de corriente y otra de salida de corriente.

En la zona de entrada se conecta directamente la línea de corriente alterna (AC) de 220 volts, mediante dos líneas (L_1) y (L_2) y el convertidor transforma dicha corriente alterna en corriente continua (DC), en la zona de salida de corriente continua salen dos líneas o polos, un polo positivo (+) y otro polo negativo (-), los que se conectan directamente al motor manteniendo según su polaridad. Es decir, el mediante un cable negro se conectan los polos negativos (-) del convertidor al motor y con un cable rojo se conectan los polos positivos (+) del motor con el convertidor.



Figura 22. Convertidor de corriente alterna (AC) a corriente continua (DC).

Este dispositivo permite que el motor de corriente continua pueda funcionar con la corriente de 220V.

Etapa 6: Diseño y fabricación del selector de velocidad

Diseño de la placa

El dispositivo electrónico diseñado y construido para nuestro propósito, consta de una placa electrónica, este circuito tiene la capacidad de modificar la velocidad de giro del eje del motor, mediante un selector de velocidad manipulado por una perilla de regulación de velocidades; habiendo sido programado para seleccionar once (11) velocidades de giro del eje del motor. Este dispositivo electrónico permite visualizar once puntos luminosos de color azul y a cada punto le corresponde un nivel de velocidad de giro del eje.

La placa electrónica posee dos cables de salida uno positivo (+) y otro negativo (-) los que se conectan al motor mediante dos cables manteniendo la polaridad uno positivo y otro negativo, a los que en sus extremos se ha colocado un terminal especial para evitar la confusión de polaridad.

Conectar a la placa los cables positivo y negativo de la fuente de corriente continua.

La placa está conectada al selector de velocidad (perilla de control de velocidad) pudiendo seleccionar la velocidad de giro del eje del motor, según lo deseado.

La potencia del motor del equipo de electrocoagulación construido es de 150 watts. Debido al enorme torque y la inercia de los 600 gramos de electrodos más los 8 kilos de agua, los electrodos no giran en las posiciones 1, 2 y 3, recién lo hace a partir del nivel de velocidad 4 (15 rpm).

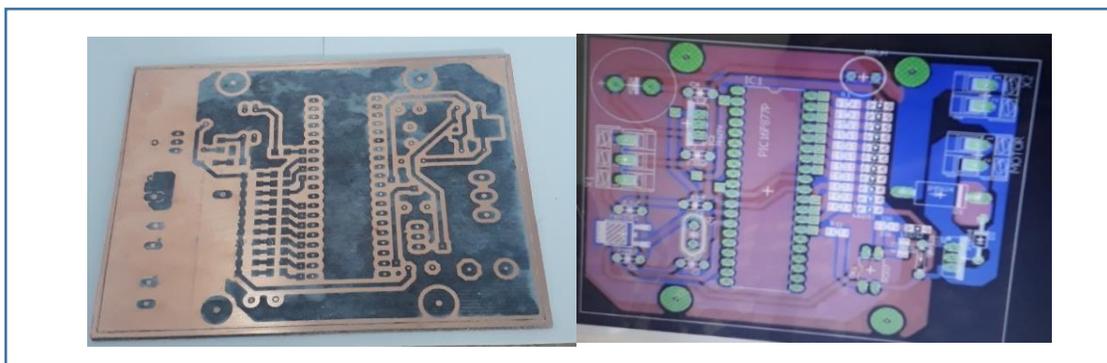


Figura 23. Diseño de la placa electrónica para el control de velocidad de giro del motor

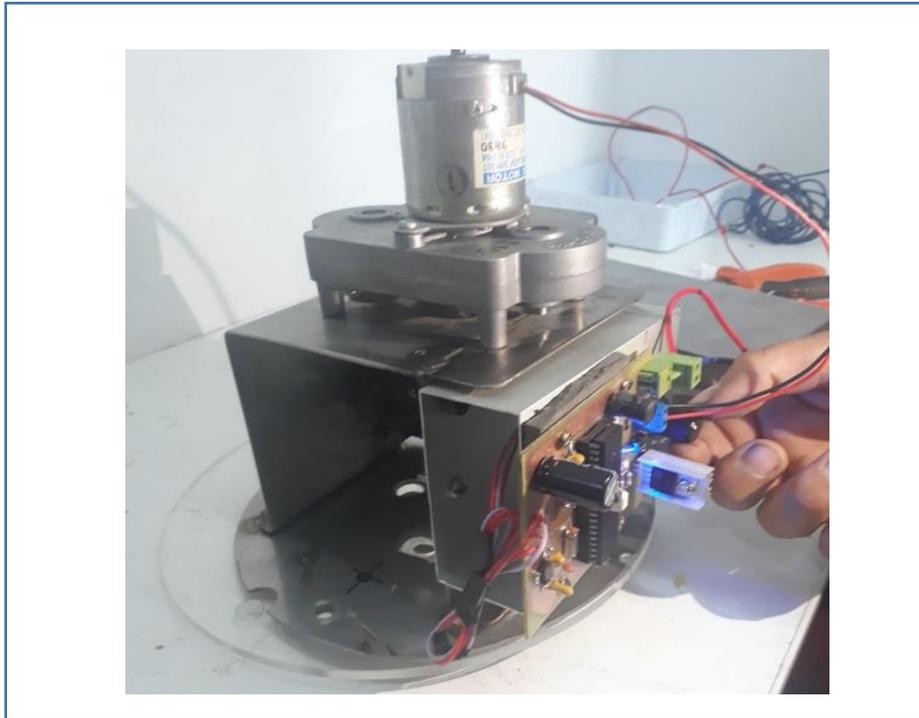


Figura 24. Placa electrónica y regulador de velocidad instalada al motor

Diseño y montaje del velocímetro digital

Se incorpora un velocímetro digital al equipo de electrocoagulación (EEC)

Este dispositivo contiene:

1. Una tarjeta de memoria digital cuyo circuito electrónico traduce la señal y reporta la velocidad en un panel digital de lectura.
2. Un sensor que emite una señal sobre el eje que gira, al cual se le coloca un elemento que pueda ser detectado al pasar por el sensor.

Se recomienda que el sensor este bien instalado, a fin de no reducir la distancia de aproximación al eje, de superar los 5 mm. puede afectar la precisión de la lectura.

Etapa 7: Elección de componentes complementarios

Fuente de poder:

El modulo cuenta con una fuente de poder marca ASEK PREMIUN PRP-3705 con rango de 0-32V y 0-5A. Esta fuente posee doble salida.

La fuente de poder se conecta directamente a la fuente de corriente alterna (AC) de 220 voltios, sin embargo este dispositivo contiene internamente un transformador de corriente alterna (AC) en corriente continua (DC), del dispositivo salen dos polos, uno positivo (+) y otro negativo (-) los que se conectan con cables a los electrodos en los puntos de contacto establecido. Así al punto contacto (PC₁) eje del electrodo de acero (-) y al punto de contacto (PC₂) (+) al perno saliente unido al aro metálico interno del tubo.

Especificaciones de la fuente de poder:

Voltaje de entrada 110 V y 220 V de corriente alterna (AC)

Voltaje de salida 0 a 32 V de corriente continua (DC)

Intensidad de corriente: 0 – 5 A.

Cantidad de salidas: doble salida de Voltaje de corriente continua

Display de led digital.

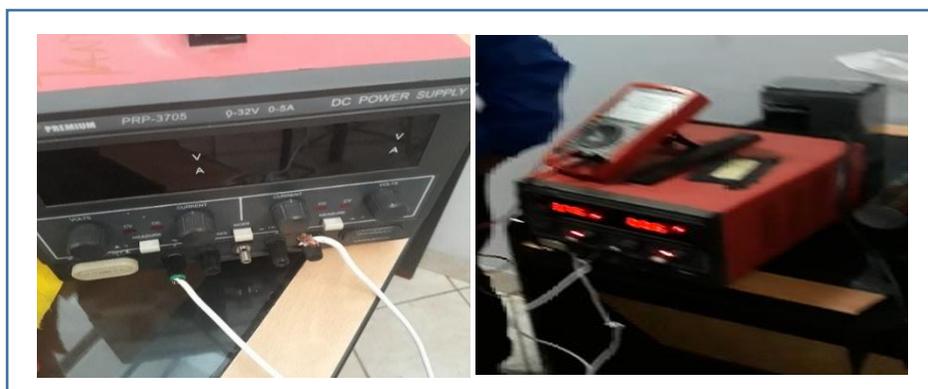


Figura 25. Fuente de poder de doble alimentación

Rectificador

El rectificador, es un transformador que es necesario incorporar al módulo de electrocoagulación, puesto que el motor funciona con corriente continua (DC) y bajo voltaje. Por lo tanto, es necesario incorporar el rectificador para que este dispositivo se conecte directamente a la línea de corriente alterna (AC) y lo transforma a corriente continua (DC), se conecte al motor.

Etapa 8: Montaje y puesta en marcha del equipo de electrocoagulación construido

1: Montaje del equipo de electrocoagulación con electrodos móviles.

En esta etapa se colocan cada uno de los componentes del equipo en sus respectivas posiciones de manera que el equipo presente estabilidad y funcione sin alabeo. Para esto es importante un buen alineamiento de los electrodos con eje del motor y buena sujeción del tanque reactor con la mesa.

2: Operación del equipo de electrocoagulación.

Una vez armado el equipo de electrocoagulación, antes de ponerlo en funcionamiento verificar:

- ✓ Que el sistema mantenga una buena estabilidad, en especial el reactor.
- ✓ Que no exista fuga del líquido por las llaves de toma de muestra.
- ✓ Que no exista fuga del líquido por la base ni por la unión lateral del reactor.
- ✓ Que no exista cortocircuito en los electrodos.
- ✓ Que no exista cortocircuito entre el eje del electrodo con el eje del motor.
- ✓ Que las conexiones mantengan la polaridad correspondiente.
- ✓ Que las bridas estén bien selladas al tanque reactor.
- ✓ Que el motor tenga buen torque y la potencia necesaria para romper la inercia de los electrodos y la inercia del volumen de agua contenida en reactor.

- ✓ Que el motor tenga la potencia necesaria para mantener en movimiento de los electrodos de manera continua y funcionar varios días continuos.

De manifestarse alguna situación inesperada antes indicada, debe solucionarse el problema y realizar el ajuste final. Probado y superado todas estas situaciones críticas el equipo está listo para encenderlo y ser empleado en el tratamiento de las aguas de pozo.

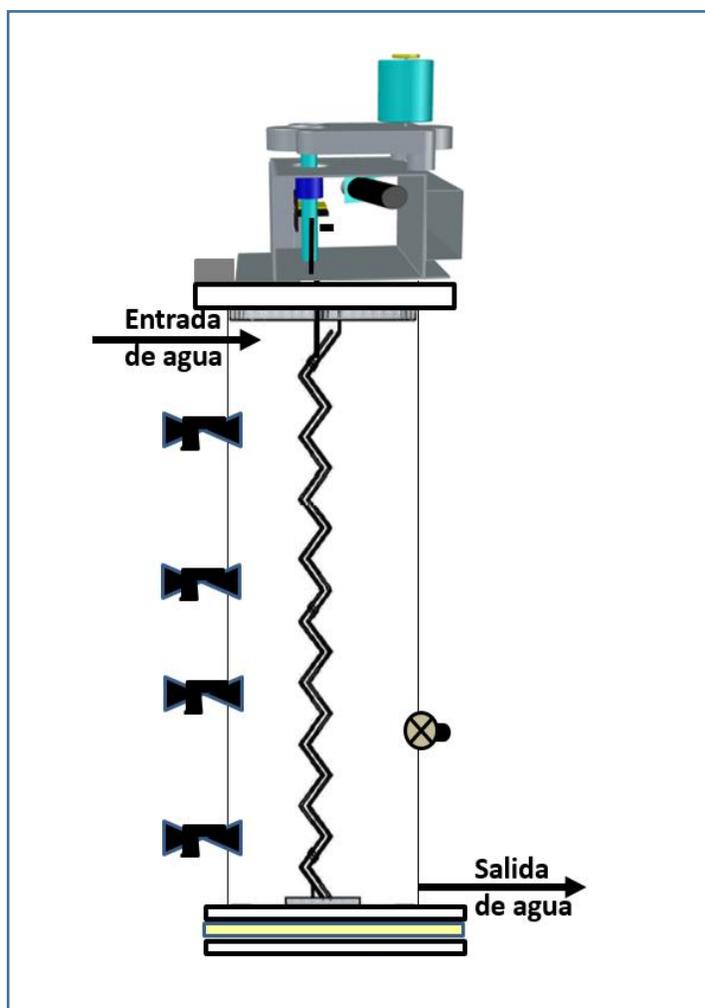


Figura 26. Equipo de electrocoagulación con electrodos móviles.

Al final de ejecutar todos los pasos anteriormente descritos en la fase I, se obtuvo el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles en forma de zigzag con reactor tubular

2da FASE: Selección, toma de muestra y transporte de aguas de pozo para ensayos.

Etapa 1: Determinación de los lugares de ubicación de los pozos de agua.

Por referencias e indagaciones los lugares donde existe mayor uso de pozos son los centros poblados ubicados en la franja costera del norte y sur del país. Por ello fuimos a los Centros Poblados de Cañete, los Centros poblados de Imperial, Nuevo Imperial, Pachacamac, Lurín, Puente Piedra, Ate. Donde se realizaron mediciones de la conductividad eléctrica (k), sólidos totales disueltos (STD) y el pH a las aguas de los veinte pozos, los que fueron anotados en la ficha de registro de datos de aguas de pozo.

Etapa 2: Selección de tres pozos de agua.

Luego se seleccionaron tres pozos de agua los de mayor conductividad. Ubicándose dos pozos en Lurín (P1, P2) y un pozo (P3) en Playa Hermosa (Cañete).

Etapa 3: Toma de muestra y acondicionamiento.

Se tomaron muestras de 24 litros de agua de cada pozo elegido, los que fueron colocados y acondicionados en botellones de plástico, rotulados para su identificación y sellados para evitar derrames.

Etapa 4: Traslado de las muestras de agua al laboratorio.

Las muestras de veinticuatro litros de agua de cada uno de los tres pozos fueron trasladadas en tres botellones al lugar de ensayo.

Etapa 5: Almacenamiento temporal de las muestras de aguas de pozos.

Temporalmente las aguas fueron almacenadas en botellones para su inmediato tratamiento.

OBTENCION DE LAS AGUAS DE POZO PARA LOS ENSAYOS

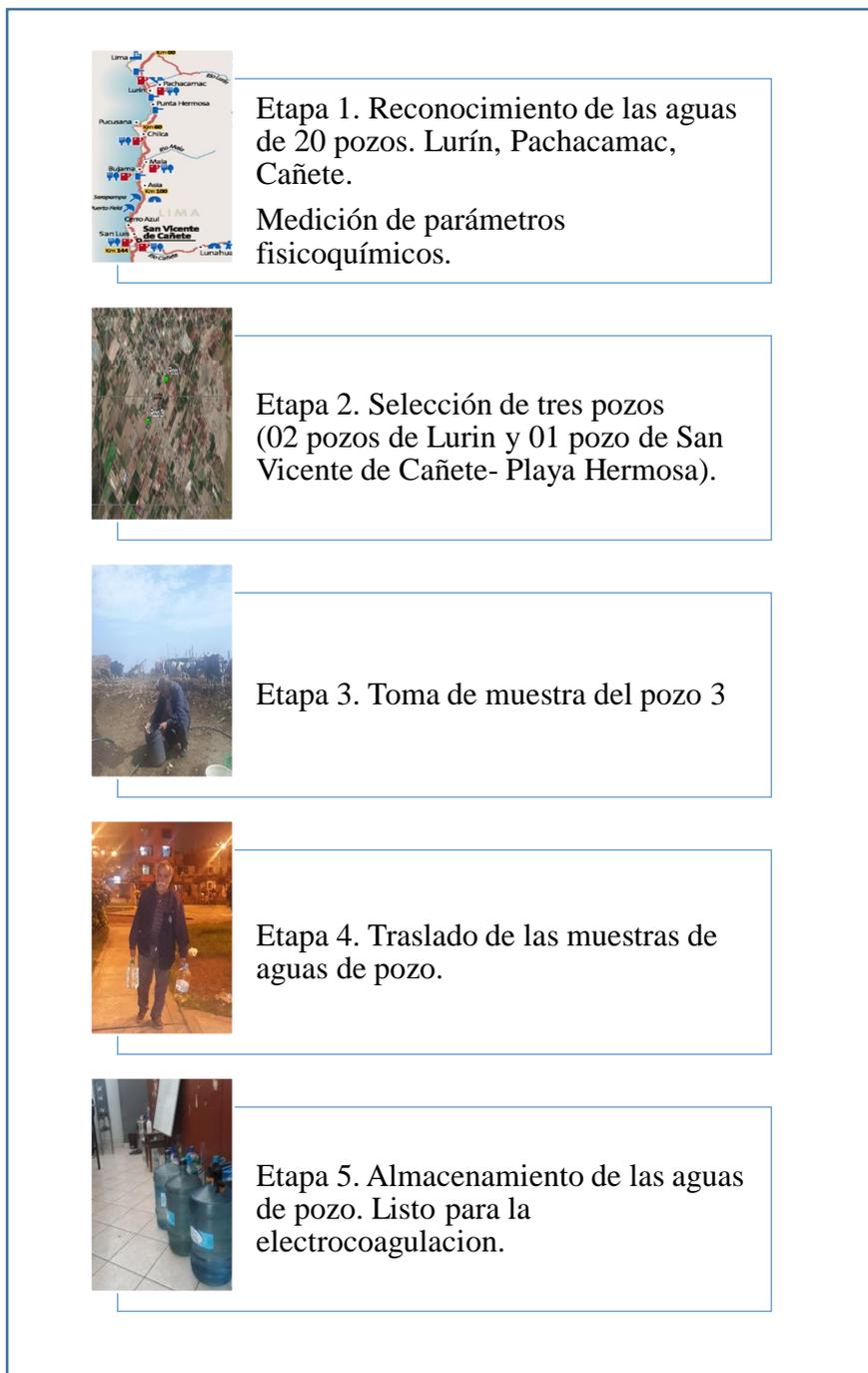


Figura 27. Etapas para la selección de muestras de aguas de pozo.

Etapa 6. Diseño experimental

Para la realización de los ensayos experimentales, se tuvo que definir la combinación de las variables independientes con las aguas de pozo, así se trabajó con tres niveles de voltaje (3, 6, 9 voltios) combinados con tres niveles de velocidad de giro de los electrodos (40, 90 y 140 RPM), para lo cual se aplicó el modelo Taguchi, de donde se obtuvo nueve combinaciones (9) entre el voltaje y la velocidad de giro de los electrodos con tres niveles cada uno, los que se reportan en la siguiente tabla:

Tabla 3
Arreglos de las variables independientes según Taguchi

N° DE ENSAYO	POZO (P _i)	VOLTAJE (Voltios)	VELOCIDAD (RPM)
1	P ₁	3V	40
2	P ₁	6V	90
3	P ₁	9V	140
4	P ₂	3V	90
5	P ₂	6V	140
6	P ₂	9V	40
7	P ₃	3V	140
8	P ₃	6V	40
9	P ₃	9V	90

El modelo Taguchi ha sido adaptado para la presente investigación, determinándose que solo es necesario realizar nueve ensayos con las aguas de los tres pozos (P₁, P₂, P₃) y con las combinaciones de voltaje y velocidad de giro de los electrodos indicados para cada ensayo. Para definir el diseño experimental de esta investigación se ha tomado en cuenta el trabajo publicado por (Cruz, Medina, & Restrepo, 2007).

En cada ensayo se cargó al tanque reactor ocho litros de agua de pozo y antes de iniciar la electrocoagulación se midieron la conductividad (k), los sólidos totales disueltos (STD) y el potencial de hidrógeno del agua de pozo (pH).

ETAPAS PARA LA OBTENCION DE LAS MUESTRAS DE AGUAS DE POZO

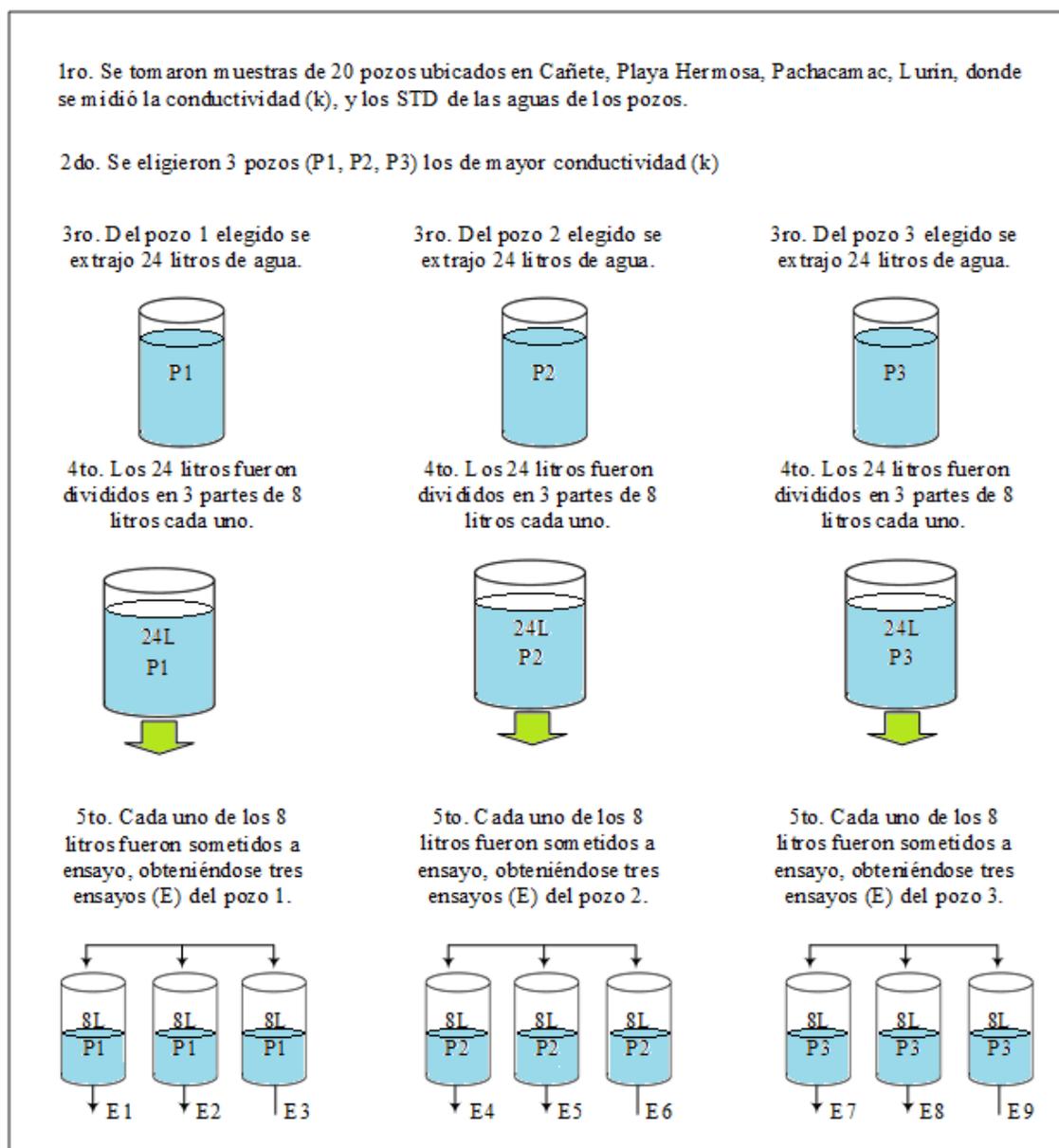


Figura 29. Procedimiento para la obtención de las muestras de agua para los ensayos

Etapa 2: Electrocoagulación de las aguas de pozo.

En esta etapa se desarrolló cada uno de los ensayos establecidos en el diseño experimental determinado aplicando Taguchi mostrados en la Tabla 3.

Ensayo número 1, una vez llenado los ocho litros de agua de pozo 1 al reactor se midieron la conductividad (k), los sólidos totales disueltos (STD) y el pH, del agua antes de la electrocoagulación.

Luego se seleccionaron los valores respectivos de voltaje (en la fuente de poder) y la velocidad de giro de los electrodos (en el selector de velocidad del motor) según lo establecido en el cuadro de diseño experimental. Para este ensayo los parámetros establecidos fueron: Agua de pozo uno (P1), voltaje de trabajo 3V, y velocidad de giro de los electrodos 40 RPM.

Una vez verificado todo lo anterior, y teniendo a la mano el cronómetro, los instrumentos de medición, vasos, se encienden la fuente de poder y el motor del equipo con la velocidad seleccionada y se procede a la electrocoagulación de la muestra de agua de pozo.

Durante el ensayo de electrocoagulación de la muestra de agua de pozo, se realizaron las mediciones de la conductividad (k), los sólidos totales disueltos (STD) y el pH, en función del tiempo transcurrido; para lo cual se retiraron simultáneamente por las tres llaves, muestras de aguas de pozo electrocoaguladas para su medición según los siguientes tiempos:

Medición cada 5 minutos (durante 20 minutos), luego.

Medición cada 10 minutos (durante 40 minutos), finalmente.

Medición cada 15 minutos (durante 60 minutos).

Los valores de las lecturas obtenidas de la conductividad (k), los sólidos totales disueltos (STD) y pH, fueron registrados en el formato de control de lecturas de parámetros de electrocoagulación.

Para cada uno de los ocho ensayos siguientes se repitieron la secuencia descrita.

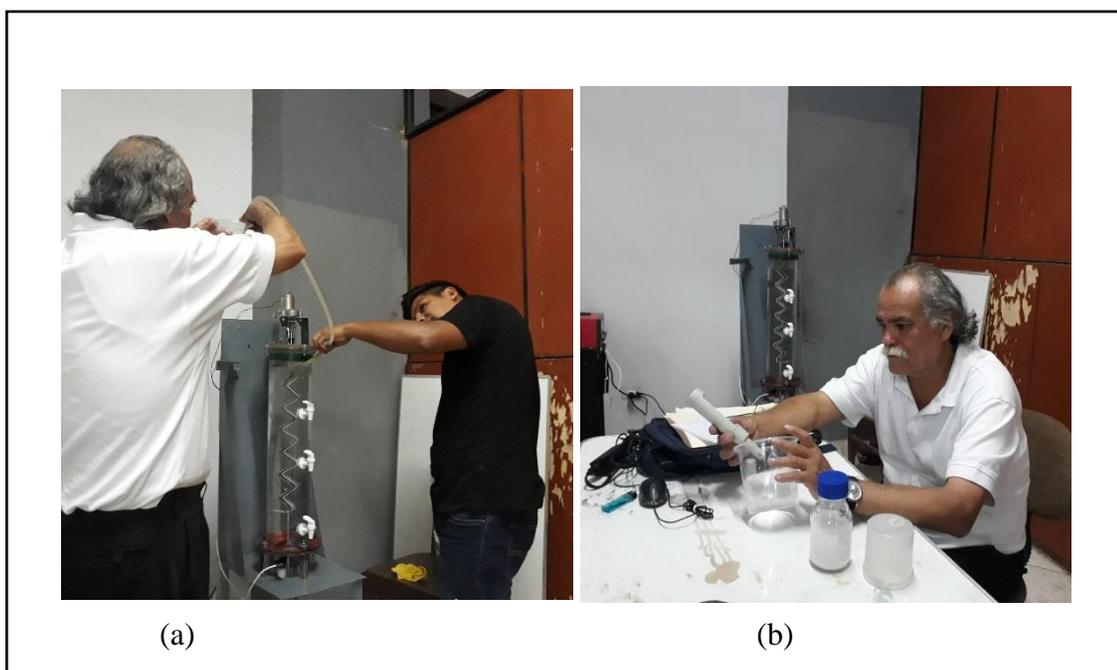


Figura 30. Funcionamiento del equipo de electrocoagulación – Etapa preliminar

(a) Cargando agua de pozo. (b) midiendo los parámetros del agua de pozo

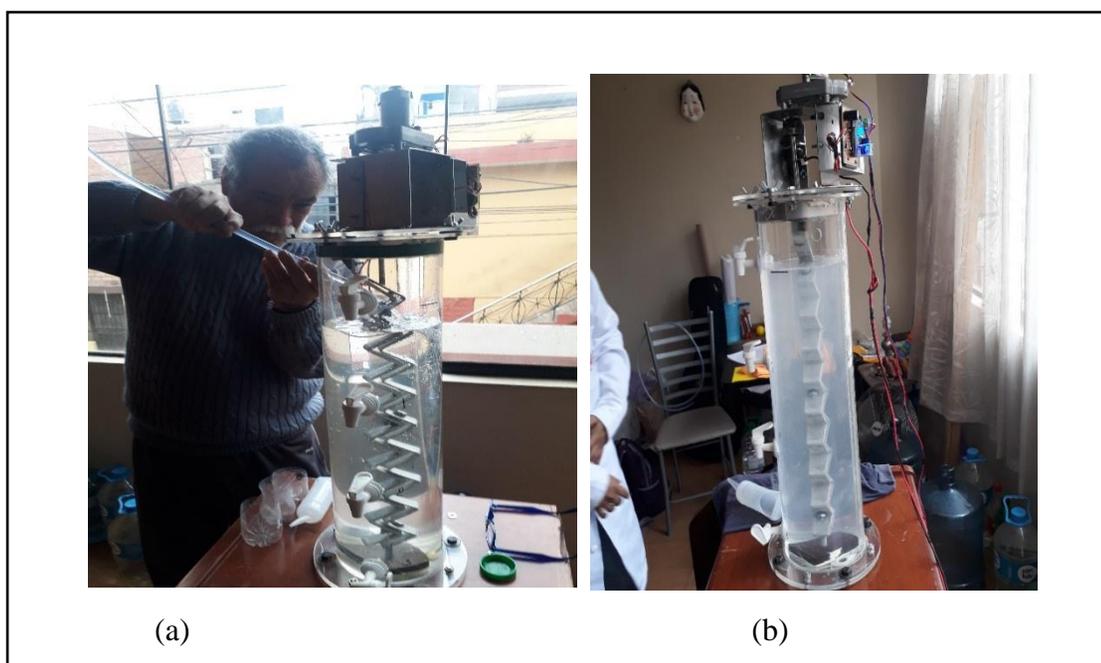


Figura 31. Equipo de electrocoagulación con electrodos móviles – Etapa definitiva

(a) Cargando agua de pozo. (b) pruebas definitivas de electrocoagulación.

Etapa 3: Medición de la k, los STD y el pH, de las aguas de pozo al finalizar las dos horas de electrocoagulación.

3.7 Análisis de datos

Tabla 4

Ensayo 1: Pozo 1, Voltaje 3 voltios, Velocidad 40 rpm

PARAMETRO	Tiempo de electrocoagulación													Prom. Final
	Cada 5 minutos					Cada 10 minutos				Cada 15 minutos				
	0	5	10	15	20	30	40	50	60	75	90	105	120	
Conductividad (k)	3.14	3.123	3.09	3.083	3.077	3.073	3.067	3.063	3.057	3.05	3.037	3.033	3.027	3.066
pH	7.80	7.8	7.67	7.72	7.71	7.7	7.68	7.6	7.6	7.533	7.533	7.533	7.5	7.639
Solidos Totales Disueltos (STD).	1.57	1.56	1.55	1.537	1.52	1.51	1.507	1.49	1.468	1.44	1.419	1.413	1.41	1.474

Tabla 5

Ensayo 2: Pozo 1, Voltaje 6 voltios, Velocidad 90 rpm

PARAMETRO	Tiempo de electrocoagulación													Prom. Final
	Cada 5 minutos					Cada 10 minutos				Cada 15 minutos				
	0	5	10	15	20	30	40	50	60	75	90	105	120	
Conductividad (k)	3.14	3.073	3.067	3.057	3.053	3.047	3.04	3.027	3.017	3.01	3	3	2.99	3.032
pH	7.80	7.733	7.7	7.7	7.6	7.6	7.6	7.567	7.5	7.5	7.433	7.433	7.433	7.566
Solidos Totales Disueltos (STD)	1.57	1.533	1.527	1.527	1.523	1.52	1.518	1.51	1.509	1.503	1.5	1.5	1.5	1.514

Tabla 6

Ensayo 3: Pozo 1, Voltaje 9 voltios, Velocidad 140 rpm

PARAMETRO	Tiempo de electrocoagulación													Prom. Final
	Cada 5 minutos					Cada 10 minutos				Cada 15 minutos				
	0	5	10	15	20	30	40	50	60	75	90	105	120	
Conductividad (k)	3.14	3.053	3.047	3.04	3.027	3.011	3.004	2.977	2.96	2.94	2.91	2.883	2.86	2.976
pH	7.80	7.7	7.6	7.6	7.6	7.533	7.5	7.467	7.4	7.4	7.33	7.267	7.33	7.478
Solidos Totales Disueltos (STD)	1.57	1.527	1.523	1.52	1.51	1.507	1.5	1.49	1.48	1.47	1.457	1.44	1.43	1.488

Tabla 7
Ensayo 4: Pozo 2, Voltaje 3 voltios, Velocidad 90 rpm

PARAMETRO	Tiempo de electrocoagulación													Prom.Final
	Cada 5 minutos					Cada 10 minutos				Cada 15 minutos				
	0	5	10	15	20	30	40	50	60	75	90	105	120	
Conductividad (k)	4.83	4.804	4.802	4.8	4.799	4.797	4.79	4.79	4.787	4.783	4.773	4.763	4.763	4.787
pH	7.80	7.778	7.67	7.768	7.766	7.782	7.78	7.76	7.733	7.7	7.7	7.68	7.667	7.747
Solidos Totales Disueltos (STD)	2.46	2.453	2.45	2.44	2.42	2.406	2.399	2.398	2.395	2.392	2.39	2.387	2.39	2.389

Tabla 8
Ensayo 5: Pozo 2, Voltaje 6 voltios, Velocidad 140 rpm

PARAMETRO	Tiempo de electrocoagulación													Prom. Final
	Cada 5 minutos					Cada 10 minutos				Cada 15 minutos				
	0	5	10	15	20	30	40	50	60	75	90	105	120	
Conductividad (k)	4.83	4.807	4.753	4.717	4.653	4.647	4.613	4.57	4.563	4.499	4.5	4.493	4.477	4.608
pH	7.80	7.733	7.7	7.633	7.533	7.533	7.48	7.433	7.4	7.367	7.3	7.3	7.323	7.467
Solidos Totales Disueltos (STD)	2.46	2.387	2.38	2.357	2.34	2.33	2.33	2.327	2.317	2.3	2.263	2.25	2.223	2.317

Tabla 9
Ensayo 6: Pozo 2, Voltaje 9 voltios, Velocidad 40 rpm

PARAMETRO	Tiempo de electrocoagulación													Prom. Final
	Cada 5 minutos					Cada 10 minutos				Cada 15 minutos				
	0	5	10	15	20	30	40	50	60	75	90	105	120	
Conductividad (k)	4.83	4.78	4.777	4.76	4.76	4.737	4.713	4.703	4.667	4.647	4.62	4.587	4.557	4.692
pH	7.80	7.8	7.7	7.7	7.6	7.5	7.4	7.3	7.3	7.2	7.2	7.1	7	7.4
Solidos Totales Disueltos (STD)	2.46	2.39	2.39	2.38	2.38	2.367	2.353	2.35	2.35	2.327	2.31	2.297	2.28	2.346

Tabla 10

Ensayo 7: Pozo 3, Voltaje 3 voltios, Velocidad 140 rpm

PARAMETRO	Tiempo de electrocoagulación													Prom. Final
	Cada 5 minutos					Cada 10 minutos				Cada 15 minutos				
	0	5	10	15	20	30	40	50	60	75	90	105	120	
Conductividad (k)	6.05	6.038	6.025	6.022	6.02	6.019	6.017	6.013	6.01	6.003	5.99	5.983	5.983	6.008
pH	7.70	7.633	7.567	7.533	7.5	7.467	7.433	7.4	7.3	7.3	7.2	7.2	7.1	7.386
Solidos Totales Disueltos (STD)	3.01	3.01	3.007	3.007	3.007	3.007	3.007	3.006	3.005	3.003	3	2.994	2.987	3.004

Tabla 11

Ensayo 8: Pozo 3, Voltaje 6 voltios, Velocidad 40 rpm

PARAMETRO	Tiempo de electrocoagulación													Prom. Final
	Cada 5 minutos					Cada 10 minutos				Cada 15 minutos				
	0	5	10	15	20	30	40	50	60	75	90	105	120	
Conductividad (k)	6.05	6	5.998	5.993	5.99	5.993	5.993	5.989	5.987	5.98	5.978	5.97	5.953	5.985
pH	7.60	7.6	7.51	7.49	7.5	7.4	7.3	7.3	7.233	7.233	7.233	7.2	7.2	7.344
Solidos Totales Disueltos (STD)	3.04	2.997	2.993	2.993	2.993	2.993	2.993	2.993	2.989	2.987	2.983	2.98	2.977	2.989

Tabla 12

Ensayo 9: Pozo 3, Voltaje 9 voltios, Velocidad 90 rpm

PARAMETRO	Tiempo de electrocoagulación													Prom. Final
	Cada 5 minutos					Cada 10 minutos				Cada 15 minutos				
	0	5	10	15	20	30	40	50	60	75	90	105	120	
Conductividad (k)	6.07	6.013	6.01	6.01	6.003	5.993	5.983	5.967	5.66	5.933	5.91	5.897	5.867	5.962
pH	7.70	7.567	7.433	7.4	7.333	7.233	7.233	7.133	7.133	7.067	6.967	6.967	7.033	7.208
Solidos Totales Disueltos (STD)	3.03	3.028	3.029	3.026	3.02	3	2.993	2.983	2.98	2.96	2.94	2.939	2.931	2.981

MATRIZ DE REGISTRO.

Con la información de la siguiente tabla se procedió a aplicar el desarrollo de las pruebas de contraste utilizando el SPSS.

Tabla 13

Matriz de registro de datos procesados antes y después de los ensayos

N°	ENSAYO	ANTES	DESPUES
1	Conductividad (mS)	3.14	3.066
2	Conductividad (mS)	3.14	3.032
3	Conductividad (mS)	3.14	2.976
4	Conductividad (mS)	4.83	4.787
5	Conductividad (mS)	4.83	4.608
6	Conductividad (mS)	4.83	4.692
7	Conductividad (mS)	6.05	6.008
8	Conductividad (mS)	6.05	5.985
9	Conductividad (mS)	6.05	5.962
1	pH	7.8	7.639
2	pH	7.8	7.566
3	pH	7.8	7.478
4	pH	7.8	7.747
5	pH	7.8	7.467
6	pH	7.8	7.4
7	pH	7.7	7.386
8	pH	7.7	7.344
9	pH	7.7	7.208
1	STD (mg/l)	1.57	1.474
2	STD (mg/l)	1.57	2.317
3	STD (mg/l)	1.57	1.488
4	STD (mg/l)	2.46	2.389
5	STD (mg/l)	2.46	2.317
6	STD (mg/l)	2.46	2.346
7	STD (mg/l)	3.01	3.004
8	STD (mg/l)	3.04	2.989
9	STD (mg/l)	3.03	2.981

IV. RESULTADOS

En este capítulo se contrastación las hipótesis aplicando las pruebas estadísticas correspondientes señalando los pasos con los que se han desarrollado cada prueba, finalmente el análisis respectivo y la interpretación de los resultados diversos.

4.1 Contrastación de hipótesis

Contrastación de la Hipótesis General:

Paso 1: Redacción de la hipótesis

Hipótesis del investigador:

“El equipo de electrocoagulación construido con electrodos móviles realiza eficientemente el tratamiento de las aguas de pozo”

Hipótesis de contraste:

H_0 : “No existe una diferencia significativa entre los parámetros del agua de pozo (conductividad, pH, STD) antes de su tratamiento por el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles y después de su tratamiento”

$$H_0 = X_0 \approx X_{t+1}$$

H_A : “Existe una diferencia significativa entre los parámetros del agua de pozo (conductividad, pH, STD) antes de su tratamiento por el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles y después de su tratamiento”

$$H_0 = X_0 \neq X_{t+1}$$

Paso 2: Determinar el nivel de significación $\alpha = 0.05$

Paso 3: Prueba estadística.

Se aplicará la prueba t-student para muestras relacionadas debido a que se va a contrastar una variable numérica recogida longitudinalmente en contraste contra dos medidas: antes y después

Paso 4: Corroborar los supuestos de:

4.1 Normalidad:

a. $p\text{-valor} \geq \alpha \rightarrow$ Aceptar H_0 : Los datos provienen de una distribución normal

b. $p\text{-valor} < \alpha \rightarrow$ Aceptar H_A : Los datos no provienen de una distribución normal

Tabla 14

Resumen de procesamiento de casos

	TRATAMIENTO DE AGUAS	Casos					
		Válido		Perdidos		Total	
		N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
MEDIA	ANTES	133	100,0%	0	0,0%	133	100,0%
	DESPUES	130	100,0%	0	0,0%	130	100,0%

La prueba se realizó en base al 100% de los datos, no existieron datos perdidos

Tabla 15

Pruebas de normalidad hipótesis general

COMPARACIÓN		Kolmogorov - Smirnov ^a			Shapiro - Wilk		
		ESTADÍSTICO	gl	Sig.	ESTADÍSTICO	gl	Sig.
MEDIA	ANTES	0.272	17	0.002	0.742	17	0.010**
	DESPUES	0.292	210	0			

** Esto es un límite superior de la significación verdadera

^a. Corrección de significación de Lilliefors

En este caso corresponde utilizar la prueba Shapiro Wilk siendo p-valor mayor al 5% por lo tanto se afirma que los datos tienen una distribución normal.

4.2 Igualdad de Varianzas:

a. $p\text{-valor} \geq \alpha \rightarrow$ Aceptar H_0 : las varianzas son iguales

b. $p\text{-valor} < \alpha \rightarrow$ Aceptar H_A : existen diferencias significativas entre las varianzas

Tabla 16
Prueba de homogeneidad de varianza

		Estadístico de Levene	gl ₁	gl ₂	Sig.
MEDIA	Se basa en la media	0.243	1	261	0.623
	Se basa en la mediana	0.105	1	261	0.746
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	0.105	1	258.371	0.746
	Se basa en la media recortada	0.449	1	261	0.504

El estadístico de Levene basado en la media nos muestra que p-valor (Sig) es mayor que alfa, por lo que se afirma que hay homogeneidad de la varianza.

Paso 5:

Pasada la prueba de normalidad e igualdad de varianzas procedemos a aplicar la prueba t-student:

Si $p\text{-valor} \leq \alpha \rightarrow$ Rechazar la H_0

Si $p\text{-valor} > \alpha \rightarrow$ Aceptar H_0

Tabla 17
Pruebas emparejadas

Diferencias emparejadas

			Desviación estándar	Media de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia		t	gl	Sig. (bilateral)
					Inferior	Superior			
Par 1	Media TRATAMIENTO DE AGUAS	4.44710	2.131058	0.13148	4.1882	4.706007	33.822	262	0.000

El resultado indica que p-valor (Sig) es menor que alfa, en consecuencia, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna es decir se prueba que existe una diferencia significativa entre los parámetros del agua de pozo (conductividad, pH, STD) antes de su tratamiento por el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles y después de su tratamiento, por lo tanto, se concluye que el equipo es eficaz en el tratamiento de aguas de pozo.

Contrastación de la Hipótesis específica N° 1

El equipo de electrocoagulación convencional presenta menor eficiencia debido a las siguientes consideraciones de diseño:

Respecto a la geometría de los electrodos:

Los electrodos convencionales son placas de geometría rectangular, en contraste con los electrodos del equipo diseñado que son de geometría longitudinal y en forma de zigzag, de modo que para una misma longitud “L” el diseñado posee mayor área por lo tanto existe mayor generación de especies iónicas coagulantes.

Respeto al movimiento de los electrodos:

Los electrodos en los sistemas de electrocoagulación convencional son estáticos, mientras que en el diseñado son móviles, de manera que al ser móviles las especies químicas generadas no se

concentran sobre la superficie contrariamente en los electrodos convencionales si la placa se satura de especies formadas, además si desearíamos mover los electrodos convencionales y los electrodos diseñado, se necesitaría un motor de mayor potencia que 150 watt que es la potencia del motor del equipo diseñado.

Sobre la forma del tanque reactor:

Los equipos de electrocoagulación convencionales son de geometría trapezoidal (cubas), de instalar en ella los electrodos de geometría longitudinal en zigzag, al girar produce movimiento de agua sobre su eje pero en las aristas o esquinas del trapecioide se generan zonas con agua estancada de modo que las partículas presentes en dicha zona retrasarían su coagulación y posterior sedimentación, en contraste surge el reactor diseñado de forma tubular que no se tiene dicho inconveniente, motivos por lo que el equipo construido supera al equipo convencional.

Sobre las muestras tomadas para las lecturas de los parámetros fisicoquímicos evaluados:

La medida de la conductividad del agua de pozo 1, electrocoagulada durante 40 minutos, aplicando tres voltios a los electrodos (3V), girando a 40 RPM, fue de 3.067 mS. Dicho valor fue obtenido de las lecturas de las muestras extraídas de los caños 1: 3.07; caño 2: 3.06; caño 3: 3.07. Obteniéndose la media $(3.07+3.06+3.07) / 3 = 3.067$ mS. Mientras que la muestra de agua del pozo 1 electrocoagulado en un equipo convencional de igual volumen, operando con tres voltios de diferencia de potencial, y al cabo de los 40 minutos la conductividad fue de 3.08mS.

Por todos los hechos y resultados argumentados el equipo de electrocoagulación tubular con electrodos móviles diseñado y construido supera al equipo tradicional de placas.

Contrastación de la Hipótesis específica N° 2:

Paso 1: Redacción de la hipótesis.

Hipótesis del investigador:

“El equipo de electrocoagulación con electrodos móviles realiza la remoción eficientemente la conductividad de las aguas de pozo”

H₀: “No existe una diferencia significativa entre los parámetros de la conductividad del agua de pozo antes de su tratamiento por el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles y después de su tratamiento”

$$H_0 = X_0 \approx X_{t+1}$$

H_A: “Existe diferencia significativa entre los parámetros de la conductividad del agua de pozo antes de su tratamiento por el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles y después de su tratamiento”

$$H_0 = X_0 \neq X_{t+1}$$

Paso 2: Determinar el nivel de significación $\alpha = 0.05$

Paso 3: Prueba estadística.

Se aplicará la prueba t–student para muestras relacionadas debido a que se va a contrastar una variable numérica recogida longitudinalmente en contraste contra dos medidas: antes y después

Paso 4: Corroborar los supuestos de:

4.1 Normalidad:

- a. p-valor $\geq \alpha \rightarrow$ Aceptar H₀: Los datos provienen de una distribución normal
- b. p-valor $< \alpha \rightarrow$ Aceptar H_A: Los datos no provienen de una distribución normal

Tabla 18
Resumen de procesamiento de casos

		Válido		CASOS PERDIDOS		TOTAL	
CONDUCTIVIDAD		N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
MEDIA	ANTES	9	100.0%	0	0.0%	9	100.0%
	DESPUES	9	100.0%	0	0.0%	9	100.0%

No hay datos perdidos, se ha trabajado todos los datos, indicando garantía de los resultados.

Tabla 19
Pruebas de normalidad hipótesis específica 1

		Kolmogorov - Smirnov			Shapiro - Wilk		
CONDUCTIVIDAD		Estadístico	gl	Sig. ^a	Estadístico	gl	Sig.
MEDIA	ANTES	0.221	9	0.200	0.816	9	0.031*
	DESPUES	0.212	9	0.200	0.839	9	0.057*

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

^a Corrección de significación de Lilliefors.

El resultado de la prueba Shapiro - Wilk indica que p-valor es mayor después de la prueba a alfa por lo tanto se deduce que los datos tienen una distribución normal.

3.2 Igualdad de Varianzas:

- p-valor $\geq \alpha \rightarrow$ Aceptar H_0 : las varianzas son iguales.
- p-valor $< \alpha \rightarrow$ Aceptar H_A : existen diferencias significativas entre las varianzas.

Tabla 20
Prueba de homogeneidad de varianza

		Estadístico de Levene	gl ₁	gl ₂	Sig.
MEDIA	Se basa en la media	0.000	1	16	0.983
	Se basa en la mediana	0.011	1	16	0.918
	Se basa en la mediana y con gl ajustado.	0.011	1	15.98	0.918
	Se basa en la media recortada	0	1	16	0.983

El estadístico de Levene basado en la media nos muestra que p-valor (Sig) es mayor que alfa, por lo que se afirma que hay homogeneidad de la varianza.

Cumpliendo los dos requisitos previos procedemos a presentar la prueba t-student

Paso 4: Prueba t-student

Si p-valor $\geq \alpha \rightarrow$ Rechazar la H_0

Si p-valor $> \alpha \rightarrow$ Aceptar H_0

Tabla 21
Estadística de muestras emparejadas

		Media	N	Desviación estándar	Media de error estándar
Par 1	MEDIA	4.62089	18	1.239106	0.292060
	CONDUCTIVIDAD	1.5000	18	0.51450	0.12127

De la tabla anterior se deduce que la prueba a considerado todos los datos (nueve ensayos antes y después) garantizando los resultados.

Tabla 22
Prueba de muestras emparejadas

		Diferencias emparejadas							
		Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia		t	gl	Sig. (bilateral)
					Inferior	Superior			
Par 1	Media-conductividad	3.120889	1.362211	0.321076	2.443477	3.798301	9.72	17	0.000

El resultado indica que p-valor (Sig) es menor que alfa, en consecuencia, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna es decir se prueba que existe una diferencia significativa entre los parámetros de conductividad antes de su tratamiento por el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles y después de su tratamiento, por lo tanto, se concluye que el equipo modifica eficientemente la conductividad de las aguas de pozo.

Contrastación de la Hipótesis específica N° 3

Paso 1: Redacción de la hipótesis

Hipótesis del investigador:

“El equipo de electrocoagulación con electrodos móviles realiza la remoción eficiente del pH de las aguas de pozo”

Hipótesis de contraste:

H₀: “No existe una diferencia significativa entre los parámetros del pH de las aguas de pozo antes de su tratamiento por el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles y después de su tratamiento”

$$H_0 = X_0 \approx X_{t+1}$$

H_A : “Existe diferencia significativa entre los parámetros del pH de las aguas de pozo antes de su tratamiento por el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles y después de su tratamiento”

$$H_0 = X_0 \neq X_{t+1}$$

Paso 2: Determinar el nivel de significación $\alpha = 0.05$

Paso 3: Prueba estadística.

Se aplicará la prueba t–student para muestras relacionadas debido a que se va a contrastar una variable numérica recogida longitudinalmente en contraste contra dos medidas: antes y después

Paso 4: Corroborar los supuestos de:

3.1 Normalidad

- p-valor $\geq \alpha \rightarrow$ Aceptar H_0 : Los datos provienen de una distribución normal
- p-valor $< \alpha \rightarrow$ Aceptar H_A : Los datos no provienen de una distribución normal

Tabla 23

Resumen de procesamiento de casos

		Valido		Casos Perdidos		Total	
pH		N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
MEDIA	ANTES	9	100,0%	0	0.0%	9	100.0%
	DESPUES	9	100,0%	0	0.0%	9	100.0%

No hay datos perdidos, se ha trabajado todos los datos, indicando garantía de los resultados.

Tabla 24
Prueba de normalidad hipótesis específica 2

		Kolmogorov – Smirnov (a)			Shapiro - Wilk		
	pH	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig
MEDIA	ANTES	0.396	9	0.000	0.684	9	0.001*
	DESPUES	0.148	9	0.200	0.985	9	0.986*

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera

a. Corrección de significación de Lilliefors.

El resultado de la prueba Shapiro - Wilk indica que p-valor es mayor después de la prueba a alfa por lo tanto se deduce que los datos tienen una distribución normal.

3.2 Igualdad de Varianzas

a. p-valor $\geq \alpha \rightarrow$ Aceptar H_0 : las varianzas son iguales

b. p-valor $< \alpha \rightarrow$ Aceptar H_A : existen diferencias significativas entre las varianzas

Tabla 25
Prueba de homogeneidad de varianza

		Estadístico de Levene	gl ₁	gl ₂	Sig
Media	Se basa en la media	3.182	1	16	0.093
	se basa en la mediana	3.521	1	16	0.079
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	3.521	1	14.667	0.081
	Se basa en la media recortada	3.286	1	16	0.089

El estadístico de Levene basado en la media nos muestra que p-valor (Sig) es mayor que alfa, por lo que se afirma que hay homogeneidad de la varianza.

Cumpliendo los dos requisitos previos procedemos a presentar la prueba t-student

Paso 5: prueba t-student

Si p-valor $\leq \alpha \rightarrow$ Rechazar la H_0

Si p-valor $> \alpha \rightarrow$ Aceptar H_0

Tabla 26

Estadísticas de muestra emparejadas

		Media	N	Desviación estándar	Media de error estándar
Par 1	MEDIA	7.6131	18	0.19079	0.04497
	pH	1.5000	18	0.51450	0.12127

De la tabla anterior se deduce que la prueba a considerado todos los datos (nueve ensayos antes de la electrocoagulación y nueve ensayos después de la electrocoagulación) garantizando los resultados.

Tabla 27

Prueba de muestras emparejadas

Par 1	Media-pH	Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia		t	gl	Sig. (bilateral)
					Inferior	Superior			
Par 1	Media-pH	6.11306	0.6723	0.15846	5.77873	6.44738	38.577	17	0

El resultado indica que p-valor (Sig) es menor que alfa, en consecuencia, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna es decir se prueba que existe una diferencia significativa entre los parámetros del pH antes de su tratamiento por el equipo de electrocoagulación con electrodos

móviles y después de su tratamiento, por lo tanto, se concluye que el equipo modifica eficientemente el pH de las aguas de pozo disminuyéndola.

Contrastación de la Hipótesis específica N°4

Paso 1: Redacción de la hipótesis

Hipótesis del investigador: “El equipo de electrocoagulación con electrodos móviles realiza la remoción eficientemente de los STD de las aguas de pozo”

Hipótesis de contraste:

H_0 : “No existe una diferencia significativa entre los parámetros del STD de las aguas de pozo antes de su tratamiento por el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles y después de su tratamiento”

$$H_0 = X_0 \approx X_{t+1}$$

H_A : “Existe diferencia significativa entre los parámetros del STD de las agua de pozo antes de su tratamiento por el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles y después de su tratamiento”

$$H_0 = X_0 \neq X_{t+1}$$

Paso 2: Determinar el nivel de significación $\alpha = 0.05$

Paso 3: Prueba estadística.

Se aplicará la prueba t–student para muestras relacionadas debido a que se va a contrastar una variable numérica recogida longitudinalmente en contraste contra dos medidas: antes y después

Paso 4: Corroborar los supuestos de:

3.1 Normalidad:

a. p-valor $\geq \alpha \rightarrow$ Aceptar H_0 : Los datos provienen de una distribución normal

b. p-valor $< \alpha \rightarrow$ Aceptar H_A : Los datos no provienen de una distribución normal

Tabla 28
Resumen de procesamiento de casos

STD		Valido		Casos Perdidos		Total	
		N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
PROMEDIO	ANTES	9	100.0%	0	0.0%	9	100.0%
	DESPUES	9	100.0%	0	0.0%	9	100.0%

No hay datos perdidos, se ha trabajado todos los datos, indicando garantía de los resultados.

Tabla 29
Pruebas de normalidad

STD		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
PROMEDIO	ANTES	0.234	9	0.168	0.815	9	0.03
	DESPUES	0.244	9	0.131	0.848	9	0.071

^a Corrección de significación de Lilliefors

El resultado de la prueba Shapiro-Wilk indica que p-valor es mayor después de la prueba a alfa por lo tanto se deduce que los datos tienen una distribución normal.

3.2 Igualdad de Varianzas:

a. $p\text{-valor} \geq \alpha \rightarrow$ Aceptar H_0 : las varianzas son iguales

b. $p\text{-valor} < \alpha \rightarrow$ Aceptar H_A : existen diferencias significativas entre las varianzas

Tabla 30
Prueba de homogeneidad de varianza

		Estadístico de Levene	gl ₁	gl ₂	Sig.
PROMEDIO	Se basa en la media	0.376	1	16	0.549
	Se basa en la mediana	0.135	1	16	0.718
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	0.135	1	15.994	0.718
	Se basa en la media recortada	0.35	1	16	0.562

El estadístico de Levene basado en la media nos muestra que p-valor (Sig) es mayor que alfa, por lo que se afirma que hay homogeneidad de la varianza.

Cumpléndose los dos requisitos previos procedemos a presentar la prueba t-student

Paso 5: Prueba t-student

Si p-valor $\leq \alpha \rightarrow$ Rechazar la H₀

Si p-valor $> \alpha \rightarrow$ Aceptar H₀

Tabla 31
Prueba de muestras emparejadas

		Media	N	Desviación estándar	Media de error estándar
Par 1	PROMEDIO	2.35972	18	0.593208	0.139821
	STD	1.5000	18	0.51450	0.12127

De la tabla anterior se deduce que la prueba a considerado todos los datos (nueve ensayos antes y nueve ensayos después) garantizando los resultados.

Tabla 32
Prueba de muestras emparejadas

Diferencias emparejadas									
		Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95% de intervalo de Confianza de la diferencia		t	gl	Sig. (bilateral)
					Inferior	Superior			
Par 1	PROMEDIO-STD	0.859722	0.780167	0.183887	0.471754	1.247690	4.675	17	0.000

El resultado indica que p-valor (Sig) es menor que alfa, en consecuencia, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna es decir se prueba que existe una diferencia significativa entre los parámetros del STD antes de su tratamiento por el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles y después de su tratamiento, por lo tanto, se concluye que el equipo modifica eficientemente el STD de las aguas de pozo.

4.2 Análisis e interpretación

Tabla 33
Descriptivos antes y después.

TRATAMIENTOS DE AGUAS				Estadístico	Error estándar	
MEDIA	Antes	Media		6.04213	0.181325	
		95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	5.68346		
			Límite superior	6.40081		
		Media recortada al 5%		6.17849		
		Mediana		7.60000		
		Varianza		4.374		
		Desviación estándar		2.091375		
		Mínimo		1.57		
		Máximo		7.80		
		Rango		6.23		
		Rango intercuartil		2.970		
		Asimetría		-0.767		0.210
		Curtosis		-0.933		0.417
	Después	Media		5.83659		0.175796
		95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	5.48876		
			Límite superior	6.18442		
		Media recortada al 5%		5.94721		
		Mediana		7.20800		
		Varianza		4.007		
		Desviación estándar		2.001734		
		Mínimo		1.474		
		Máximo		7.747		
		Rango		6.273		
Rango intercuartil		2.859				
Asimetría		-0.759	0.213			
Curtosis		-0.965	0.422			

De la tabla anterior podemos deducir que la media de los parámetros antes del tratamiento de las aguas de pozo con el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles es distinta, con una

varianza significativa de 4.007 sin embargo esto no es suficiente para afirmar la eficiencia del equipo, por ello se recurrió a las pruebas de hipótesis.

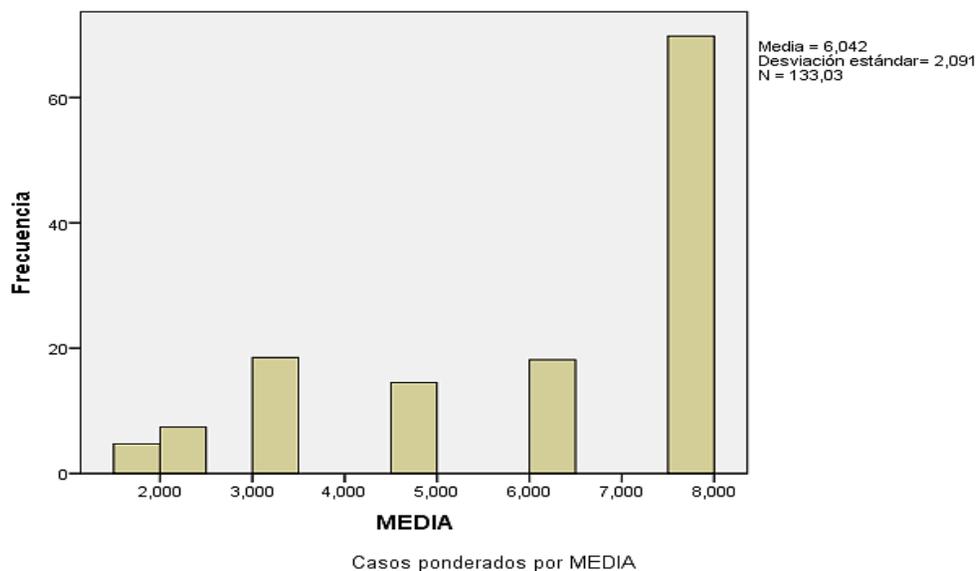


Figura 32. Histograma para el tratamiento de aguas antes.

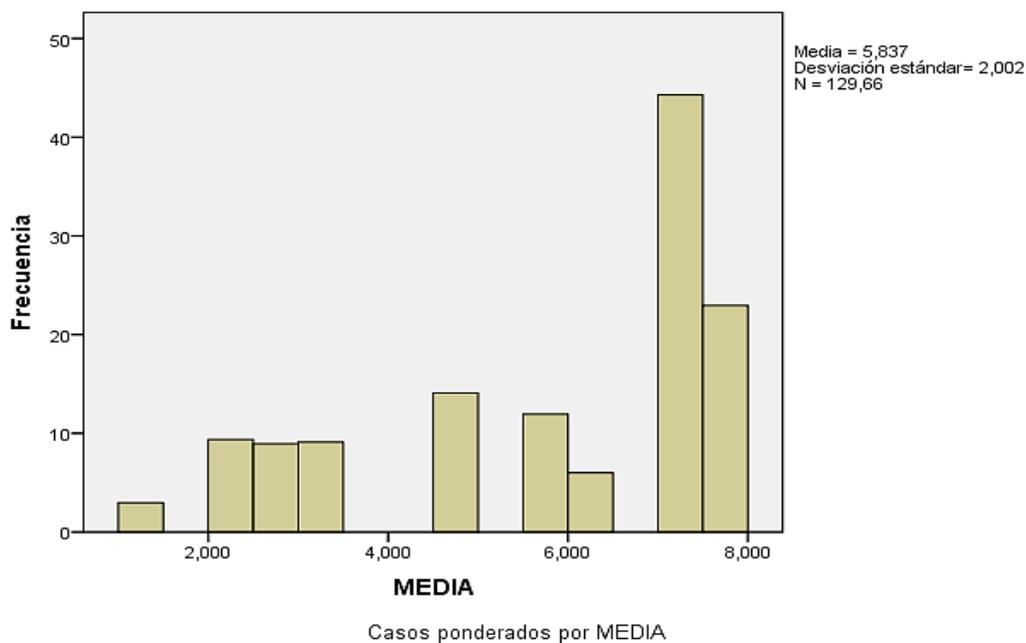


Figura 33. Histograma para tratamiento de aguas después.

Como se observa comparativamente la gráfica de la media después del tratamiento tiene una mayor recurrencia en la media 2.00; 6.00 y 8.00, infiriéndose el efecto eficiente del equipo.

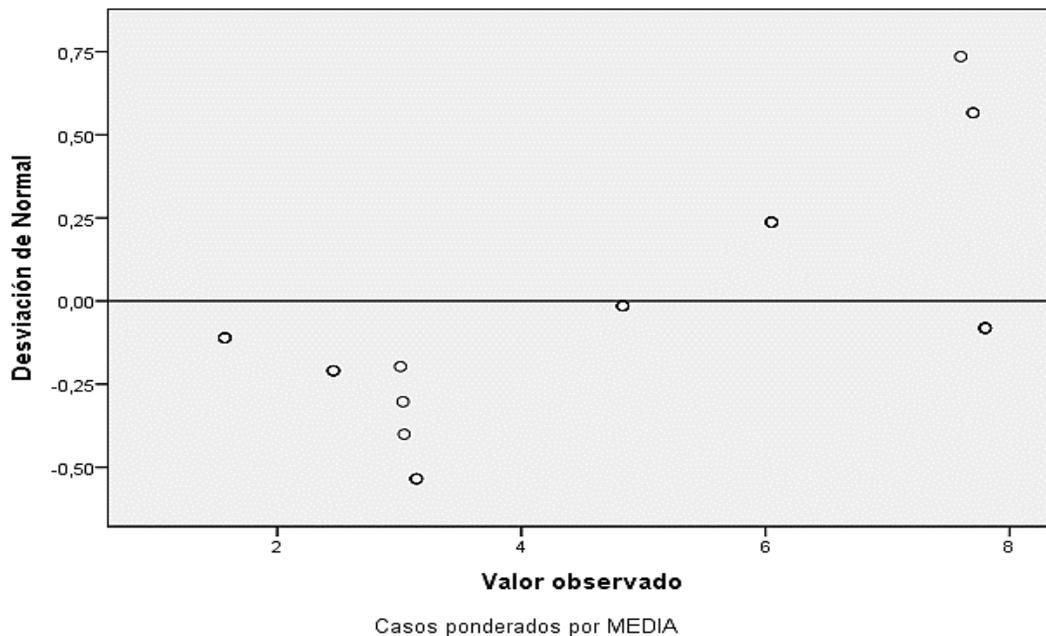


Figura 34. Gráfico q-q normal sin tendencia de media para tratamiento de aguas antes.

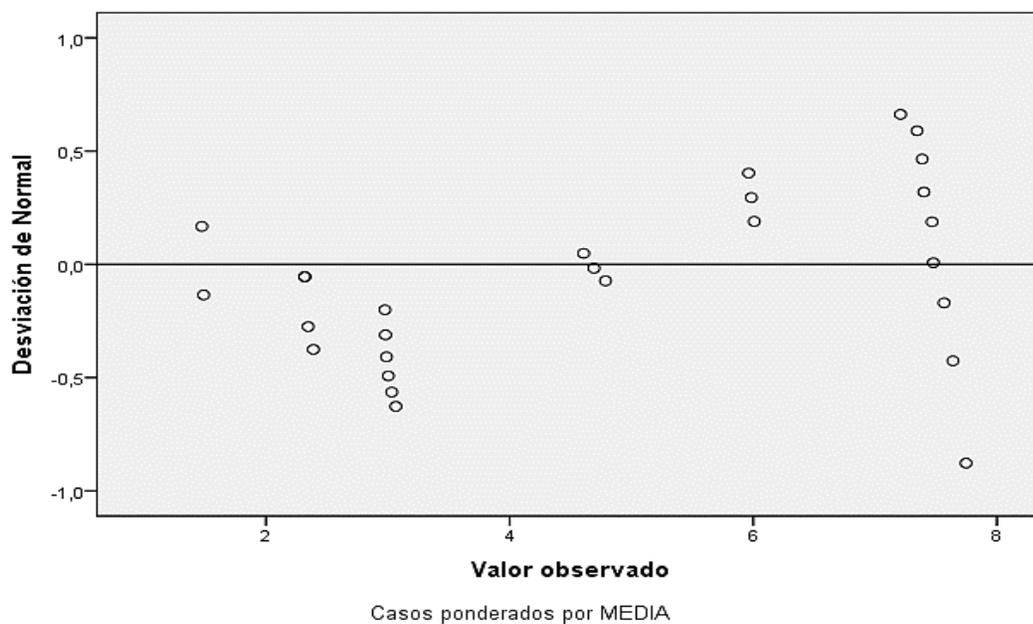


Figura 35. Gráfico q-q normal sin tendencia de media para tratamiento de agua después.

En términos de dispersión los valores observados de la media de los parámetros experimentados se encuentran más dispersos después del tratamiento, infiriéndose un gran efecto de la aplicación del equipo.

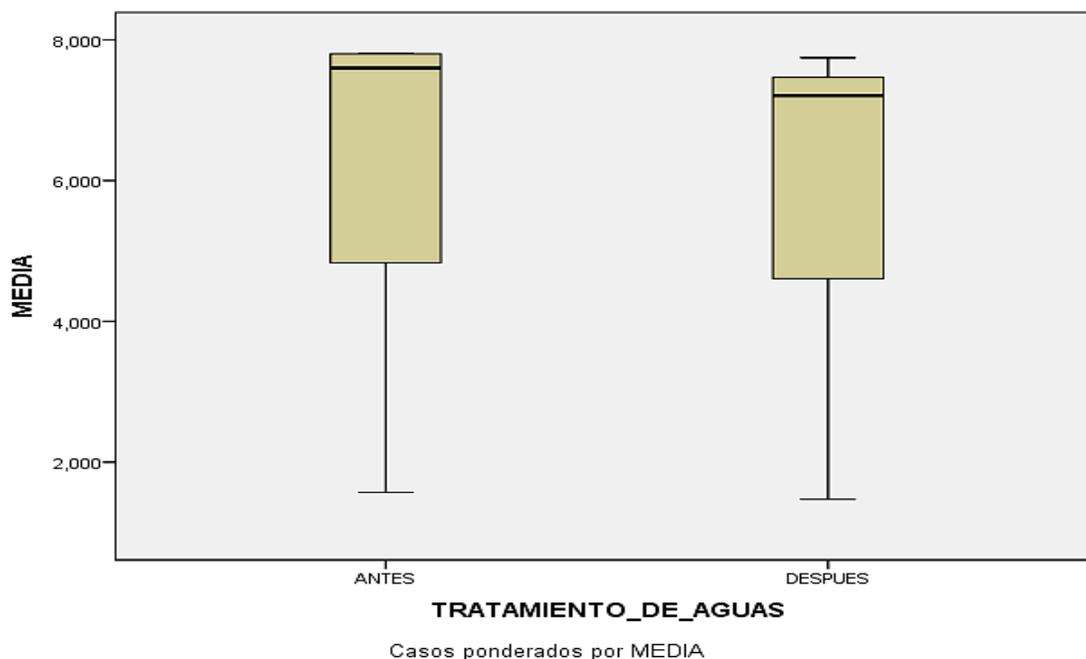


Figura 36. Tratamiento de aguas gráfica de cajas.

Esta gráfica de cajas o velas indica que la media de los parámetros es alta y que después del tratamiento de las aguas existe una mayor variabilidad por debajo de la media (mecha larga) que por encima de la media, este resultado explica la asimetría negativa de la media de los parámetros, siendo una atribución de las propiedades de las aguas de pozo; pero a la vez indica el efecto significativo del tratamiento por el equipo en las aguas de pozo, de lo contrario las dos cajas se mostrarían como espejos paralelos.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Este capítulo contiene la discusión de los resultados obtenidos en esta investigación hallando las concordancias y discordancias con los autores que antecedieron a este trabajo, así como con los teóricos; se presentan las conclusiones, y las recomendaciones finales.

5.1 Discusión

Perozo y Abreu (2017) realizaron estudios a escala de laboratorio usando una celda electrolítica, con electrodos de hierro, aluminio y acero inoxidable, donde determinaron los porcentajes de remoción de color, turbidez y sólidos totales, para una configuración aluminio - acero inoxidable y para la segunda configuración hierro - acero inoxidable. Sus resultados mostraron que las eficiencias en remoción de turbidez y color utilizando ánodo de aluminio fueron de un 40% a un 80% bajo las mejores condiciones de voltaje aplicado, separación entre los electrodos y tiempo de tratamiento; sin embargo, los porcentajes con ánodo de hierro oscilan en un rango de 10% a 50% en las mejores condiciones del sistema estudiado, lo cual fue considerado en la selección de materiales para la construcción de los electrodos móviles del equipo de electrocoagulación para lograr la formación de coagulante, desestabilización de los contaminantes y la generación de flóculos en el sistema en concordancias con lo sustentado por (Arango A. , 2005).

El resultado de esta investigación comparado con la investigación de Jaramillo (2012) en la cual diseñó y construyó un reactor de electrocoagulación para el tratamiento de agua residual de tintura y acabado textil, para tal propósito se utilizó también electrodos, sin embargo la hipótesis de esta investigación concluyó que el resultado del equipo de electrocoagulación en el tratamiento de aguas de pozo es eficiente, sin embargo puede ser discutible una concordancia en razón de tener

objetivos distintos y que el equipo de Jaramillo empleó electrodos fijos mientras que en el equipo propuesto de esta investigación funciona con electrodos móviles.

Jaramillo en su sistema experimental genera movimiento de la fase líquida por un agente externo para reducir la acumulación de sarro en los electrodos, mientras que en el presente estudio se utilizó los electrodos móviles para este fin. Igualmente se encontraron diferencias ya que en el ensayo tres aplico al sistema una intensidad de corriente de 21 amperios y sus resultados de remoción no mejoraron, hecho que fue tomado en cuenta para el presente estudio en la selección de los niveles de voltajes utilizados de 3,6 y 9 voltios donde se observan que los valores de amperaje oscilan entre 0,21 a 0,62 amperios para evitar la excesiva formación de hidrogeno en el ánodo y consecuentemente mayor presencia de OH^- en el sistema dando apariencia de una no reducción.

El equipo diseñado y construido por Papaleo, fue un referente para tomar en consideración el volumen del equipo empleado en nuestros ensayos, con una proporcionalidad de 1:2 de su capacidad. Asimismo, en su diseño el empleó electrodos de aluminio y hierro a los cuales le hizo un cambio de la polaridad en las placas con el propósito de evitar los electrodos por una sola cara logrando un sistema eficiente, a diferencia del equipo construido para nuestros ensayos se utilizó electrodos de aluminio y acero manteniendo la polaridad estable, y permitiendo de igual manera reducir los sólidos totales en el tratamiento de aguas.

Piñón, Bautista y Díaz, presentaron el trabajo de investigación “Diseño de un equipo de electrocoagulación para la eliminación de flúor en agua subterránea, es decir el diseño de un equipo que trata aguas de pozo al igual que la presente investigación, en la que se consideró los voltajes empleados en la electrocoagulación como referente para el presente estudio donde empleamos 3,

6 y 9 voltios. Así también en lo relacionado al área de los electrodos construidos, manteniendo una relación de 1:2 con el mismo propósito de electrocoagular aguas de pozo, para remover material suspendido y propiciar una desestabilización de los coloides para que estos se aglutinen y posteriormente sean separados por precipitación como lo afirma Gorodovkyh et.al (1987).

Arango & Garcés, realizaron un estudio sobre un “Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea”, donde trabajaron con electrodos separados a una distancia menor de 10 mm. obteniendo tratamientos prolongados debido a la presencia de lodos formados impidiendo la circulación del medio acuoso y la generación de turbulencias que favorecen la coagulación dando como resultado bajas remociones de DQO. Mientras que para distancias entre electrodos mayores a 10 mm. no se presentaron cambios importantes en el proceso, en comparación con los resultados obtenidos a 10 mm., lo que se constituye en un aporte valioso para la selección de separación de electrodos en nuestro equipo de EC, el mismo que tuvo una distancia de separación de 5 mm. manteniendo una relación de 2:1 con el estudio previo antes mencionado.

5.2 Conclusiones

De los resultados de la presente investigación se concluye:

Que el diseño del equipo de electrocoagulación con electrodos móviles presenta ventajas en contraste con el equipo de electrocoagulación convencional en la geometría de los electrodos, la geometría del tanque reactor y en la precisión de las lecturas de la conductividad, pH, y sólidos totales disueltos.

Que la construcción del equipo de electrocoagulación con electrodos móviles está justificada plenamente por cuanto se ha comprobado su modificación través de la experimentación científica de la aplicación del equipo en muestras de aguas de pozo obteniéndose como resultado de las pruebas de hipótesis previa verificación de la normalidad y la igualdad de la varianza de los datos aplicadas a la información generada por la experimentación.

Se logró la construcción de un equipo de electrocoagulación con electrodos móviles el que resulta eficiente para la reducción de los parámetros fisicoquímico de las aguas de pozo, siendo un equipo innovador dado que en el mercado no existe.

Se demostró que el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles es eficiente en la modificación de la conductividad del agua de pozo reduciéndola significativamente de acuerdo con la inferencia de las pruebas de t-student para muestras relacionadas antes y después del experimento.

El equipo de electrocoagulación con electrodos móviles modifica eficientemente el pH de agua de pozo tratada en esta experimentación al corroborarse los datos obtenidos mediante la prueba de hipótesis de t-student para un nivel de significancia del 5 % confirmado por el análisis descriptivo de la comparación respectiva antes y después del experimento.

Se demostró que el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles es eficiente en la modificación de los sólidos totales disueltos STD en tanto que la experimentación en las aguas de pozo corroboradas por la prueba de hipótesis de t-student para muestras relacionadas indica que el equipo las modifica significativamente.

5.3 Recomendaciones

Presentar al organismo regulador el diseño del equipo de electrocoagulación con electrodos móviles para el tratamiento de aguas, para su respectiva patente de invención.

A INDECOPI aprobar la patente de Invención del Equipo de Electrocoagulación con Electrodos Móviles para el Tratamiento de aguas.

Probar la eficiencia del Equipo de Electrocoagulación con Electrodos Móviles para el Tratamiento de aguas residuales de las diferentes actividades industriales.

Crear, y desarrollar líneas de investigación en el Área del Tratamiento de Aguas Residuales Industriales mediante el método de electrocoagulación con el uso del equipo construido “Equipo de Electrocoagulación con Electrodos Móviles”.

Replicar el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles para la difusión de su uso para tratar aguas turbias principalmente focalizadas en la población rural o Centros Poblados como parte del sistema de tratamiento de las aguas de pozo y así mitigar el riesgo de enfermedades de la población que consume aguas turbias de pozo.

Para electrocoagular agua de mar, se debe determinar los adecuados de voltajes, de la velocidad de giro de los electrodos del “Equipo de electrocoagulación con electrodos móviles” construido, que permitan obtener cambios medibles de la conductividad, sólidos totales disueltos, y pH, ya que con los valores de los parámetros desarrollados en esta investigación no se obtienen resultados satisfactorios.

VI. REFERENCIAS

- Aguamarket. (2018). *flóculo*. Obtenido de <https://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=992&termino=floculo>
- Aguilar, E. (2015). *Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua*. Obtenido de http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/cybertesis/4303/Aguilar_ae.pdf;jsessionid=9CDA2C43C9E581543C9C009C19FD6AD0?sequence=3
- Alcantar De Soto, A. (1999). *Prácticas de Ingeniería Sanitaria I*. República Dominicana: Búho.
- Alméciga, A., & Muñoz, M. (2013). *pH: Historia de un concepto. Análisis en textos de educación superior*. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.
- Arango, A. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Lasallista de Investigación, vol. 2, núm. 1*, 49-56.
- Arango, A., & Garcés, L. (2007, p 56-67). *Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea*. Obtenido de Universidad EAFIT: [file:///C:/Users/USER/Pictures/Downloads/764-1-2201-1-10-20120531%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/USER/Pictures/Downloads/764-1-2201-1-10-20120531%20(1).pdf)
- Arce, J. (2018). Tensión, corriente y resistencia. *TecnoCiencia Electrónica*, 12.
- Babor, J., & Ibarz, J. (1965). *Química general moderna*. Barcelona: Marín.
- Beltrán, K. (2015). *Tesis Diseño conceptual y construcción de un Electrocoagulador controlado por LABVIEW*. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/302357083>
- Bembibre, V. (2009). *Voltaje*. Obtenido de <https://www.definicionabc.com/ciencia/voltaje.php>
- Bernal, C. (2010). *Metodología de la Investigación*. Colombia: Pearson.
- Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. In: *Separation and Purification Technology*. Vol. 38, No. 1. 11–41.

- Cruz, E., Medina, P., & Restrepo, J. (2007). Aplicación del modelo de experimentación Taguchi en un Ingenio azucarero del Valle del Cauca. *Scientia et Technica* , XIII N° 34. .
- Deloya , A. (2006). Métodos de análisis físicos y espectrofométricos para el análisis de aguas residuales. *Revista Tecnología en Marcha: Vol. 19 Núm. 2*, 31.
- Dominguez, D. (2017). Corriente, voltaje y resistencia. *Finning*, 19 pag.
- Giancoli, D. (2006). *Física: Principios con aplicaciones, 6ta. ed.* México: Pearson Educación .
- González, M. (2010). *Cátodo*. Buenos Aires: La Guía.
- Gorodovkyh , V., Kaplin , A., & Svishchenko , N. (1987). Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=6746282&pid=S1665-2738201100020001000020&Ing=es
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, L. (2014). *Metodología de la investigación*. México: Mc Graw.
- Holt, P., Barton, G., & Mitchell, C. (2005). The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *ELSEVIER*, 355-367. Obtenido de <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3773/Paitan%20De%20La%20Cruz%20-%20P>
- Jaramillo, E. (2012). *Diseño y construcción de un reactor de electrocoagulación para el tratamiento de agua residual de tintura y acabado textil*. Obtenido de <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/2337/7/04%20IT%20130%20TESIS%20ELECTROCOAGULACI%C3%93N.pdf>
- Jiang, W., Chem, M., Yang, J., Deng, Z., Liu, Y., Bian, J., . . . Hou, D. (2017). *w.sciencedirect.com*. Obtenido de w.sciencedirect.com/science/article/pii/S1572665717305027

- Lee , C. (2005). *Environmental Engineering Dictionary (4th ed.)*. . United States of America Government Institutes.
- Martínez , F. (2008). *Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional*. Cuenca: Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha.
- Martínez, Y., & Hernández , R. (2005). *Electroquímica energía y ambiente*. Venezuela: Smart Service C.A.
- MINSA. (2010). Reglamento de la calidad del agua para consumo humano.
- Morales , C. (2007). *Estudio para la remoción de metales pesados en los lixiviados de rellenos sanitarios*. Sede Manizales, Universidad Nacional de Colombia.
- Morales, N. (2010). Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas. *Ciencia e ingeniería neogranadina*. Vol. 20-1, 33-44.
- Morante, G. (2002). Electrocoagulación de aguas residuales. *Revista colombiana de física*, vol. 34, no. 2., 484-487.
- Papaleo, M., & Rodríguez, S. (2011). *Diseño y construcción del prototipo de un sistema de electrocoagulación de tratamiento de aguas residuales*. Universidad de San Buenaventura Cali.
- Pérez, C., León, F., & Delgadillo, G. (2013). *Tratamiento de agua- Manual de laboratorio*. México: Universidad Nacional de México.
- Perozo, J., & Abreu, R. (2017). *Evaluación de la electrocoagulación en el tratamiento de agua potable*. Obtenido de www.redalyc.org: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86351157005>
- Piñon , M., Bautista, A., & Díaz , M. (2002). Diseño de un equipo de electrocoagulación para la eliminación de flúor en agua subterránea. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería

- Sanitaria y Ambiental. Cancún , México. Obtenido de <https://docplayer.es/20738974-Disen0-de-un-equipo-de-electrocoagulacion-para-la-eli>.
- Restrepo, A., Arango, A., & Garcés, L. (2006). *La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas*. Obtenido de http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/514/1/pl_v1n2_58-77_electrocoagulacion.pdf
- Robles, L., & López, A. (2017). Diseño de un prototipo para el tratamiento de aguas residuales domésticas, basado en electrocoagulación. Bogotá, Colombia. Obtenido de [ile:///C:/Users/USER/Pictures/Downloads/Diseño%20De%20Un%20Prototipo%20Para%20El%20Tratamiento%20De%20Aguas%20Residuales%20Domésticas%252c%20Basado%20En%20Electrocoagulación%20\(1\).pdf](ile:///C:/Users/USER/Pictures/Downloads/Diseño%20De%20Un%20Prototipo%20Para%20El%20Tratamiento%20De%20Aguas%20Residuales%20Domésticas%252c%20Basado%20En%20Electrocoagulación%20(1).pdf)
- Rodríguez, J. (2009). Parámetros fisicoquímicos de dureza total en calcio y magnesio, pH, conductividad y temperatura del agua potable analizados en conjunto con las (ASADAS) distrito de Grecia Canton de Alejuela. *Pensamiento Actual, Universidad de Costa Rica*, 125 - 134.
- Rogan, W. J., & Brady, M. T. (2009). Consumo de agua de pozos particulares y riesgos para los niños. *Pediatrics (Ed esp)*., 363-369.
- Roldán, G. (2003). *Bioindicación de la calidad del agua en Colombia*. Universidad de Antioquia.
- Severiche, C., Castillo, M., & Acevedo, R. (2013). *Manual de métodos analíticos para la determinación de parámetros fisicoquímicos básicos en aguas*. Cartagena de Indias Colombia: Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso.
- Shestakova, M., & Sillanpaa, M. (2017). *Electrochemical Water Treatment Methods - Chapter 4*. Finland: Butterworth Heinemann.

Tamayo, M. (1999). *La Investigación 3ra. Ed.* Santa fé de Bogotá: ICFES.

Tarback, E., & Lutgens , F. (2018). *Explorando y conociendo nuestra tierra – Ruta Geológica.*

Obtenido de

https://www.rutageologica.cl/index.php?option=com_content&view=article&id=393&Itemid=95&showall=1

Valderrama, S. (2014). *Pasos para elaborar proyectos y tesis de investigación.* Lima: San Marcos.

Vera, M. (2007). *Química general.* Argentina: Smart Service C.A.

Villegas, V. (2013). *Análisis físicoquímico y microbiológico de aguas envasadas en funda consumidas masivamente en el Cantón Shushufindi, Provincia Sucumbíos variando las condiciones de almacenamiento.* Quito: Universidad Central del Ecuador.

Westres, Z. (2013). *Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales procedentes de una planta productora de sulfatos mediante el proceso electroquímico de electrocoagulación.*

Universidad Nacional de Ingeniería, Lima. Obtenido de

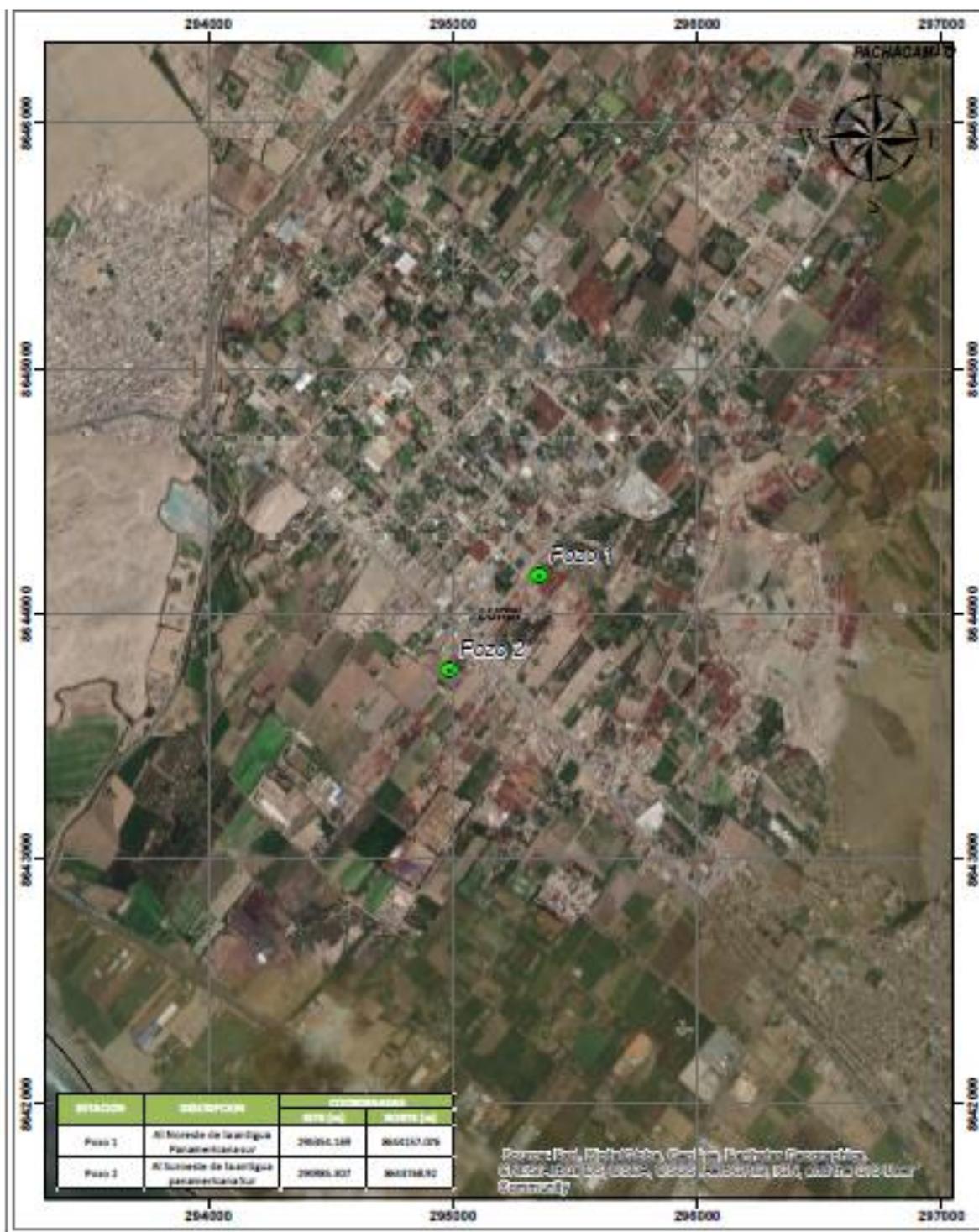
http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/2318/1/westres_zs.pdf

ANEXOS

Anexo 1 *Matriz de Consistencia*

TITULO: EQUIPO DE ELECTROCOAGULACION CON ELECTRODOS MÓVILES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS DE POZO				
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES Y DIMENSIONES	METODOLOGÍA
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable de calibración	Tipo de Investigación
¿La construcción de un equipo de electrocoagulación con electrodos móviles realiza eficazmente el tratamiento de las aguas de pozo?	Construir el equipo de electrocoagulación con electrodos móviles para el tratamiento de las aguas de pozo.	El equipo de electrocoagulación construido con electrodos móviles realiza eficazmente el tratamiento de las aguas de pozo.	Equipo de electrocoagulación con electrodos móviles	Es una investigación Científica-Tecnológica que correlaciona los datos extraídos, es una investigación aplicada
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable Evaluativa	Población y Muestra
¿El diseño del equipo de electrocoagulación con electrodos móviles experimental modifica eficientemente los parámetros fisicoquímicos de las de las aguas de pozo en comparación con el equipo de electrocoagulación convencional?	Contrastar el diseño del equipo de electrocoagulación experimental con electrodos móviles para el tratamiento de aguas con el equipo de electrocoagulación convencional.	“El diseño del equipo de electrocoagulación con electrodos móviles para el tratamiento de las aguas de pozo supera ventajosamente al de diseño convencional”	Aguas de pozo	Población: 20 pozos Muestra: 3 pozos
¿El equipo de electrocoagulación con electrodos móviles modifica eficientemente la conductividad de las aguas de pozo?	Evaluar la eficiencia del equipo de electrocoagulación con electrodos móviles en la remoción de la conductividad de las aguas de pozo	“El equipo de electrocoagulación con electrodos móviles realiza la remoción eficiente de la conductividad de las aguas de pozo”		
¿El equipo de electrocoagulación con electrodos móviles modifica eficazmente el pH de las aguas de pozo?	Evaluar la eficiencia del equipo de electrocoagulación con electrodos móviles en la remoción del pH de las aguas de pozo.	“El equipo de electrocoagulación con electrodos móviles realiza la remoción eficiente del pH de las aguas de pozo”		
¿El equipo de electrocoagulación con electrodos móviles modifica eficientemente los sólidos totales disueltos de las aguas de pozo?	Evaluar la eficiencia del equipo de electrocoagulación con electrodos móviles en la remoción de los sólidos totales disueltos de las aguas de pozo	“El equipo de electrocoagulación con electrodos móviles realiza la remoción eficiente de los sólidos totales disueltos de las aguas de pozo”		

Anexo 2 Vista satelital de la ubicación de los pozos 1 y 2



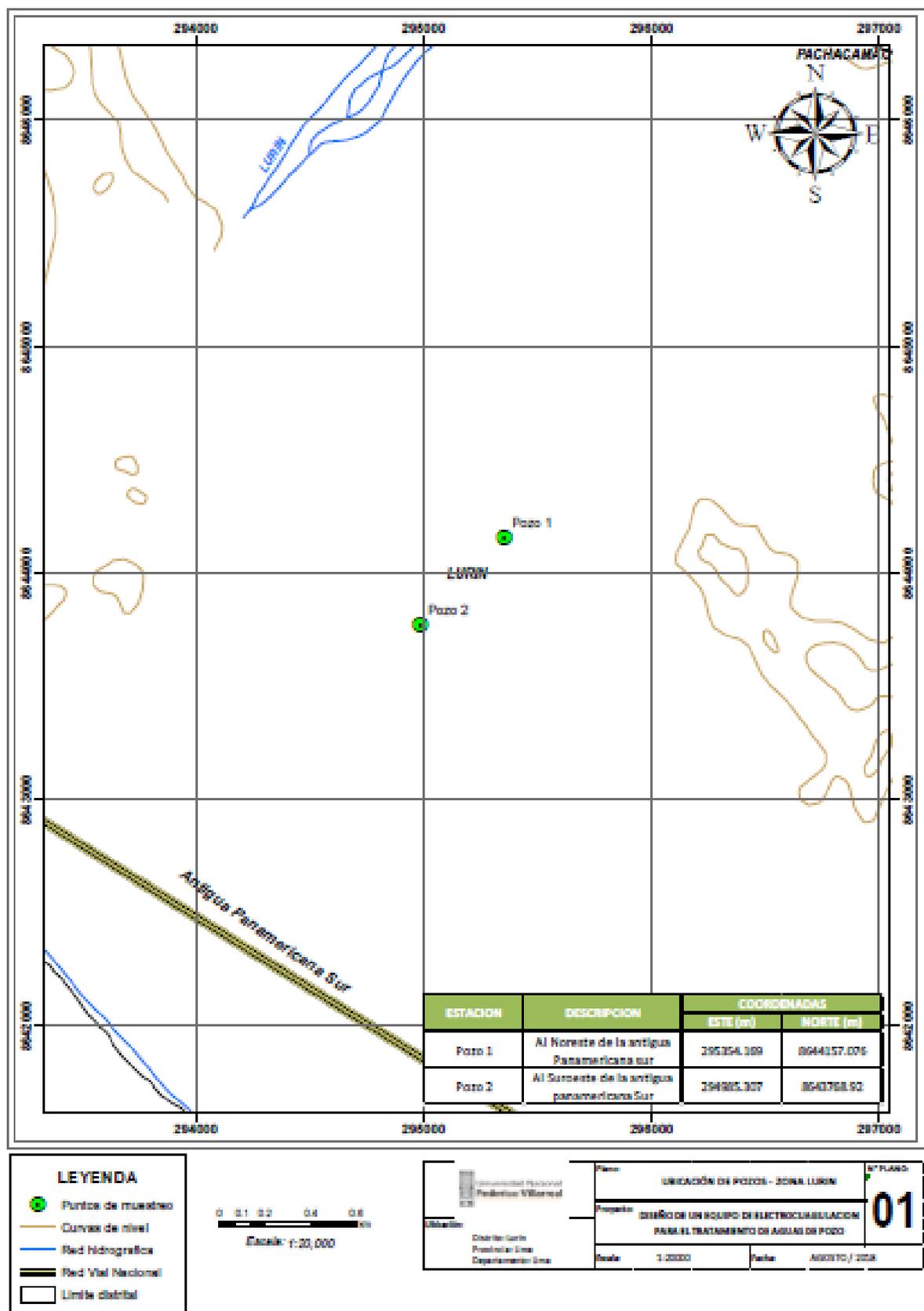
LEYENDA

- Puntos de muestreo
- Límite distrital



Universidad Nacional Federico Villarreal U.V.R. Ubicación: Dirección: Lima Proveedor: Lima Departamento: Lima	Plan: UBICACIÓN DE POZOS - ZONA LURIN	N° PLANO 01
	Proyecto: DISEÑO DE UN EQUIPO DE ELECTROCOAGULACION PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS DE POZO	
	Escala: 1:20000	Fecha: AGOSTO / 2018

Anexo 3 Ubicación de los pozos 1 y 2 con curvas de nivel



Anexo 4 Medición de parámetros fisicoquímico de las aguas de pozo 3



Anexo 5 Toma de muestra de agua de pozo 1

